

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



научный рецензируемый журнал

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

“Vestnik SibADI”

Том 23, № 3. 2026
Vol. 23, No. 3. 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: 10.26518/2071-7296-2026-23-3

TOM 23, № 3. 2026

VOL. 23, No. 3. 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 30.06.2026. Дата выхода в свет 30.06.2026. Формат 60×84 1/8 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 30.06.2026. Publication date is 30.06.2026. Format is 60 × 84 1/4.

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 Жигадло Александр Петрович, д-р пед. наук, канд. техн. наук, проф., член-кор. АБН, 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

Буриянов 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 Author ID 6603741286, **Researcher ID** P-7880-2015, **ORCID ID** 0000-0003-2164-9936

Горынин Глеб Леонидович, д-р физ.-мат. наук, проф. ФГБОУ ВО «СурГУХМАО-ЮГРЫ», г. Сургут, Россия

Scopus Author ID 10040194400, **Researcher ID** AAM-4262-2021, **ORCID ID** 0000-0001-7843-7278

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

Данилов Борис Борисович, д-р техн. наук. Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия.
Scopus Author ID 7003684882, **Researcher ID** E-2362-2014, **ORCID ID** 0000-0002-6685-9606

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

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

Зырянов Владимир Васильевич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Организация перевозок и дорожного движения» 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. Днепрпетровск, 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

Щербakov 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

Zhirgalbek S. Sharshembiev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Kyrgyz National Agrarian University named after K.I. Scriabin, Bishkek, Kyrgyz Republic,
Scopus Author ID 57216812633, **Author ID** в РИНЦ 595504

Vitaliy V. Shcherbakov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 57034922100, **Researcher ID** N-1716-2017, **ORCID ID** 0000-0002-3084-2271

Zhanping You, Professor, Michigan Technological University, Houghton, USA
Scopus Author ID 14420403300, **ORCID ID** 0000-0002-9103-6599, **Researcher ID** P-4406-2015

Edwin Koźniowski, 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. Maksimiyuk
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***М.А. Афанасьев, И.С. Тюремнов*

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОХОДНЫХ РЕВЕРСИВНЫХ И НЕРЕВЕРСИВНЫХ ВИБРОПЛИТ	374
--	------------

В.А. Зорин, Нгуен Куанг Хай

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ СМЕСИТЕЛЬНОЙ КАМЕРЫ РЕСАЙКЛЕРА	388
---	------------

С.В. Савельев, В.В. Михеев, И.К. Потеряев, А.С. Савельев

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА ДОРОЖНОГО КАТКА С УПЛОТНЯЕМОЙ ГРУНТОВОЙ СРЕДОЙ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ	402
---	------------

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ*Ю.А. Колебер*

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ СИСТЕМ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ	416
---	------------

П.С. Яковчук, С.Н. Кривцов, В.Г. Дыгало

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАЗНОСТИ РАСХОДОВ ВОЗДУХА КАК ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ПАРАМЕТР ЦИЛИНДРО-ПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	432
---	------------

М.Г. Бояршинов, Ю.А. Щукин, Е.Д. Сидоров

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И НАТУРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРКОВОЧНОЙ ТЕРРИТОРИИ	446
--	------------

М.М. Журкин

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ ТРЕХОСНОГО МОТОВЕЗДЕХОДА С МОНТИРУЕМОЙ ЗАДНЕЙ ОСЬЮ, ОСНАЩЕННОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ	458
---	------------

Н.А. Никитин, П.И. Роговой, И.В. Данилов, И.В. Абросимов

МЕТОД ТЕМПЕРАТУРНОГО РАНЖИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ КЛАСТЕРОВ ДТП ДЛЯ ПРИОРИТЕЗАЦИИ ГОРОДСКИХ ОЧАГОВ АВАРИЙНОСТИ.....	474
--	------------

А.В. Мартыненко

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ МЕЖМУНИЦИПАЛЬНЫХ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ В АГЛОМЕРАЦИИ КРУПНОГО ГОРОДА	484
---	------------

Е.А. Бородулина, Л.С. Трофимова

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИОРИТИЗАЦИИ ВНЕДРЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ИННОВАЦИЙ В ГОРОДСКУЮ СРЕДУ	496
--	------------

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА*В.С. Лесовик, В.А. Дудченко, А.А. Клементьева*

КЛАДОЧНЫЕ РАСТВОРЫ ИЗ БОЯ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА: ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ ЗАКОНА СРОДСТВА СТРУКТУР	512
--	------------

А.А. Лыткин, Г.В. Долгих, А.С. Прохыгин

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ ДЛЯ УКРЕПЛЕНИЯ АСФАЛЬТОГРАНУЛЯТА	522
---	------------

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Mikhail A. Afanasev, Ivan S. Tyuremnov

ANALYSIS OF TECHNICAL SPECIFICATIONS OF REVERSIBLE AND FORWARD PLATE COMPACTORS	375
--	------------

Vladimir A. Zorin, Quang Hai Nguyen

OPTIMIZATION OF COMPOSITE COATINGS STRUCTURE TO PROTECT WORKING EQUIPMENT OF RECYCLER MIXING CHAMBER	389
---	------------

Sergey V. Savelyev, Vitaly V. Mikheyev, Ilya K. Poteyayev, Andrey S. Savelyev

MATHEMATICAL MODELS OF INTERACTION BETWEEN OPERATING EQUIPMENT OF ROAD ROLLER AND COMPACTED SOIL IN TERMS OF ENERGY EFFICIENCY	403
---	------------

PART II. TRANSPORT

Yuliya A. Koleber

ALGORITHM FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF URBAN PUBLIC PASSENGER TRANSPORT SYSTEMS	417
---	------------

Pavel S. Yakovchuk, Sergey N. Krivtsov, Vladislav G. Dygalo

ANALYTICAL ASSESSMENT OF THE DIFFERENCE IN AIR FLOW RATES AS A DIAGNOSTIC PARAMETER OF THE CYLINDER-PISTON GROUP OF DIESEL ENGINES	433
---	------------

Mikhail G. Boyarshinov, Yuriy A. Shchukin, Evgeniy D. Sidorov

COMPUTATIONAL EXPERIMENT AND FIELD STUDY OF PARKING AREA CHARACTERISTICS	447
---	------------

Mikhail M. Zhurkin

IMPROVING ENERGY EFFICIENCY OF HYBRID TRACTION DRIVE CONTROL FOR THREE-AXLE ALL-TERRAIN VEHICLES WITH MOUNTABLE ELECTRIC REAR AXLE DRIVE	459
---	------------

Nikolai A. Nikitin, Pavel I. Rogovoy, Ilya V. Abrosimov, Ilya V. Danilov

TEMPERATURE RANKING METHOD FOR SPATIO-TEMPORAL ROAD ACCIDENT CLUSTERS TO PRIORITIZE URBAN BLACK SPOTS	475
--	------------

Alexander V. Martynenko

MODELING OF INTER-MUNICIPAL ORIGIN-DESTINATION MATRIX FOR LARGE URBAN AGGLOMERATION	485
--	------------

Elizaveta A. Borodulina, Liudmila S. Trofimova

PRIORITIZATION OF TRANSPORT INNOVATIONS INTEGRATION IN URBAN ENVIRONMENT	497
---	------------

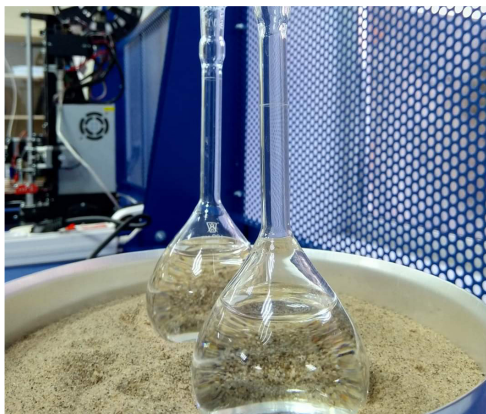
PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Valery S. Lesovik, Valeria A. Dudchenko, Anna A. Klementyeva

MASONRY MORTARS MADE FROM CRUSHED CERAMIC BRICK WASTE: ENHANCING EFFICIENCY BASED ON THE LAW OF STRUCTURAL AFFINITY	513
--	------------

Alexandr A. Lytkin, Gennadiy V. Dolgikh, Aleksandr S. Prolygin

THE EFFECTIVENESS OF USING COMPLEX MINERAL BINDERS TO STRENGTHEN ASPHALT GRANULATE	523
---	------------



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



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

Научная статья
УДК 625.76.08
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-374-387>
EDN: AXFCLB



АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОХОДНЫХ РЕВЕРСИВНЫХ И НЕРЕВЕРСИВНЫХ ВИБРОПЛИТ

М.А. Афанасьев ✉, И.С. Тюремнов

Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия

✉ ответственный автор
afanasiev.m.a2016@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Самоходные виброплиты – грунтоуплотняющие машины с плоским рабочим органом, обеспечивающие послойное уплотнение грунта слоями небольшой толщины. В зависимости от способа передвижения выделяют нереверсивные и реверсивные виброплиты. Разработка виброплит требует обоснования ряда технических характеристик, к которым относятся вынуждающая сила, частота колебаний вибровозбудителя, длина и ширина основания, мощность двигателя, относительная вынуждающая сила и др. Для обобщения накопленного опыта производства, а также выявления особенностей в технических характеристиках реверсивных и нереверсивных виброплит, был проведен статистический анализ.

Материалы и методы. В работе исследуются 644 модели нереверсивных и 484 модели реверсивных виброплит. Данные о технических характеристиках рассматриваемых моделей брались с официальных сайтов производителей, а также с сайтов их дилеров. Уравнения регрессии и коэффициенты детерминации получены в программе Microsoft Excel.

Результаты. Определены диапазоны изменения технических характеристик для нереверсивных и реверсивных виброплит. Получены уравнения регрессии и коэффициенты детерминации для взаимосвязей длины и ширины основания, мощности двигателя, вынуждающей силы, частоты колебаний вибровозбудителя и относительной вынуждающей силы от массы нереверсивных и реверсивных виброплит. Большинство полученных зависимостей имеют средние и низкие значения коэффициента детерминации.

Заключение. Диапазоны изменения значений большинства параметров нереверсивных и реверсивных виброплит совпадают в соответствующих диапазонах масс. Исключение составляют только относительная вынуждающая сила и частота колебаний вибровозбудителя, где для нереверсивных виброплит наблюдается существенный разброс значений. Диапазоны значений масс также различаются, причем диапазон значений масс реверсивных виброплит почти полностью перекрывает соответствующий диапазон нереверсивных виброплит. Средние и низкие значения коэффициентов детерминации и значительный разброс отдельных параметров позволяют предположить, что у производителей отсутствует общепринятая методика их обоснования. При выполнении дальнейших исследований целесообразно разделять реверсивные и нереверсивные виброплиты, поскольку их технические характеристики, механизм передвижения и распределение напряжений по контактной поверхности с грунтом различаются. Для повышения эффективности виброплит целесообразно исследовать влияние соотношения массы рамы и основания виброплиты, а также характеристик амортизаторов с целью обеспечения требуемой для эффективного уплотнения грунта продолжительности действия контактных напряжений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грунт, уплотнение, вибрация, виброплита, виброплита нереверсивная, виброплита реверсивная, относительная вынуждающая сила, вынуждающая сила, мощность двигателя, ширина основания, длина основания, анализ статистический, частота колебаний, масса виброплиты

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность редакции журнала «Вестник СибАДИ» и рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 18.03.2024; одобрена после рецензирования 01.06.2026; принята к публикации 15.06.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

© Афанасьев М.А., Тюремнов И.С., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

Для цитирования: Афанасьев М.А., Тюремнов И.С. Анализ технических характеристик самоходных реверсивных и неревверсивных виброплит // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 3. С. 374-387. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-374-387>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-374-387>

EDN: AXFCLB

ANALYSIS OF TECHNICAL SPECIFICATIONS OF REVERSIBLE AND FORWARD PLATE COMPACTORS

Mikhail A. Afanasev ✉, Ivan S. Tyuremnov

Yaroslavl State Technical University,

Yaroslavl, Russia

✉ corresponding author

afanasiev.m.a2016@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Self-propelled plate compactors are soil compaction machines with a flat working body that provide layer-by-layer soil compaction with small-thickness layers. Depending on the method of travel, reversible and forward plate compactors may be distinguished. Designing plate compactors requires substantiation of a number of technical specifications, such as driving force, frequency of vibration exciter, length and width of the base plate, engine power, relative driving force, etc. To summarize the manufacturing experience and reveal specifics in main parameters of reversible and forward plate compactors, a statistical analysis was carried out.

Materials and methods. 644 models of forward and 484 models of reversible plate compactors were examined. Technical specifications data for the models under study was obtained from official websites of plate compactor manufacturers and their dealers. Regression equations and correlation coefficients were calculated in Microsoft Excel.

Results. The variation ranges of technical specifications for forward and reversible plate compactors were determined. Regression equations and correlation coefficients were derived for correlations between the base plate length and width, engine power driving force, oscillation frequency and relative driving force and the mass of forward and reversible plate compactors. Most of the correlations exhibit medium or low correlation coefficients.

Conclusion. The variation ranges for most parameters of forward and reversible plate compactors overlap within their respective mass ranges. The only exceptions are the relative driving force and oscillation frequency of vibration exciters, where forward plate compactors exhibit a significant scatter of values. The mass variation ranges also differ, with mass range of reversible plate compactors almost completely overlapping the corresponding range of forward plate compactors. Medium and low correlation coefficients and significant scatter of certain parameters suggest that manufacturers do not have a generally accepted methodology for their justification. When conducting further research, it is advisable to differentiate between reversible and forward plate compactors, since their technical specifications, travel mechanics and stress distribution along the contact surface differ. Furthermore, to enhance the efficiency of plate compactors, it is reasonable to study the influence of the mass ration between the frame and the base plate, as well as shock absorber characteristics, in order to ensure the contact stress time required for effective soil compaction.

KEYWORDS: soil, compaction, vibration, plate compactor, forward plate compactor, reversible plate compactor, relative driving force, driving force, engine power, base plate width, base plate length, statistical analysis, oscillation frequency, mass of plate compactor

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors express their gratitude to the editorial staff of The Russian Automobile and Highway Industry Journal and the reviewers of the manuscript.

The article was submitted: March 18, 2024; approved after reviewing: June 01, 2026; accepted for publication: June 15, 2026.

All authors have read and approved the final manuscript.

© Afanasev Mikhail A., Tyuremnov Ivan S., 2026



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

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

For citation: Afanasev M.A., Tyuremnov I.S. Analysis of technical specifications of reversible and forward plate compactors. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (3): 374-387. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-374-387>

ВВЕДЕНИЕ

Уплотнение грунта – это технологический процесс, нацеленный на достижение заданной плотности, увеличение структурной прочности и уменьшение величины последующей осадки оснований и земляных сооружений. Для его выполнения могут быть задействованы различные виды грунтоуплотняющих машин (ГУМ): грунтовые катки статического и динамического действия, трамбуемые машины, вибротрамбовки, траншейные виброкатки, самоходные виброплиты, навесные экскаваторные виброплиты и др.

Самоходные виброплиты (далее – виброплиты) относятся к средствам малой механизации и являются одним из наиболее распространенных видов ГУМ. Они используются в тех случаях, когда применение других типов грунтоуплотняющих машин затруднено или экономически нецелесообразно: при работе на небольших площадках, при необходимости частого перемещения между участками строительства, при уплотнении грунта в труднодоступных местах (траншеях, котлованах, пазах фундамента и т.д.).

Виброплиты различаются по способу управления (ручное и дистанционное), массе (сверхлегкие – до 100 кг, легкие – от 100 до 200 кг, средние – от 200 до 500 кг и тяжелые – более 500 кг), типу двигателя (бензиновый, дизельный и электрический) и способу передвижения (нереверсивные и реверсивные) [1]. Нереверсивные виброплиты способны передвигаться только в прямом направлении. Реверсивные виброплиты способны самостоятельно перемещаться как в прямом, так и в обратном направлении.

Нереверсивные виброплиты характеризуются относительно низкой массой и достаточно простой конструкцией. Как правило, здесь устанавливается одновальный вибровозбудитель круговых колебаний, вынесенный в переднюю часть основания. Самоходность такой виброплиты обеспечивается различием сопротивления передвижению вперед и назад,

которая достигается, с одной стороны, разностью амплитуд колебаний передней и задней кромки основания, а с другой – совпадением фаз отрыва передней кромки от грунта с фазами активного передвижения виброплиты вперед [2].

Реверсивные виброплиты оснащаются одним или несколькими двухвальными вибровозбудителями направленных колебаний (реже – трехвальным вибровозбудителем направленных колебаний). Это приводит к усложнению конструкции и увеличению массы машины. Самоходность реверсивных виброплит обеспечивается фазовым смещением дебалансных валов относительно друг друга на угол в $60^\circ \dots 90^\circ$ или в $-60^\circ \dots -90^\circ$ (для прямого и реверсивного движения соответственно), за счет чего равнодействующая центробежных сил в любой момент времени оказывается наклонена к горизонту на некоторый угол, не равный 0° или 90° , что обеспечивает передвижение машины в горизонтальной плоскости. Механизм реверса облегчает работу в стесненных условиях, в частности, в узких траншеях, где затруднен разворот виброплиты [1].

Существующие исследования по теме виброплит сосредоточены на повышении вибрационной безопасности оборудования [3], увеличении производительности и снижении его стоимости [4, 5]. Помимо этого, исследователями изучается динамика и условия обеспечения самоходности нереверсивных виброплит [6, 7, 8], а также распространение вибрации от работы реверсивных моделей виброплит [9]. Одним из перспективных направлений развития ГУМ, и виброплит в частности, является внедрение так называемых систем «интеллектуального» уплотнения, а также совершенствование методов контроля качества уплотнения¹ [10-20].

В то же время недостаточно изученным остаётся вопрос обоснования технических характеристик нереверсивных и реверсивных виброплит. Существует ряд исследований, в которых содержится статистический анализ

¹ Kaufmann K., Anderegg Roland. GPS-based Compaction Technology. Proceedings of the 1st International Conference on Machine Control and Guidance. 2008; 287-296.

виброплит² [20-22]. Однако в них не учитывается большинство моделей виброплит, выпускаемых в настоящее время, а также приводится весьма ограниченная выборка. На основании результатов [23-24] в данной работе рассматриваются технические характеристики самоходных нереверсивных и реверсивных виброплит вне зависимости от типа установленного двигателя (бензинового, дизельного или электрического).

Целью данного исследования являлся сравнительный анализ двух основных типов самоходных виброплит (реверсивных и нереверсивных), а также систематизация данных об их технических характеристиках для совершенствования методик их проектирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для выполнения статистического анализа использовались данные о технических характеристиках нереверсивных виброплит основных отечественных (Вибромаш, Красный маяк, Сплитстоун, Техком и др.) и зарубежных (ALTECO, AMMANN, Batmatic, Belle, BOMAG, Chicago Pneumatic, Diam, Dynapac, Enar, Euro Shatal, Excalibur, FoxWeld, Helmut, Husqvarna, Huter, Impulse, KOMAN, Lifan, Lumag, MBW, Mikasa, NTC, Vibromax, Wacker Neuson, Weber, Zitrek и др.) производителей, представленные на официальных сайтах компаний, а также на сайтах их дилеров. Для структурирования и анализа данных использовалась программа Microsoft Excel.

В статистическом анализе рассматривались 644 модели нереверсивных и 484 модели реверсивных виброплит. Из этих моделей 55 произведены в СНГ (Россия, Беларусь), 468 – в КНР и 605 – в других странах (Великобритания, Германия, Израиль, Испания, Италия, США, Франция, Чехия, Швейцария, Швеция, Южная Корея, Япония).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основными техническими характеристиками вибрационных плит, определяющими их силовое воздействие на уплотняемый грунт,

являются: масса M (кг), вынуждающая сила P (кН) и частота колебаний f (Гц).

Кроме абсолютного значения вынуждающей силы P , при описании характера работы виброплит полезно использовать относительную вынуждающую силу, которая определяется как отношение вынуждающей силы P к весу виброплиты Q , т.е. P/Q .

Еще одной важной характеристикой грунтоуплотняющих машин является мощность двигателя, поскольку этот показатель влияет на текущие затраты на эксплуатацию оборудования, а также на преодолеваемый уклон.

Ширина опорной поверхности, скорость движения, глубина уплотнения, вид грунта и количество проходов, необходимых для достижения требуемой плотности уплотняемого материала также влияют на производительность виброплиты. Длина опорной поверхности влияет на производительность с нескольких сторон: увеличение длины повышает количество циклов приложения нагрузки к одной точке грунта за один проход, но при этом снижает величину контактных напряжений. Увеличение ширины опорной поверхности также приводит к уменьшению контактных напряжений, но позволяет увеличить ширину полосы уплотнения. Помимо величины контактных напряжений площадь опорной поверхности влияет и на глубину уплотнения².

Нужно отметить, что ширина опорной поверхности виброплиты соответствует ширине основания B , тогда как длина опорной поверхности L отличается от длины основания D (рисунок 1). Это связано с тем, что носок и задник основания изогнуты в профиле (см. рисунок 1).

Для рассмотренных моделей виброплит отношение длины основания к длине опорной поверхности находится в диапазоне $D/L=0,39...0,71$. Причем для реверсивных виброплит это соотношение составляет $D/L=0,39...0,45$, а для нереверсивных – $D/L=0,5...0,71$. Такая разница связана с тем, что для реверсивного движения требуется больший подъем задника, в результате чего увеличивается габаритная длина основания.

² Хархута Н.Я., Андрейченко Ю.Я. Выбор основных параметров виброплит. Строительные и дорожные машины. 1968. №4.

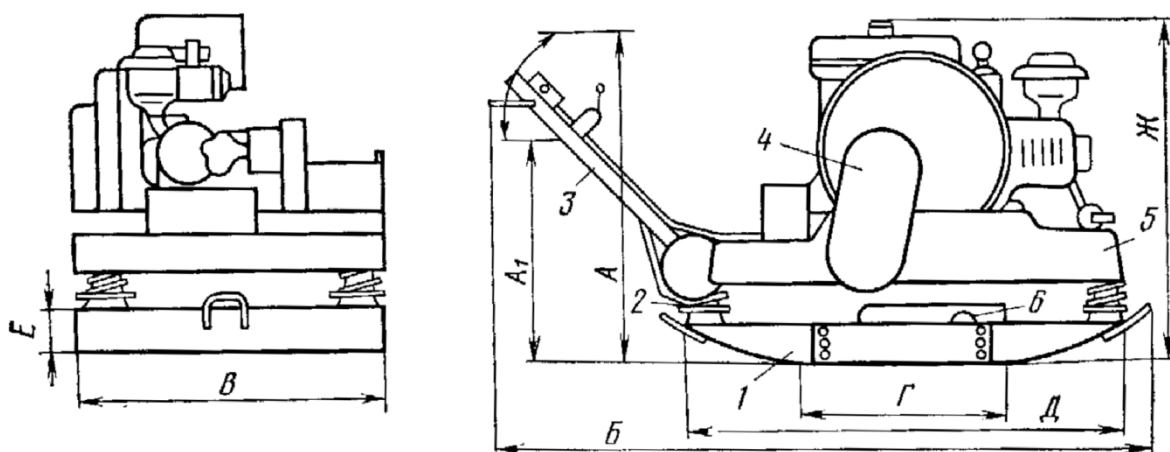


Рисунок 1 – Конструктивная схема и основные размеры виброплиты³:
 1 – основание виброплиты; 2 – амортизаторы; 3 – рукоять; 4 – двигатель; 5 – верхняя платформа;
 6 – вибровозбудитель; А – высота рукояти; Б – габаритная длина; В – ширина основания;
 Г – длина опорной поверхности; Д – длина основания; Е – высота основания; Ж – габаритная высота
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Structural scheme and main dimensions of vibratory plate compactor³:
 1 – base plate; 2 – shock absorbers; 3 – handle; 4 – engine; 5 – upper platform; 6 – vibration exciter; А – handle height;
 Б – overall length; В – base plate width; Г – length of the contact surface; Д – base plate length;
 Е – base plate height; Ж – overall height
 Source: compiled by the authors.

На рисунках 2, 3, 4, 5, 6, 7 представлены графики, демонстрирующие взаимосвязь массы виброплиты (M , кг) с вынуждающей силой (P , кН) (см. рисунок 2), частотой колебаний (f , Гц) (см. рисунок 3), мощностью двигателя (N , кВт) (см. рисунок 4), шириной опорной

поверхности (B , мм) (см. рисунок 5), длиной опорной поверхности (D , мм) (см. рисунок 6) и относительной вынуждающей силой P/Q (см. рисунок 7). Диапазоны изменения значений указанных параметров приведены в таблице 1.

Таблица 1
 Диапазоны изменения значений основных параметров нереверсивных и реверсивных виброплит
 Источник: составлено авторами.

Table 1
 Value ranges for basic parameters of forward and reversible plate compactors
 Source: compiled by the authors.

Параметр	Тип виброплиты	
	Нереверсивные	Реверсивные
Масса плиты M , кг	32...1170	
	32...160	54...1170
Вынуждающая сила P , кН	3,25...130	
	3,25...30	8,2...130
Частота колебаний f , Гц	30,5...126	
	47,5...126	30,5...117
Мощность двигателя N , кВт	0,25...21	
	0,25...6,3	1,8...21

³ Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1975. 288 с.

Параметр	Тип виброплиты	
	Нереверсивные	Реверсивные
Ширина основания В, мм	290...1202	
	290...610	310...1202
Длина основания Д, мм	300...800	
	300...800	430...750
Относительная вынуждающая сила P/Q	5,1...42,18	
	5,1...33,24	7,66...42,18

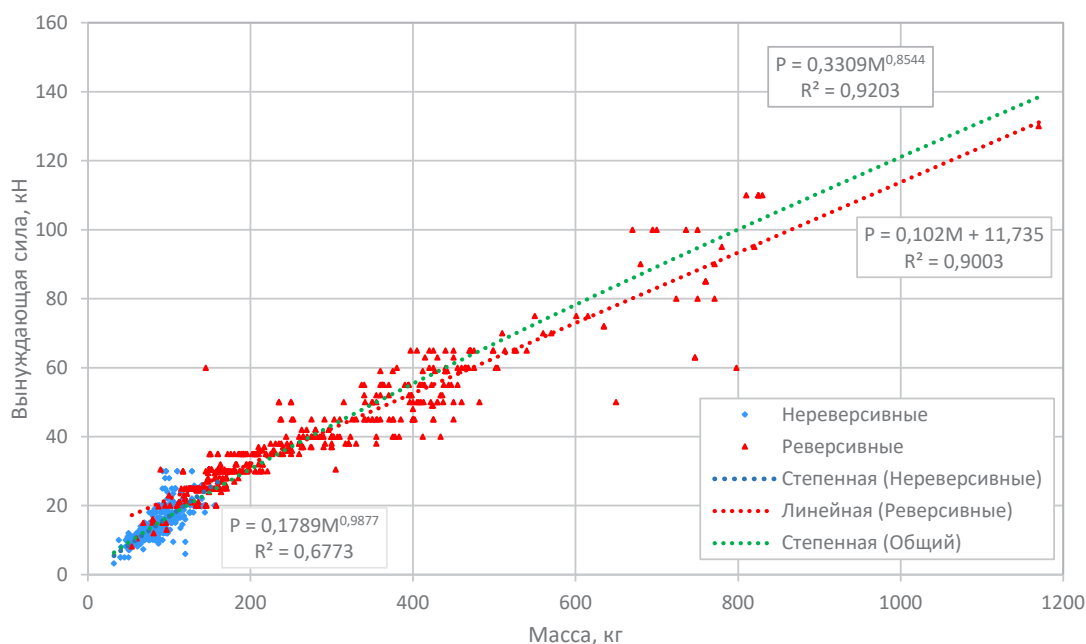


Рисунок 2 – Взаимосвязь массы (M , кг) и вынуждающей силы (P , кН) реверсивных и нереверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Correlation between mass (M , kg) and driving force (P , kN) of reversible and forward plate compactors
Source: compiled by the authors.

Из данных, представленных на рисунках 4, 5, 6, 7, 8, 9, следует, что нереверсивные виброплиты занимают весьма ограниченный диапазон масс – от 32 до 160 кг. Реверсивные виброплиты занимают диапазон масс от 54 до 1170 кг, что почти полностью перекрывает диапазон масс нереверсивных моделей.

Вынуждающая сила виброплит обоих типов возрастает с увеличением их массы (см. рисунок 2). Общая для обоих типов виброплит линия регрессии имеет степенную зависимость и достаточно высокий коэффициент детерминации (таблица 2).

Для нереверсивных виброплит выраженной зависимости частоты колебаний вибровозбудителя от массы не наблюдается (см. рисунок 3). Что касается общего диапазона значений реверсивных и нереверсивных виброплит, то здесь можно отметить, что с увеличением массы виброплиты частота колебаний вибровозбудителя снижается. Таким образом, для реверсивных виброплит в целом характерны более низкие частоты колебаний, чем для нереверсивных моделей.

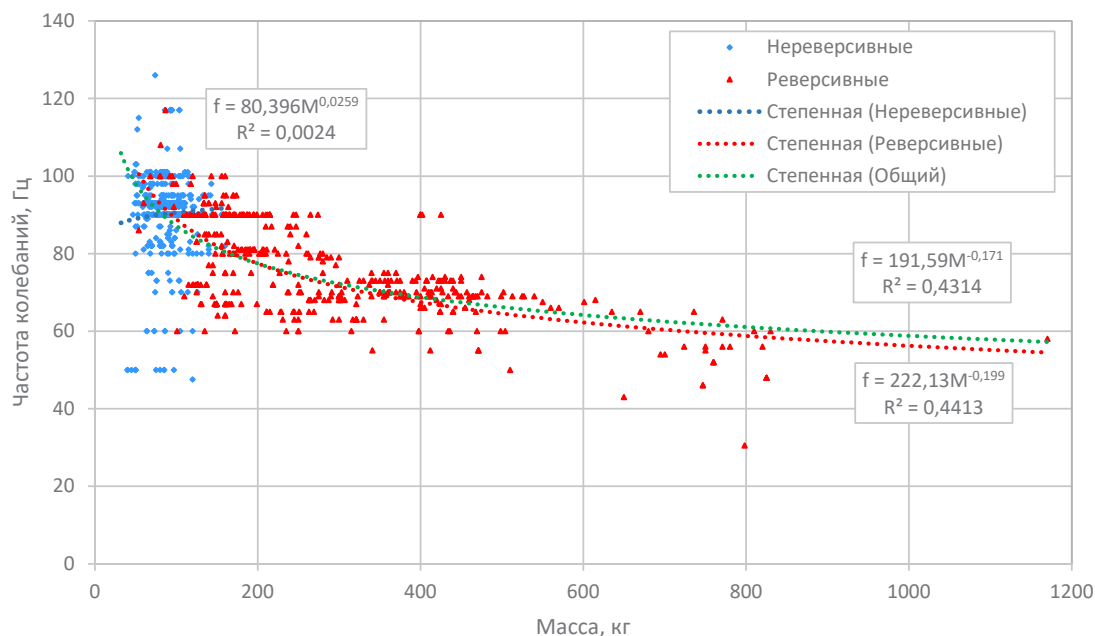


Рисунок 3 – Взаимосвязь массы (M , кг) и частоты колебаний (f , Гц) реверсивных и неревверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Correlation between mass (M , kg) and oscillation frequency (f , Hz) of reversible and forward plate compactors
Source: compiled by the authors.

Мощность двигателя реверсивных и неревверсивных виброплит возрастает с увеличением их массы (см. рисунок 4). При этом большинство неревверсивных виброплит и зна-

чительная часть реверсивных моделей имеют мощность в диапазоне от 3 до 5 кВт, который соответствует наиболее распространенным моделям бензиновых и дизельных двигателей.

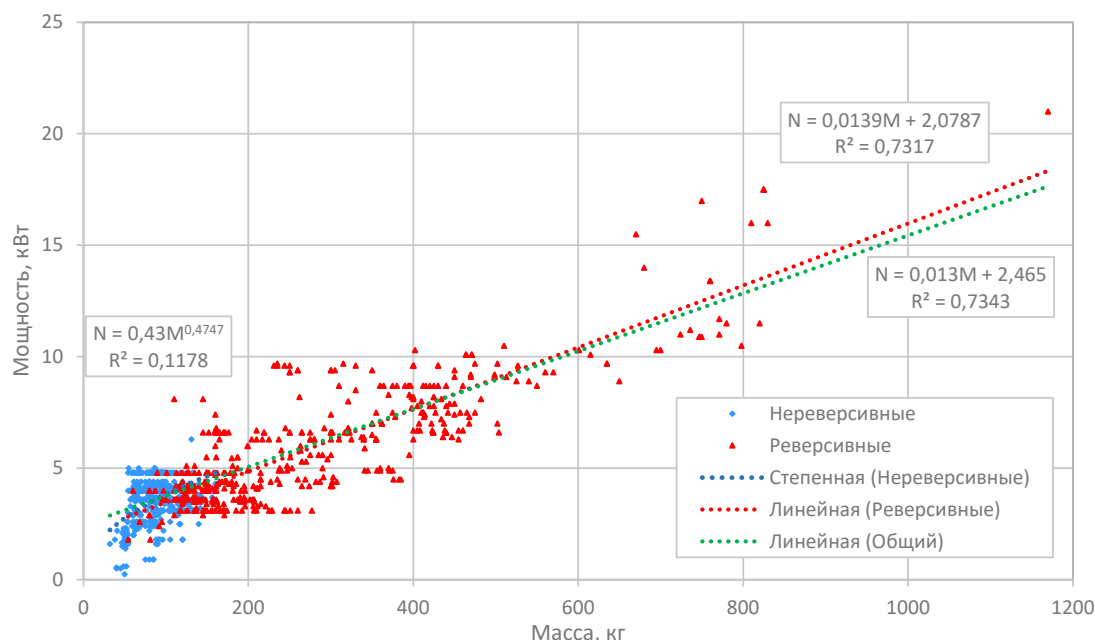


Рисунок 4 – Взаимосвязь массы (M , кг) и мощности (N , кВт) реверсивных и неревверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Correlation between mass (M , kg) and engine power (N , kW) of reversible and forward plate compactors
Source: compiled by the authors.

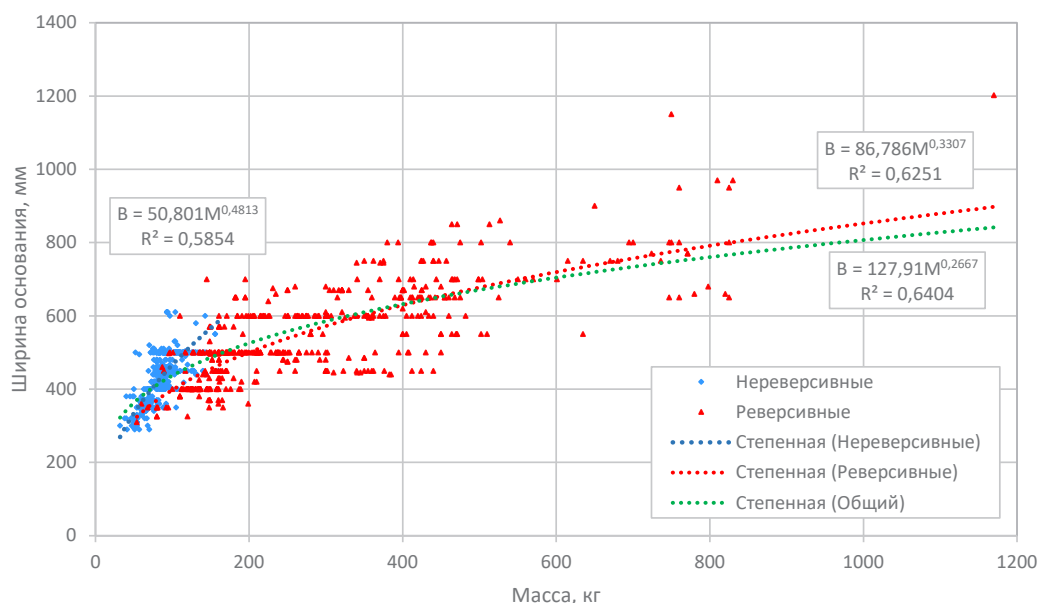


Рисунок 5 – Взаимосвязь массы (M , кг) и ширины основания (B , мм) реверсивных и неререверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Correlation between mass (M , kg) and base plate width (B , mm) of reversible and forward plate compactors
Source: compiled by the authors.

Ширина основания реверсивных и неререверсивных виброплит возрастает с увеличением массы (см. рисунок 5). Значительная часть виброплит обоих типов имеет ширину основания в 400 или 500 мм. Для реверсивных моделей также характерно значение в 600 мм.

Длина основания также возрастает с увеличением массы виброплит (см. рисунок 6). При этом для легких и сверхлегких виброплит (как реверсивных, так и неререверсивных) наблюдается значительный (в 2 и более раза) разброс значений длины основания при сопоставимых показателях массы.

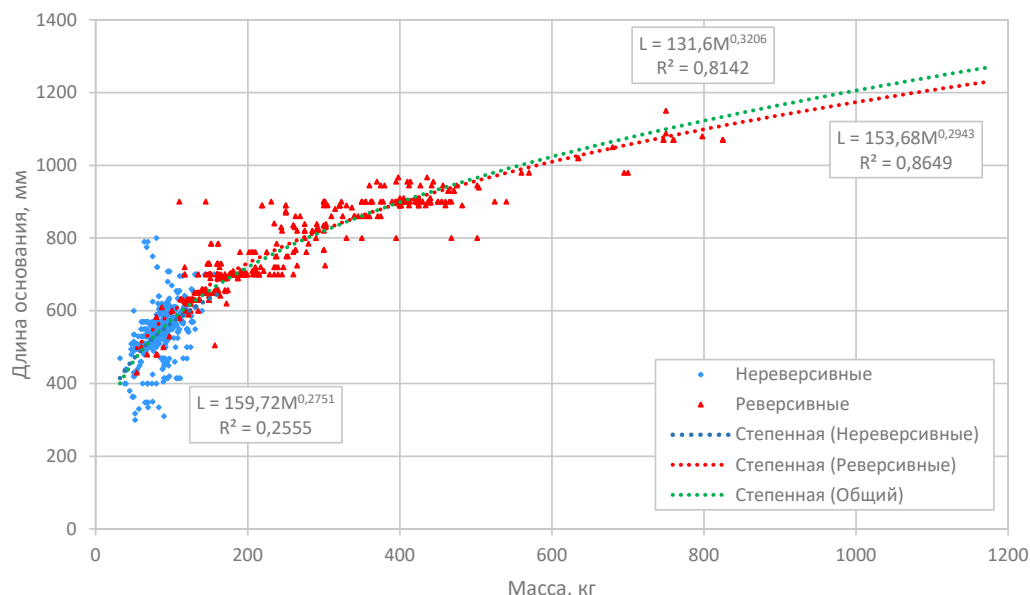


Рисунок 6 – Взаимосвязь массы (M , кг) и длины основания (B , мм) реверсивных и неререверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Correlation of mass (M , kg) and base plate length (B , mm) of reversible and forward plate compactors
Source: compiled by the authors.

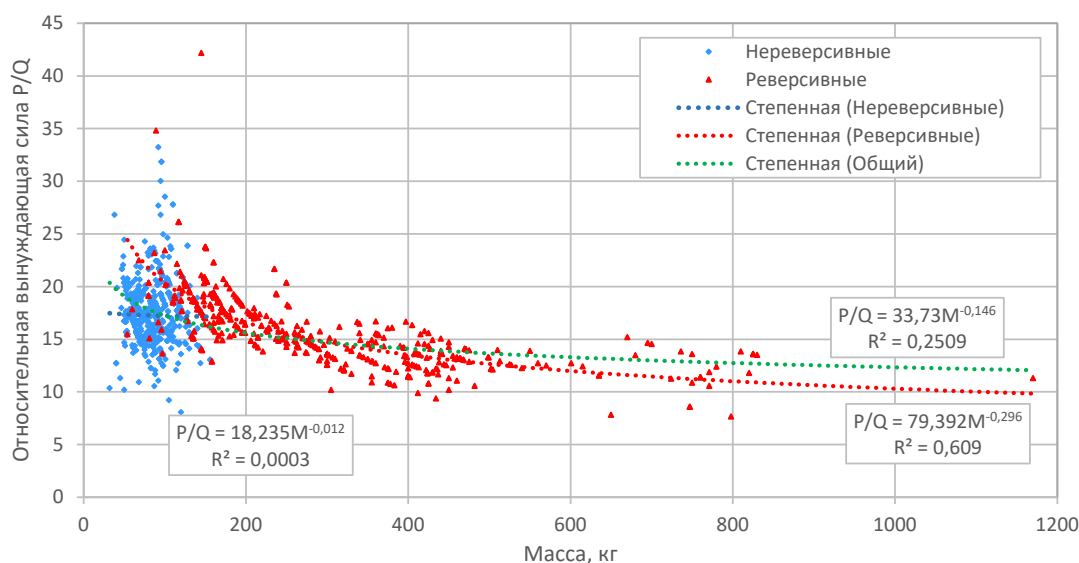


Рисунок 7 – Взаимосвязь массы (M , кг) и относительной вынуждающей силы реверсивных и неревверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Correlation between mass (M , kg) and relative driving force of reversible and forward plate compactors
Source: compiled by the authors.

Относительная вынуждающая сила неревверсивных виброплит не имеет выраженной зависимости от массы, в то время как относительная вынуждающая сила реверсивных виброплит снижается с увеличением массы. На рисунке 7 видно, что расположение точек (за исключением отдельных моделей) уклады-

вается в общую закономерность, при которой большему значению массы виброплиты соответствует меньшее значение относительной вынуждающей силы.

Полученные уравнения регрессии и коэффициенты детерминации приведены в таблице 2.

Таблица 2
Уравнения регрессии для различных типов виброплит
Источник: составлено авторами.

Table 2
Regression equations for different types of plate compactors
Source: compiled by the authors.

Тип виброплиты	Параметр	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации, R^2
Неревверсивные	Вынуждающая сила (P , кН)	$P = 0,1789M^{0,9877}$	0,6773
	Частота колебаний (f , Гц)	$f = 80,396M^{0,0259}$	0,0024
	Мощность двигателя (N , кВт)	$N = 0,43M^{0,4747}$	0,1178
	Ширина основания (B , мм)	$B = 50,801M^{0,4813}$	0,5854
	Длина основания (L , мм)	$L = 159,72M^{0,2751}$	0,2555
	Относительная вынуждающая сила (P/Q)	$P/Q = 18,235M^{-0,012}$	0,0003
Реверсивные	Вынуждающая сила (P , кН)	$P = 0,7788M^{0,7045}$	0,8987
	Частота колебаний (f , Гц)	$f = 222,13M^{-0,199}$	0,4413
	Мощность двигателя (N , кВт)	$N = 0,0139M + 2,0787$	0,7317
	Ширина основания (B , мм)	$B = 87,717M^{0,3291}$	0,6143
	Длина основания (L , мм)	$L = 153,68M^{0,2943}$	0,8649
	Относительная вынуждающая сила (P/Q)	$P/Q = 79,392M^{-0,296}$	0,6096

Тип виброплиты	Параметр	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации, R^2
Общий	Вынуждающая сила (P, кН)	$P = 0,3309M^{0,8544}$	0,9203
	Частота колебаний (f, Гц)	$f = 191,59M^{-0,171}$	0,4314
	Мощность двигателя (N, кВт)	$N = 0,013M + 2,465$	0,7343
	Ширина основания (B, мм)	$B = 127,91M^{0,2667}$	0,6404
	Длина основания (L, мм)	$L = 131,6M^{0,3206}$	0,8142
	Относительная вынуждающая сила (P/Q)	$P/Q = 33,73M^{-0,146}$	0,2509

ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на большое разнообразие выпускаемых моделей неререверсивных виброплит, все они сосредоточены в достаточно узком диапазоне масс от 32 до 160 кг. Диапазон значений масс реверсивных виброплит гораздо более широк и находится в пределах 54...1170 кг, почти полностью перекрывая диапазон значений масс неререверсивных моделей.

Полученные регрессионные зависимости вынуждающей силы, мощности двигателя, ширины и длины основания для реверсивных и неререверсивных виброплит имеют схожий характер в соответствующих диапазонах масс.

В то же время диапазоны изменения значений частоты колебаний вибровозбудителя для неререверсивных и реверсивных виброплит существенно различаются в соответствующих диапазонах масс. При этом для неререверсивных виброплит наблюдается значительный (в 2,5 раза) разброс значений частоты колебаний для моделей аналогичной массы и очень низкий коэффициент детерминации.

Диапазон значений относительной вынуждающей силы реверсивных и неререверсивных виброплит несколько различаются в соответствующих диапазонах масс. Для реверсивных виброплит разброс показателя относительной вынуждающей силы превышает четырёхкратные значения.

Высокие ($R^2=0,75...0,9$) и очень высокие ($R^2>0,9$) значения коэффициента детерминации наблюдаются только для регрессионных зависимостей вынуждающей силы и длины основания от массы (за исключением соответствующих зависимостей для неререверсивных виброплит).

Полученные регрессионные зависимости длины основания от массы виброплит, хотя и отражают общие закономерности, сами по себе малоприспособлены для дальнейших исследований, поскольку длина основания может существенно отличаться от длины опорной поверхности.

Неререверсивные и реверсивные виброплиты имеют разный механизм передвижения и взаимодействия основания с грунтом. Отсюда можно сделать предположение о различии в значениях амплитудных контактных напряжений и их распределении по опорной поверхности реверсивных и неререверсивных виброплит. Данный вопрос требует отдельного более подробного исследования.

Очень высокие значения относительной вынуждающей силы P/Q (большинство моделей характеризуются значением $P/Q = 10...25$) должны приводить к ярко выраженному отрывному характеру колебаний виброплиты на грунте, сопровождающемуся малой продолжительностью времени контакта с грунтом и, как следствие, низкой уплотняющей способностью, плохой управляемостью и высокими динамическими нагрузками на элементы виброплиты. Для увеличения продолжительности взаимодействия виброплиты с грунтом необходимо ограничение размаха колебаний основания виброплиты. Если рассматривать виброплиту как трёхмассную колебательную систему^{4,5}, рабочий орган (основание виброплиты) совершает вертикальные колебания между двумя подвижными ограничителями. В качестве верхнего ограничителя выступает рама виброплиты с установленным на ней двигателем. Верхний ограничитель (рама с двигателем) связан с рабочим органом упру-

⁴ Susante P., Mooney M. Capturing Nonlinear Vibratory Roller Compactor Behavior through Lumped Parameter Modeling // Journal of Engineering Mechanics. 1996. С. 684–693.

⁵ Тюремнов И.С., Морев А.С., Фурманов Д.В. К вопросу обоснования значения присоединённой массы грунта при реологическом моделировании процесса уплотнения грунта вибрационным катком // Проблемы машиноведения: материалы III Международной научно-технической конференции, Омск, 23–24 апреля 2019 года. Том Часть I. Омск: Омский государственный технический университет, 2019. С. 215–223. EDN MVJSLI.

го-вязкими связями (амортизаторами). В качестве нижнего ограничителя выступает деформируемый грунт.

Таким образом, при очень высоких значениях относительной вынуждающей силы, генерируемой вибровозбудителем рабочего органа, ограничение размаха его вертикальных колебаний при известных свойствах нижнего ограничителя (грунта) возможно за счет:

- увеличения массы верхнего ограничителя (рамы, выступающей в роли «пригруза»);
- оптимизации характеристик амортизаторов рамы;
- увеличения массы рабочего органа (т.е. увеличения инерционной составляющей сопротивления его перемещению);
- увеличения частоты колебаний рабочего органа (также приводящей к увеличению инерционной составляющей сопротивления перемещению рабочего органа, только за счет возрастания ускорения, а не массы, принимающих участие в формировании силы инерционного сопротивления).

Это объясняет наблюдаемое для всех типов виброплит (а также и для других типов грунтоуплотняющих машин ударно-вибрационного действия [25]) увеличение частоты колебаний при уменьшении массы виброплит. При уменьшении массы виброплиты одновременно уменьшается масса рабочего органа и масса рамы («пригруза»), что должно приводить к уменьшению инерционных сопротивлений движению основания виброплиты, увеличению размаха вертикальных колебаний рабочего органа и ухудшению уплотняющей способности и управляемости виброплиты. Увеличение же частоты колебаний приводит к увеличению инерционного сопротивления передвижению рабочего органа в вертикальном направлении и выступает в роли ограничителя размаха вертикальных колебаний виброплиты. Вышеизложенные соображения позволяют объяснить наблюдаемые при анализе технических характеристик виброплит закономерности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при выполнении дальнейших исследований желательно разделять нереверсивные и реверсивные виброплиты, поскольку они по-разному взаимодействуют с грунтом, находятся в различных диапазонах масс и имеют несколько различные диапазоны значений относительной вынуждающей силы.

Для большинства построенных регрессионных зависимостей наблюдаются средние и

низкие значения коэффициента детерминации. Это может говорить о том, что у производителей отсутствуют методики, позволяющие обосновать выбор технических характеристик реверсивных и нереверсивных виброплит.

Для большинства моделей виброплит значение относительной вынуждающей силы не опускается ниже 8 во всем диапазоне масс, что существенно превышает критические значения P/Q , установленные Н.Я. Хархутой. Это говорит о том, что все рассмотренные виброплиты реализуют ярко выраженный отрывной характер взаимодействия с грунтом. Причем в промежуток времени между ударами опорной плиты о грунт дебалансный вал может совершать 2 и более оборотов. Данный факт должен обязательно учитываться при разработке математической модели взаимодействия виброплиты с грунтом.

С учетом очень высоких значений относительной вынуждающей силы и отрывного характера взаимодействия виброплиты с грунтом открываются возможности для улучшения уплотняющих возможностей виброплит за счет оптимизации соотношения масс рамы и основания виброплиты, а также обоснования характеристик амортизаторов с целью обеспечения требуемой для эффективного уплотнения грунта продолжительности действия контактных напряжений в рамках разрабатываемой методики [26].

Полученные регрессионные зависимости позволяют учесть существующий опыт разработки реверсивных и нереверсивных виброплит, и могут быть применены, в том числе для обоснования ширины основания, мощности двигателя и вынуждающей силы вибровозбудителя.

Технические характеристики реверсивных и нереверсивных виброплит частично связаны с их конструктивными особенностями (например, механизмом регулирования скорости и направления движения), что требует отдельного анализа. Также целесообразно проведение отдельного исследования взаимосвязи технических характеристик виброплит с их технологическими возможностями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тюремнов И.С., Новичихин А.А. Уплотнение грунтов вибрационными плитами: монография. Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2018. 143 с.
2. Кузьмичев В.А., Кузьмичев В.Д. Исследование рабочих параметров самоходных виброплит, применяемых при уплотнении грунтов // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 3(28): 66–71.

3. Кузьмичев В.Д. Математическая модель виброплиты // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 3(35): 65–68.
4. Massarsch K. Rainer, Wersäll Carl. Vibratory plate resonance compaction. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering. 2019. 173. 1-30. <https://doi.org/10.1680/jgeen.19.00169>
5. Sawant Rohan. Advance Equipment for Compaction on Site.2021 <https://doi.org/10.35291/2454-9150.2021.0099>
6. Рябов Г.К., Леонтьева В.С., Федосеев Ю.В. О механизме передвижения бесколесной виброплиты // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 3(96): 143.
7. Башкарев А.Я., Мусияко Д.В., Пешков В.С. Вибрационное перемещение поверхностного уплотнителя // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 1(166): 175–178.
8. Кузьмичев В.Д. Разработка динамической модели самоходной нереверсивной виброплиты // Механика XXI века. 2012. № 11:39–45.
9. Czech Krzysztof, Gosk, Wojciech. The Impact of Work of Hydraulic Compactor Type V8 from MTS on the Level of Vibrations Propagated to the Environment. Procedia Engineering. 2017. 189:478-483. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.077>
10. Anderegg Roland, Kaufmann, Kuno. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors. GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age. 2006. [https://doi.org/10.1061/40803\(187\)41](https://doi.org/10.1061/40803(187)41)
11. Sivagnanasuntharam Suthakaran, Sounthararajah, Arooran, Kodikara, Jayantha. A New Approach to Maximising the Benefits of Current Intelligent Compaction Technology for Asphalt Materials. Construction and Building Materials.2023. 393. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132031>
12. Ranasinghe Rajitha, Sounthararajah Arooran, Kodikara Jayantha. An Intelligent Compaction Analyzer: A Versatile Platform for Real-Time Recording, Monitoring, and Analyzing of Road Material Compaction. Sensors. 2023: 23. 7507. <https://doi.org/10.3390/s23177507>
13. Owusu-Nimo Frederick, Peprah-Manu Daniel, Ayeh Felix, Charkley Frederick, Ampadu Samuel. Compaction Verification of Lateritic Soil Using Electrical Resistivity: A Laboratory Study. Geotechnical and Geological Engineering.2023; 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02598-z>
14. Hassan Asem, Nadhum Gehan Geotechnical-Electrical Evaluation of Soil Compaction Parameters, South of Baqubah City. Iraqi Geological Journal. 2023; 56. 144-155. <https://doi.org/10.46717/igj.56.1D.12ms-2023-4-21>
15. Yao Yangping, Song ErBo. Intelligent compaction methods and quality control. Smart Construction and Sustainable Cities.2023; 1. <https://doi.org/10.1007/s44268-023-00004-4>
16. Aodah Haider, Chandra Satish. Intelligent Compaction Technology.2018;
17. Chen Chengyong, Chang Fagang, Li Li, Dou Wenqiang, Xu Changjing. Optimization of intelligent compaction based on finite element simulation and nonlinear multiple regression. Electronic Research Archive. 2023; 31. 2775-2792. <https://doi.org/10.3934/era.2023140>
18. Xu Tianyu, Zhou Zhijun, Yan Ruipeng, Zhang Zhipeng, Zhu Linxuan, Chen Chaoran, Fu Xu, Liu Tong. Real-Time Monitoring Method for Layered Compaction Quality of Loess Subgrade Based on Hydraulic Compactor Reinforcement. Sensors. 2020;20. 4288. <https://doi.org/10.3390/s20154288>
19. Zhang Zhipeng, Zhou Zhijun, Guo Tao, Xu Tianyu, Zhu Linxuan, Fu Xu, Chen Chaoran, Liu Tong. A measuring method for layered compactness of loess subgrade based on hydraulic compaction. Measurement Science and Technology. 2021; 32. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abd7ab>
20. Hou Ziyi, Dang Xiao, Yuan Yezhen, Tian Bo, Li Sili. Research on Intelligent Compaction Technology of Subgrade Based on Regression Analysis. Advances in Materials Science and Engineering. 2021. 1-9. <https://doi.org/10.1155/2021/4100896>
21. Мусияко Д.В., Расулов Р.А. Самоходная вибраторная плита с вальцем // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 4(43):73–80.
22. Anderegg Roland Automatische Verdichtungskontrolle: eine Anwendung der nichtlinearen Schwingungstheorie. 2018;
23. Афанасьев М.А., Тюремнов И.С. Статистический анализ технических характеристик самоходных нереверсивных виброплит с различными типами двигателей // Вестник СибАДИ. 2024; 21(4): 488–501. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-488-501>. EDN: BRYOWT.
24. Афанасьев М.А., Тюремнов И.С. Статистический анализ технических характеристик самоходных реверсивных виброплит с различными типами двигателей // Вестник СибАДИ. 2024; 21(6): 814–825. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-814-825>. EDN: RBLXHW.
25. Тюремнов И.С. Анализ технических характеристик различных типов ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6(94):706–716. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>. EDN IGOKXE.
26. Тюремнов И.С. О разработке методологии прогнозирования технологических возможностей ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9:689–692. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-9-689-690>

REFERENCES

1. Tyuremnov I.S., Novichikhin A.A. Soil compaction by vibrating plates: monograph [Electronic resource]. Yaroslavl. Izdat. dom YaSTU, 2018: 143. (in Russ.)

2. Kuz'michev V.A., Kuz'michev V.D. Issledovanie rabochikh parametrov samokhodnykh vibroplit, primenyaemykh pri uplotnenii gruntov. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2011; № 3(28): 66-71.
3. Kuz'michev V.D. Matematicheskaya model' vibroplity // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye*. 2012. № 3(35):65-68.
4. Massarsch K. Rainer, Wersäll Carl. Vibratory plate resonance compaction. Proceedings of the Institution of Civil Engineers . *Geotechnical Engineering*. 2019; 173. 1-30. <https://doi.org/10.1680/jgeen.19.00169>
5. Sawant Rohan Advance Equipment for Compaction on Site. 2021; <https://doi.org/10.35291/2454-9150.2021.0099>
6. Ryabov G.K., Leont'eva V.S., Fedoseev YU.V. O mekhanizme peredvizheniya beskolesnoy vibroplity. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2012; № 3(96): 143.
7. Bashkarev A.YA., Musiyako D.V., Peshkov V.S. Vibratsionnoe peremeshchenie poverkhnostnogo uplotnitelya. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013; № 1(166):175-178.
8. Kuz'michev V.D. Razrabotka dinamicheskoy modeli samokhodnoy nereversivnoy vibroplity. *Mekhanika XXI veku*. 2012. № 11:S. 39-45.
9. Czech Krzysztof, Gosk Wojciech. The Impact of Work of Hydraulic Compactor Type V8 from MTS on the Level of Vibrations Propagated to the Environment. *Procedia Engineering*. 2017; 189. 478-483. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.077>
10. Anderegg Roland, Kaufmann Kuno. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors. *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006. [https://doi.org/10.1061/40803\(187\)41](https://doi.org/10.1061/40803(187)41)
11. Sivagnanasuntharam Suthakaran, Sounthararajah Arooran, Kodikara Jayantha. A New Approach to Maximising the Benefits of Current Intelligent Compaction Technology for Asphalt Materials. *Construction and Building Materials*. 2023; 393. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132031>
12. Ranasinghe Rajitha, Sounthararajah Arooran, Kodikara Jayantha. An Intelligent Compaction Analyzer: A Versatile Platform for Real-Time Recording, Monitoring, and Analyzing of Road Material Compaction. *Sensors*. 2023; 23. 7507. <https://doi.org/10.3390/s23177507>
13. Owusu-Nimo Frederick, Peprah-Manu Daniel, Ayeh Felix, Charkley Frederick, Ampadu Samuel. Compaction Verification of Lateritic Soil Using Electrical Resistivity: A Laboratory Study. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2023;1-14. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02598-z>
14. Hassan Asem, Nadhum Gehan. Geotechnical-Electrical Evaluation of Soil Compaction Parameters, South of Baqubah City. *Iraqi Geological Journal*. 2023; 56. 144-155. <https://doi.org/10.46717/igj.56.1D.12ms-2023-4-21>
15. Yao Yangping, Song Er.Bo. Intelligent compaction methods and quality control. *Smart Construction and Sustainable Cities*.2023; 1. <https://doi.org/10.1007/s44268-023-00004-4>
16. Aodah Haider, Chandra Satish. *Intelligent Compaction Technology*.2018;
17. Chen Chengyong, Chang Fagang, Li Li, Dou Wenqiang, Xu Changjing. Optimization of intelligent compaction based on finite element simulation and nonlinear multiple regression. *Electronic Research Archive*. 2023; 31. 2775-2792. <https://doi.org/10.3934/era.2023140>
18. Xu Tianyu, Zhou Zhijun, Yan Ruipeng, Zhang Zhipeng, Zhu Linxuan, Chen Chaoran, Fu Xu, Liu Tong. Real-Time Monitoring Method for Layered Compaction Quality of Loess Subgrade Based on Hydraulic Compactor Reinforcement. *Sensors*. 2020;20. 4288. <https://doi.org/10.3390/s20154288>
19. Zhang Zhipeng, Zhou Zhijun, Guo Tao, Xu Tianyu, Zhu Linxuan, Fu Xu, Chen Chaoran, Liu Tong. A measuring method for layered compactness of loess subgrade based on hydraulic compaction. *Measurement Science and Technology*.2021; 32. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abd7ab>
20. Hou Ziyi, Dang Xiao, Yuan Yezhen, Tian Bo, Li Sili. Research on Intelligent Compaction Technology of Subgrade Based on Regression Analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021. 1-9. <https://doi.org/10.1155/2021/4100896>
21. Musiyako D.V., Rasulov R.A. Samokhodnaya vibratsionnaya plita s val'tsem. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016; № 4(43): 73-80.
22. Anderegg Roland Automatische Verdichtungskontrolle: eine Anwendung der nichtlinearen Schwingungstheorie. 2018;
23. Afanasev M.A., Tyuremnov I.S. Statistical analysis of technical specifications of forward plate compactors with different types of engines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(4): 488–501. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-488-501>. EDN: BRYOWT.
24. Afanasev M.A., Tyuremnov I.S. Statistical analysis of technical specifications of self-propelled reversible plate compactors with different types of engines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(6): 814–825. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-814-825>. EDN: RBLXHW.
25. Tyuremnov I.S. Analiz tekhnicheskikh kharakteristik razlichnykh tipov udarno-vibratsionnykh gruntuoplotnyayushchikh mashin. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*. 2023; T. 20, № 6(94): 706-716. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>. EDN IGOKXE.
26. Tyuremnov I.S. O razrabotke metodologii prognozirovaniya tekhnologicheskikh vozmozhnostey udarno-vibratsionnykh gruntuoplotnyayushchikh mashin. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2024; № 9:689-692. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-9-689-690>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Афанасьев М.А. Сбор информации технических характеристиках самоходных виброплит, обработка данных, подготовка текста статьи.

Тюремнов И.С. Общая организация работы, подготовка текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Afanasev M.A. Collecting data on technical specifications of self-propelled plate compactors, data processing, writing the manuscript.

Tyuremnov I.S. Research design and general organization, writing the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Афанасьев Михаил Александрович – аспирант кафедры «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88).

ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-5095-2557>,

SPIN-код: 8256-8500,

e-mail: afanasiev.m.a2016@yandex.ru

Тюремнов Иван Сергеевич – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2261-4153>,

SPIN-код: 9976-0728,

e-mail: tyuremnovis@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Afanasev Mikhail A. – Postgraduate student of the Construction and Road Machines Department, Yaroslavl State Technical University (88, Moskovskiy Proezd, Yaroslavl, 150023).

ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-5095-2557>,

SPIN-code: 8256-8500,

e-mail: afanasiev.m.a2016@yandex.ru

Tyuremnov Ivan S. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Construction and Road Machines Department, (88, Moskovsky Prospekt, Yaroslavl, 150023).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2261-4153>,

SPIN-code: 9976-0728,

e-mail: tyuremnovis@yandex.ru

Научная статья

УДК 67.05

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-388-401>

EDN: QBQCEG



ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ СМЕСИТЕЛЬНОЙ КАМЕРЫ РЕСАЙКЛЕРА

В.А. Зорин, Нгуен Куанг Хай ✉*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
г. Москва, Россия*✉ ответственный автор
nguyenquanghai2796@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Технология холодного ресайклинга является эффективным решением для ремонта дорожного покрытия. Однако детали рабочего оборудования смесительной камеры ресайклера одновременно подвергаются значительному механическому износу, ударным нагрузкам от переработанного асфальтобетона и агрессивным химическим воздействиям, связанным с битумно-водными эмульсиями. Совокупное влияние этих факторов приводит к сложным механизмам разрушения, которые значительно сокращают срок службы рабочего оборудования.

Материалы и методы. Настоящее исследование сосредоточено на оценке и разработке оптимизированных систем полимерно-композитных покрытий для деталей смесительного оборудования ресайклеров. Предлагаемый подход основан на выборе матричных смол, включая эпоксидные и полиуретановые системы, и их сочетании с многофункциональными наполнителями, включая твердые смазочные добавки, армирующие наполнители, а также нано- и микрофазные компоненты.

Результаты. При проведении исследований применяется методика многокритериальной оптимизации для достижения сбалансированного сочетания механических, физико-химических и эксплуатационных свойств, включая адгезионную прочность, баланс твердость–упругость, сопротивление истиранию, снижение трения, ударную прочность, химическую и термическую стабильность, а также практическую применимость и технологичность.

Обсуждение и выводы. Результаты показывают, что эпоксидные матрицы, армированные гибридными нано- микронаполнителями и дополненные твердыми смазочными добавками, существенно повышают срок службы покрытия, улучшают трибологические характеристики и снижают отслаивание покрытия и адгезию битумной смеси, сохраняя при этом разумную стоимость и технологичность. Кроме того, предложенная стратегия проектирования обеспечивает новый прикладной подход к разработке защитных покрытий для рабочего оборудования других промышленных отраслей, где требуется устойчивость к сочетанным абразивным, ударным и химически агрессивным воздействиям.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: холодный ресайклинг, полимерно-композитное покрытие, многофункциональные наполнители, трибологические характеристики, многокритериальная оптимизация

Статья поступила в редакцию 25.01.2026; одобрена после рецензирования 24.04.2026; принята к публикации 15.06.2026.

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: Зорин В.А., Нгуен Куанг Хай. Оптимизация структуры композитных покрытий для защиты рабочего оборудования смесительной камеры ресайклера // *Вестник СиБАДИ*. 2026. Т. 23, № 3. С. 388-401. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3>

© Зорин В.А., Нгуен Куанг Хай, 2026

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-388-401>

EDN: QBQCEG

OPTIMIZATION OF COMPOSITE COATINGS STRUCTURE TO PROTECT WORKING EQUIPMENT OF RECYCLER MIXING CHAMBER

Vladimir. A. Zorin, Quang Hai Nguyen ✉

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

✉ corresponding author

nguyenquanghai2796@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. Cold-in-Place Recycling (CIR) technology is an effective solution for pavement maintenance and rehabilitation. However, the mixing chamber of CIR equipment is simultaneously exposed to severe mechanical abrasion, impact loading from reclaimed asphalt pavement (RAP), and aggressive chemical environments associated with bitumen–water emulsions. These combined effects result in complex degradation mechanisms that significantly reduce the equipment's service life.

Materials and methods. This study focuses on the evaluation and development of optimized polymer–composite coating systems for CIR mixing chambers. The approach is based on selecting matrix resins, including epoxy and polyurethane/polyurea systems, and combining them with multifunctional fillers, such as solid lubricants, reinforcing agents, and nano- and micro-phase components.

Results. A multicriteria optimization methodology was applied to achieve a balanced combination of mechanical, physico-chemical, and operational properties, including adhesion strength, hardness, elasticity balance, wear resistance, friction reduction, impact toughness, chemical and thermal stability, and practical applicability and manufacturability.

Discussion and conclusions. The results indicate that epoxy matrices reinforced with hybrid nano-micro fillers and supplemented with solid lubricants substantially enhance coating service life, improve tribological performance, and reduce both coating delamination and RAP bitumen adhesion, while maintaining reasonable cost and processability. Furthermore, the proposed design strategy provides a novel practical approach for developing protective coatings in other industrial sectors where resistance to abrasion, impacts, and chemically aggressive conditions is required.

KEYWORDS: cold-in-place recycling, polymer-composite coating, multifunctional fillers, tribological performance, multi-criteria optimization

The article was submitted: January 25, 2026; **approved after reviewing:** April 24, 2026; **accepted for publication:** June 15, 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: Zorin V. A., Nguyen Qu.H. Optimization of composite coatings structure to protect working equipment of recycler mixing chamber. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (3): 388-401. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3>

© Zorin Vladimir. A., Nguyen Quang Hai, 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Технология холодного ресайклинга получила широкое признание как эффективное решение при ремонте асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог благодаря способности снижать потребление первичных материалов, уменьшать выбросы и повышать экономическую и экологическую эффективность дорожных покрытий [1, 2, 3]. Многочисленные исследования показали, что **технология холодного ресайклинга** обеспечивает выполнение технических требований к покрытиям автомобильных дорог с низкой и средней интенсивностью движения, одновременно обладая значительными экономическими преимуществами и высоким уровнем устойчивости по сравнению с традиционными методами ремонта [2, 3].

В процессе эксплуатации смесительная камера оборудования ресайклера функционирует в сложных условиях, при которых одновременно реализуются механические и физико-химические воздействия. Асфальтобетонная смесь, содержащая крупнозернистые минеральные наполнители, хаотично перемещается внутри смесительной камеры, вызывая износ деталей смесительного оборудования ресайклеров в результате трения и ударного воздействия твердых частиц. Одновременно присутствие битумных эмульсий, воды и регенерирующих добавок формирует влажную среду, способствующую ускоренному разрушению поверхностных слоев материала деталей рабочего оборудования ресайклеров [4, 5]. Несмотря на то, что большинство соответствующих исследований выполнено на бетоносмесителях или аналогичном промышленном оборудовании, описанные механизмы изнашивания, ударного воздействия и адгезии являются физически аналогичными условиям работы смесительных камер ресайклеров, что позволяет рассматривать их в качестве обоснованной референтной основы.

Взаимодействие указанных механизмов приводит к повреждению металлических поверхностей деталей рабочего оборудования ресайклеров, включающих механический износ, адгезию материала и локальные физико-химические изменения. Многочисленные исследования показали, что интенсивная адгезия битумной смеси к рабочей поверхности не только увеличивает сопротивление процессу перемешивания и концентрацию напряжений, но и опосредованно ускоряет процессы изнашивания, что в конечном итоге приводит к снижению ресурса оборудования [4, 5].

Традиционные подходы к увеличению производительности и срока службы смесительных камер, такие как оптимизация процедур очистки, модификация геометрии рабочих элементов или выбор подложек с повышенной твердостью, обладают принципиальными ограничениями и нередко сопровождаются значительными затратами на техническое обслуживание. В этой связи функциональные покрытия, в частности полимерно-композиционные, рассматриваются как перспективное направление защиты металлических поверхностей деталей рабочего оборудования, эксплуатируемых в тяжелых условиях [6, 7].

С учетом характерных механизмов старения и повреждения деталей рабочего оборудования, наблюдаемых в смесительных камерах, а также результатов смежных исследований, полимерно-композиционные покрытия могут рассматриваться не только как технически обоснованное решение, но и как экономически и эксплуатационно-ремонтная целесообразная стратегия. Кроме того, данный подход открывает возможности для разработки устойчивых функциональных покрытий, способствующих повышению надежности, увеличению производительности и срока службы рабочего оборудования ресайклеров в условиях интенсивной эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проектирование полимерно-композитных покрытий деталей рабочего оборудования смесительной камеры ресайклера является сложной задачей инженерии материалов, требующей одновременного выполнения множества, часто противоречивых технических требований, возникающих из-за специфических условий переработки пенобитумной асфальтобетонной смеси в агрессивной механико-химической среде [1, 2, 3]. Покрытие должно не только обеспечивать высокую износостойкость рабочего оборудования против абразивных наполнителей, но и ограничивать адгезию переработанных асфальтовых смесей, обеспечивать прочное сцепление с металлической подложкой, сохранять вязкость при ударах и вибрациях и оставаться химически стабильным в эмульсиях и при длительном воздействии влаги [4, 5, 6, 7, 10].

Помимо функциональных характеристик, покрытие должно соответствовать критериям технологичности, эксплуатационной надежности и экономической эффективности, что имеет решающее значение для практического внедрения в промышленный дорожный ре-

сайклинг [2, 3]. Поэтому выбор системы «полимерная матрица–наполнитель» не может основываться на одном критерии, а должен рассматриваться в рамках системного многоцелевого оптимизационного подхода, позволяющего одновременно оценивать множество механохимических свойств композиционного материала [6, 23, 24, 25].

В настоящем исследовании общая оценка качества каждого варианта материала проводится с использованием целевой функции в виде линейной комбинации на основе нормализованных критериев. Для каждой комбинации материалов X , функция общего качества определяется следующим образом:

$$Q(X) = \sum_{i=1}^n \lambda_i F_i(X),$$

где $F_i(X)$ представляет значение i -го критерия, включая износостойкость, антиадгезионные свойства, вязкость, адгезию к металлической подложке, химическую стойкость, технологичность и стоимость; λ_i обозначает весовой коэффициент, отражающий относительную важность каждого критерия, удовлетворяющий условию $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$. Задача выбора материала формулируется как поиск комбинации X , максимизирующей $Q(X)$ в пределах допустимого проектного пространства в соответствии с современными принципами проектирования композиционных материалов [23, 24].

Для обеспечения сопоставимости критериев с разными единицами и физической природой значения $F_i(X)$ нормализуются относительно соответствующих технических порогов. Обязательные ограничения (например, максимально допустимый коэффициент трения или скорость изнашивания либо минимальная адгезия к металлу) применяются для исключения вариантов материалов, не соответствующих практическим эксплуатационным требованиям [4, 6, 8, 15]. Параллельно с подходом целевой функции используется метод «идеальной точки» для оценки общей пригодности каждой комбинации материалов путем расчета расстояния от вектора критериев варианта до идеальной точки в многокритериальном пространстве [24, 25].

На основе этой оптимизационной модели проектирование полимерно-композиционных покрытий осуществляется путем комбинирования многофункциональных наполнителей, включая твердые смазочные вещества, упрочняющие добавки и микро- наноармирующие фазы, для формирования иерархической

многомасштабной армированной структуры в полимерной матрице [6, 18, 23, 26, 27]. Этот подход позволяет одновременно оптимизировать износостойкость, снижение адгезии, повышение вязкости и механико-химическую долговечность, необходимую для тяжелых эксплуатационных условий смесительных камер ресайклеров [4, 5, 6, 7, 10, 18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Критерии эффективности полимерных покрытий в условиях интенсивной эксплуатации

В условиях эксплуатации смесительных камер ресайклеров полимерные покрытия подвергаются вибрациям, многократным ударам и температурным колебаниям на протяжении всего срока службы. Поэтому адгезия покрытия к металлической подложке является первоочередным требованием для обеспечения долгосрочной защитной функции. Исследования полимерных покрытий показали, что химическая природа полимера одновременно влияет на адгезию, состояние поверхности подложки и способ нанесения покрытия [8, 9].

Помимо адгезии, покрытие должно обладать износостойкостью и ударной прочностью при постоянном контакте со смесями асфальтобетона, содержащими крупные заполнители. В этом контексте критически важно обеспечить баланс между твердостью и вязкостью материала. Полимеры с высокой твердостью часто являются хрупкими и склонны к растрескиванию под импульсными нагрузками, тогда как чрезмерно мягкие материалы подвержены быстрому износу. Способность покрытия к поглощению энергии и сопротивление повторяющимся ударам играют ключевую роль в ограничении механических повреждений и увеличении срока службы [9, 10].

Кроме механических требований, полимерные покрытия деталей в смесительных камерах должны обеспечивать химическую стойкость и термическую стабильность. Прямой контакт с битумными эмульсиями, водой и добавками для ресайклинга требует, чтобы покрытие сохраняло стабильные физико-химические свойства, предотвращая набухание, размягчение и утрату работоспособности в условиях повышенной влажности. Одновременно полимер должен оставаться стабильным при эксплуатационных термических нагрузках, без текучести, разложения или потери защитной функции, что подтверждается недавними исследованиями модифицированных эпоксидных и полимерно-композиционных покрытий [11].

Наконец, практическая применимость и экономическая эффективность также являются важными критериями для внедрения в реальных условиях защитных полимерных покрытий деталей рабочего оборудования ресайклеров. Технологии нанесения покрытий должны быть адаптированы к условиям ремонтных мастерских и не требовать сложного оборудования.

Выбор полимерных матриц и наполнителей для покрытий смесительных камер ресайклеров

Выбор полимерной матрицы и наполнителей решающим образом влияет на общие эксплуатационные характеристики полимерно-композитных покрытий в смесительных камерах ресайклеров. Среди широко применяемых матриц эпоксидные смолы характеризуются отличной адгезией к металлическим поверхностям, высокой твёрдостью и прочностью при растяжении, коррозионной

стойкостью и термической стабильностью, что соответствует условиям эксплуатации ресайклеров [12, 13, 14]. Кроме того, эпоксидные материалы допускают гибкую интеграцию нано-, микро- или гибридных наполнителей, что позволяет оптимизировать твёрдость, вязкость и износостойкость покрытий.

Помимо эпоксидных смол, **полиуретановые (ПУ)** и **полимочевинные (ПМ)** системы известны высокой вязкостью, эффективным поглощением вибраций и ударных нагрузок, что делает их пригодными для эластичных покрытий или зон, подверженных интенсивным импульсным воздействиям [15, 16, 17]. Однако вследствие более низкой адгезии к металлическим подложкам по сравнению с эпоксидными смолами ПУ и ПМ преимущественно применяются в качестве вспомогательных фаз либо в комбинации с эпоксидными матрицами для улучшения сцепления и комплексных механических характеристик материала покрытия.

Сводная характеристика свойств и степени пригодности комбинаций «полимер–наполнитель» [13, 14, 16, 18]

Table 1
Summary of properties and applicability of polymer-filler combinations [13, 14, 16, 18]

Полимерная матрица	Тип наполнителя	Ключевые механико-физические свойства	Преимущества	Ограничения
Эпоксидная смола (ЭП)	Нано (10–100 нм)	Твёрдая, вязкая, коррозионностойкая, термически стабильная	Высокая жёсткость и коррозионная стойкость, широкая совместимость	Хрупкость без модификации, требуется хорошая дисперсия наночастиц
Эпоксидная смола (ЭП)	Микро (1–50 мкм)	Износостойкая, снижающая трение	Технологичность, низкая стоимость, оптимальна в сочетании нано–микро	Механическое упрочнение ниже, чем у нанонаполнителей
Эпоксидная смола (ЭП)	Гибрид нано–микро	Твёрдая–вязкая–износостойкая–антиадгезионная, устойчива к влаге	Многоцелевая оптимизация, эффективна в тонких покрытиях	Требуется сложная оптимизация соотношений компонентов
Полиуретан (ПУ, жёсткий)	Нано или микро	Вязкий, поглощающий вибрации, стойкий к разрыву	Ударопрочность, сохранение пластичности при низких температурах	Адгезия к стали ниже, чем у ЭП, требуется грунтование
Полимочевина (ПУ, гибридная)	Нано или микро	Эластичная, самозалечивание микротрещин, ударостойкая	Быстрое нанесение, высокая стойкость к импульсным нагрузкам	Механическая прочность ниже, чем у ЭП, размягчение при высоких температурах
Эластомерные композиты (ПУ – нано, ПУ – кремнезём)	Нано	Высокая вязкость и способность к поглощению ударов	Трещиностойкость, устойчивость к ударам	Износостойкость ниже, чем у ЭП
Волокнистые/микроволоконные наполнители	Стекланные, углеродные, арамидные	Чрезвычайно высокая прочность при растяжении, высокая жёсткость	Высокая несущая способность	Анизотропия, трудности применения в тонких покрытиях
НПС/ФФС/КОС/ПМ	–	В зависимости от типа: термо- и химически стойкие	Низкая стоимость/высокая термостойкость/огнестойкость	Хрупкость, низкие механические свойства, сложность переработки

Наполнители играют ключевую роль в формировании эксплуатационных свойств полимерных покрытий. Наночастицы размером 10–100 нм эффективно повышают твёрдость, прочность и коррозионную стойкость за счёт развитой удельной поверхности и сильного межфазного взаимодействия с полимерной матрицей. Вместе с тем их использование требует применения эффективных методов диспергирования для предотвращения агломерации [18]. В противоположность этому микрочастицы размером 1–50 мкм преимущественно способствуют повышению износостойкости и снижению коэффициента трения, отличаются технологичностью и экономической эффективностью, однако обеспечивают ограниченный уровень механического упрочнения [19, 20]. Совмещение нано- и микро размеров наполнителей в гибридных системах приводит к формированию эффекта двойного армирования, обеспечивающего баланс механических свойств и повышение стабильности покрытия в тяжёлых условиях эксплуатации [21, 22].

Механизмы нано- микрогибридного армирования, хотя и изучены преимущественно применительно к металлическим подложкам, могут быть экстраполированы на полимерно-композитные покрытия смесительных ка-

мер ресайклеров. Комбинации «полимер-наполнитель» могут быть систематически оценены по совокупности механических характеристик, износостойкости, адгезии и термо-влажностной стабильности с целью определения их пригодности для применения в покрытиях деталей рабочего оборудования ресайклеров (таблица 1).

На основе сочетания матричных материалов и наполнителей (таблица 1) выбор оптимальных материалов покрытий осуществляется следующим образом. Эпоксидные системы в сочетании с нанонаполнителями или гибридными нано- микронаполнителями используются в качестве основных матриц покрытий, обеспечивая благоприятный баланс твёрдости и вязкости, высокую износостойкость, а также термо- и влагостойкость. В то же время композиты на основе ПУ/ПМ/эластомеров применяются в качестве вспомогательных покрытий в зонах, подвергающихся интенсивным вибрационным и ударным нагрузкам, что позволяет оптимизировать механические характеристики и увеличить срок службы покрытий деталей рабочего оборудования смесительных камер ресайклеров. Диаграмма пригодности (рисунок 1) наглядно иллюстрирует приоритетную ранжировку каждой комбинации «полимер-наполнитель».

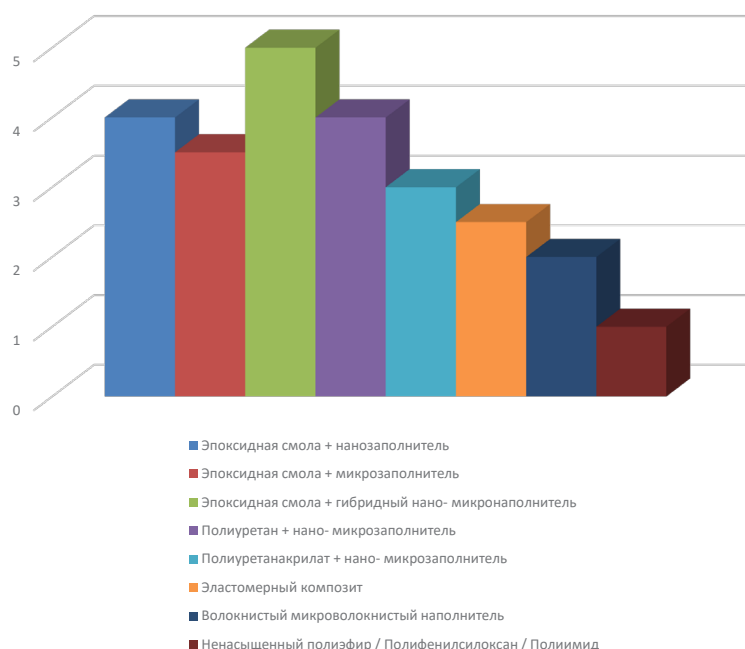


Рисунок 1 – Уровни пригодности покрытий для применения в смесительных камерах технологии CIR
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Coating applicability levels suitable for CIR mixing chamber
Source: compiled by the authors.

Роль и характеристики наполнителей в полимерных материалах для покрытий смесительных камер ресайклеров

В полимерных композиционных системах наполнители выступают в качестве дисперсных твёрдых фаз, формируя многофазную структуру с межфазными границами, которые способны напрямую модулировать механическое, химическое и трибологическое поведение материала [23, 24, 25]. В смесительных камерах ресайклеров поверхностные покрытия и наполнители выполняют функции, выходящие за рамки простого повышения твёрдости, характерного для традиционных применений. Они также определяют механизмы разрушения, повышают износ- и ударостойкость, снижают поверхностную энергию для ограничения адгезии пенобитумных асфальтобетонных смесей, улучшают размерную стабильность в условиях влажно-химической среды и обеспечивают эффект твёрдой смазки, способствуя снижению энергопотребления в процессе эксплуатации. Эти функции имеют особую значимость, поскольку поверхность смесительной камеры в течение всего процесса ресайклинга постоянно подвергается интенсивным ударам со стороны заполнителей асфальтобетонной смеси, тяжёлым условиям скольжения и абразивного изнашивания.

В отличие от классических классификаций, основанных на происхождении (природные, синтетические) или геометрии (порошки, волокна), в настоящем исследовании наполнители рассматриваются с позиции их промышленной функциональности, с акцентом на эффективность по пяти ключевым критериям: износостойкость, снижение коэффициента трения и антибитумная адгезия, химическая инертность по отношению к битумно-цементно-водным эмульсиям, устойчивость к импульсным нагрузкам и вибрациям, а также доступность и технологичность введения в условиях промышленного производства.

Твёрдосмазочные наполнители играют ключевую роль в снижении трения и улучшении трибологических характеристик, при этом к числу типичных материалов относятся графит, MoS_2 , WS_2 , h-BN и ПТФЭ [27, 28]. Графит обладает слоистой структурой, обеспечивающей межслоевое скольжение, и широко применяется для снижения трения деталей из полимерных материалов [27]; MoS_2 характеризуется низким коэффициентом трения и хорошей стабильностью при высоких нагрузках или в условиях повышенной влажности [27, 28]; WS_2 сохраняет низкое трение в широком

диапазоне трибологических условий, включая высокие температуры и нагрузки [27]; h-BN является химически инертным и термически стабильным, что делает его пригодным для полимеров, эксплуатируемых в химически или термически агрессивных средах [27]; ПТФЭ обладает исключительно низким коэффициентом трения и выраженными антиадгезионными свойствами, однако имеет ограниченную механическую прочность и поэтому чаще используется как смазочная добавка, а не как основной наполнитель [27, 28]. Rao и соавторы [26] показали, что введение MoS_2 и h-BN в углерод-эпоксидные композиты приводит к одновременному улучшению механических и трибологических свойств, что подчёркивает ключевую роль твёрдых наполнителей в оптимизации трения и износа полимерных материалов.

Нанонаполнители, используемые в эпоксидных композитах (таблица 2), дополнительно подчёркивают их влияние на коэффициент трения, износостойкость, механические свойства, термическую стабильность и степень диспергирования в полимерной матрице. Такое представление позволяет наглядно продемонстрировать роль и эффективность каждого наполнителя по совокупности эксплуатационных параметров, что согласуется с результатами ранее опубликованных исследований.

Анализы показывают, что оптимальные системы наполнителей для покрытий смесительных камер ресайклеров не должны основываться на одном материале, а требуют многофункциональной разработки. Твёрдосмазочные наполнители, такие как MoS_2 , WS_2 , h-BN и графит в количестве 5–15 мас.% эффективно снижают трение и ограничивают адгезию пенобитумной смеси [26, 27]. В то же время упрочняющие и износостойкие наполнители, включая Al_2O_3 , SiC и небольшие количества нано- SiO_2 (10–25 мас.%), защищают поверхность от интенсивных механических воздействий [28]. Наночастицы SiO_2 при низкой нагрузке (0,5–3 мас.%) дополнительно повышают вязкость и снижают хрупкость, вызванную микрочастицами, формируя иерархическую армированную структуру с многомасштабными твёрдыми фазами, что позволяет оптимизировать механические свойства и износостойкость покрытия [28, 29].

В работе [28] проанализированы и обобщены материалы наполнителей для улучшения механических характеристик наноэпоксидных композитов; подробные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 2
Сравнительный анализ различных нанонаполнителей [29]
Источник: составлено авторами.

Table 2
Comparative analysis of various nanofillers [29]
Source: compiled by the authors.

Нанонаполнитель	Снижение трения	Износостойкость	Механическая прочность	Термическая стабильность	Качество диспергирования	Уникальные преимущества	Ограничения
Графен	выс.	выс.	выс.	выс.	умер.	Высокое отношение сторон, электропроводность	Склонность к агломерации
Углеродные нанотрубки (УНТ)	выс.	умер.	выс.	умер.	низ.	Исключительно высокая прочность при растяжении, малый удельный вес	Трудности диспергирования в полимерной матрице
Дисульфид молибдена (MoS ₂)	умер.	выс.	умер.	умер.	выс.	Эффект твёрдой смазки, эффективное снижение трения	Деградация при повышенных температурах
Максены	выс.	выс.	выс.	выс.	умер.	Высокая электропроводность, структурная гибкость	Ограниченная долговременная стабильность
Чёрный фосфор	умер.	умер.	выс.	низ.	низ.	Отличные механические характеристики	Высокая химическая активность, деградация на воздухе
Нитрид бора (BN)	умер.	умер.	низ.	выс.	выс.	Термическая стабильность, электроизоляционные свойства	Ограниченное механическое упрочнение
Диоксид кремния (SiO ₂)	низ.	выс.	умер.	умер.	выс.	Экономичность, повышение долговечности покрытия	Ограниченное снижение коэффициента трения

Таблица 3

Механические свойства эпоксидного нанокompозита, армированного нанонаполнителем [28]
 Источник: составлено авторами.

Table 3

Mechanical properties of epoxy nanocomposite reinforced with nanofiller material [28]
 Source: compiled by the authors.

Наполнитель	Содержание	Модуль Юнга (ГПа / Δ%)	Прочность при растяжении (МПа / Δ%)	Основные наблюдения
GNP / CNT	0,5 мас. %	2,2 / 40	50 / 36	Умеренное повышение за счёт волнистости УНТ и укладки GNP; комбинация GNP + УНТ дала ~14 % увеличение модуля
rGO	0,2–0,3 мас. %	1,8–12 / 12–47	46,5 / 47	Оптимальная дисперсия улучшает передачу напряжений и механические свойства; при больших нагрузках упрочнение снижается
f-GO / GO	0,1–0,5 мас. %	3 / 12	50–65 / 13–121	Функционализация улучшает передачу нагрузки и прочностные характеристики; избыточное содержание может снизить прочность
f-GNP / GNP	0,5–5 мас. %	2,1–3,6 / 15–71	48–95 / 1–99	Функционализированные GNP повышают модуль и прочность за счёт межфазного связывания; при высоких концентрациях эффективность снижается
f-BN / BN	0,3–10 мас. %	2,7–4,8 / 21–68	25–66 / 54–100	Функционализированный BN улучшает модуль и прочность; избыточное содержание (>10 мас. %) может снизить механические свойства
Ti ₃ C ₂ Tx / Ti ₃ CN	0,2–90 мас. %	2,6–4,5 / 35–182	53–70 / 25–51	Наноленты максимизируют модуль и прочность за счёт передачи напряжений и адгезии на границе фаз; критична оптимальная нагрузка.
MoS ₂ / MoS ₂ -CF / MoS ₂ -SiO ₂ / MoS ₂ -МНОУНТ	0,2–3 wt%	0,9–3,4 / 9–47	31–68 / 23–77	MoS ₂ и гибридные наполнители повышают жёсткость и вязкость; агломерация или чрезмерная нагрузка снижает свойства
f-WS ₂	0,1–0,25 wt%	–	–	Функционализированные наноленты WS ₂ повышают термомеханические свойства за счёт прочности самих листов
f-BP	3 wt%	–	70 / 21	Агломерация BP немного снижает прочность по сравнению с чистой эпоксидной матрицей
BN/МНОУНТ	0,5/0,3 wt%	3,2 / 38	60 / 25	Оптимальное содержание BN + MWCNT повышает прочность; избыточный наполнитель снижает прочность из-за плохой дисперсии

Многофакторный сравнительный анализ и оптимизация систем «полимер–наполнитель» для покрытий смесительных камер ресайклеров

Многофакторная радиальная диаграмма (рисунок 2) позволяет количественно и наглядно оценить общие эксплуатационные характеристики систем покрытий «полимер–наполнитель» в условиях интенсивной эксплуатации смесительных камер ресайклеров, где одновременно проявляются износ, удары, вибра-

ции, а также комбинированные химико-термические воздействия [1, 2, 3, 4, 5]. Результаты показывают, что на характеристики покрытия нельзя влиять с опорой на один критерий; их определяет баланс между механическими свойствами, трибологическим поведением и адгезионными характеристиками. Это наблюдение полностью соответствует современным подходам к проектированию композитных покрытий для экстремальных условий эксплуатации [6, 10].



Рисунок 2 – Многокритериальный радиальный анализ систем покрытий для смесительных камер CIR
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Multi-criteria radar analysis of coating systems for CIR mixing chambers
Source: compiled by the authors.

Материалы на основе эпоксидных смол демонстрируют наивысший общий индекс качества $Q(X)$, что обусловлено прежде всего их превосходной адгезией к металлическим подложкам, высокой твёрдостью и отличной химико-термической стабильностью – ключевыми факторами для поддержания целостности покрытия при комбинированных абразивно-ударных нагрузках [8, 11, 12, 13, 14]. На радиальной диаграмме это преимущество проявляется в виде выраженного удлинения полигона вдоль осей адгезии, износостойкости и химической стойкости. Напротив, системы на основе ПУ/ПМ, хотя и демонстрируют высокую вязкость и способность поглощать ударную энергию [16, 17], ограничены слабой адгезией к металлу и низкой термостойкостью [15], что приводит к меньшей площади полигона в многофакторной оценке.

Влияние типа наполнителя наглядно отражается в геометрии полигонов радиальной диаграммы. Системы, армированные исключительно микронаполнителями, показывают хорошую износостойкость и технологичность, но недостаточно сбалансированную вязкость. Напротив, системы с нанонаполнителями значительно усиливают межфазное сцепление и сопротивление инициации и распространению микротрещин; однако они сталкиваются с проблемами диспергирования наночастиц и повышенной стоимостью материала [18, 21, 22, 23, 24, 25, 29]. Гибридные нано-микронаполнители эффективно преодолевают эти ограничения за счёт многоуровневого армирующего механизма, обеспечивая одновременное улучшение механических и трибологических показателей и достигая минимального расстояния до идеальной точки в пространстве многофакторной оценки [21, 23, 28].

Кроме того, введение твёрдосмазочных наполнителей, таких как MoS_2 , WS_2 , h-BN или графит, значительно снижает трение и адгезию битума, улучшая трибологические характеристики без существенного ухудшения механической прочности покрытий [6, 26, 27, 28]. В совокупности аналитические результаты показывают, что эпоксидные покрытия, армированные гибридными нано-микронаполнителями и дополненные твёрдосмазочными добавками, представляют собой оптимальное и сбалансированное решение для применения в смесительных камерах ресайклеров. Этот подход соответствует целям повышения как технической эффективности, так и устойчивости технологии холодного ресайклинга в современной эксплуатации дорожной инфраструктуры [1, 2, 10].

Радиальная диаграмма многофакторной оценки служит не только иллюстративным инструментом, но и количественным подтверждением того, что стратегия проектирования на основе эпоксидных покрытий с гибридными нано-микронаполнителями и твёрдосмазочными добавками является наиболее оптимальной при одновременном учёте механических, трибологических, химико-термических, технологических и экономических требований смесительных камер ресайклеров. Этот подход к многофакторной оптимизации соответствует современным тенденциям разработки устойчивых покрытий для экстремальных условий эксплуатации, повышая общую эффективность и устойчивость технологии холодного ресайклинга в современных практиках технического обслуживания и ремонта дорожных покрытий [1, 2, 10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа демонстрирует, что эпоксидные полимерно-композиционные покрытия с многофункциональными наполнителями, такими как твёрдосмазочные добавки, армирующие агенты и нано-микрокомпоненты, обеспечивают эффективную защиту деталей рабочего оборудования смесительных камер ресайклеров от износа, ударных воздействий и химических нагрузок. Применяя многофакторную оптимизацию системы «смола-наполнитель», достигается сбалансированная комбинация твёрдости, вязкости, износостойкости, снижения трения, адгезии и химико-термической стабильности. Иерархическое расположение наполнителей способствует равномерному рассеянию ударной энергии, улучшает поглощение ударов и сохраняет

как трибологические, так и химические свойства покрытия, минимизируя расслоение, износ, повреждения и разрушения, вызванные эмульсиями. Путём регулирования типа, содержания и состава наполнителей покрытия могут быть адаптированы для зон с высокими нагрузками, продлевая срок службы деталей рабочего оборудования смесительных камер ресайклеров при сохранении экономической эффективности и технологичности. Полученные результаты создают надёжную научную основу для применения покрытий в технологиях холодного ресайклинга и подчеркивают более широкий потенциал таких защитных покрытий для промышленного оборудования, работающего в условиях комбинированных абразивных, ударных и химически агрессивных воздействий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Pakes A., Edil T., Sanger M., Olley R., Klink T. Environmental benefits of cold-in-place recycling // *Transportation Research Record*: 2672(24), 2018; P. 11–19. <https://doi.org/10.1177/0361198118758691>
2. Cao R., Li H., Yao L., Jiang J., Leng Z., Ni F., Zhao Z. Comparative analysis of cold in-place recycling for roadway maintenance and rehabilitation from the perspectives of technical-cost-environmental nexus // *Journal of Cleaner Production*: 439, 2024; P. 140768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140768>. EDN EUDJXU
3. Jin D., Yin L., Malburg L., You Z. Laboratory evaluation and field demonstration of cold in-place recycling asphalt mixture in Michigan low-volume road // *Case Studies in Construction Materials*: 20, 2024; P. e02923. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02923>. EDN DEKCHW.
4. Niță A., Petrescu M.G., Dumitru T., Burlacu A., Tănase M., Laudacescu E., Ramadan I. Experimental research on the wear behavior of materials used in the manufacture of components for cement concrete mixers // *Materials*: 16(6), 2023; P. 2326. <https://doi.org/10.3390/ma16062326>
5. Burlacu A., Petrescu M. G., Răzvan G. R., Dumitru T., Laudacescu E. V., Ramadana I. N., Niță A. Experimental Investigations on Wear Phenomena Specific to Rotary Dryer Flights (Blades) // *Tribology in Industry*: 46(1), 2024; P. 56. <https://doi.org/10.24874/ti.1549.08.23.10>. EDN GBUCUO.
6. Ren Y., Zhang L., Xie G., Li Z., Chen H., Gong H., Luo J. A review on tribology of polymer composite coatings // *Friction*: 9(3), 2021; P. 429–470. <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0446-4>. EDN VYQUSV.
7. Seenath A.A., Baig M.M.A., Katiyar J.K., Mohammed A.S.A Comprehensive Review on the Tribological Evaluation of Polyether Ether Ketone Pristine and Composite Coatings // *Polymers*: 16(21), 2024; P. 2994. <https://doi.org/10.3390/polym16212994>. EDN VJHKIU.

8. Zvonkina I.J. Adhesion of polymer coatings: Principles and evaluation // *Industrial Applications for Intelligent Polymers and Coatings*. Cham: Springer International Publishing, 2016; P. 605–617. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26893-4_28
9. Jeandin M., Koivuluoto H., Vezzu S. Coating properties // *Modern Cold Spray: Materials, Process, and Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2015; P. 107–224. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16772-5_4. EDN WTLYMB.
10. Antony Jose S., Lapierre Z., Williams T., Hope C., Jardin T., Rodriguez R., Menezes P.L. Wear-and corrosion-resistant coatings for extreme environments: advances, challenges, and future perspectives // *Coatings*: 15(8), 2025; P. 878. <https://doi.org/10.3390/coatings15080878>. EDN XZCXXL.
11. Wu M., Cao G., Xiao Z. Polyimide-modified epoxy coatings reinforced with functional fillers for enhanced thermal stability and corrosion resistance // *Advanced Composites and Hybrid Materials*: 8(2), 2025; P. 1–16. <https://doi.org/10.1007/s42114-025-01265-6>. EDN GLWYTP.
12. Bhavith K., Prashanth Pai M., Sudheer M., Ramachandra C.G., Maruthi Prashanth B.H., Kiran Kumar B. The effect of metal filler on the mechanical performance of epoxy resin composites // *Engineering Proceedings*: 59(1), 2023; P. 200.
13. Zhao X., Lu S., Li W., Zhang S., Li K., Nawaz K., Webb E. Epoxy as filler or matrix for polymer composites // *Epoxy-Based Composites*: 1, 2022; <https://doi.org/10.5772/intechopen.102448>
14. Abdellaoui H., Raji M., Bouhfid R. Kacem Qaiss A. Investigation of the deformation behavior of epoxy-based composite materials // *Failure analysis in biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites*. Woodhead Publishing, 2019; P. 29–49. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102293-1.00002-4>. EDN ZFOVMO.
15. Chen Y., Hu J., Wu X., Duan S., Wang H., Ma T. Synthesis and Evaluation of Polyurethane as Waterproof Adhesion Layer for Steel Bridge Deck // *Polymers*: 16(22), 2024; P. 3140. <https://doi.org/10.3390/polym16223140> EDN SIMVEE.
16. Zhang R., Huang W., Lyu P., Yan S., Wang X., Ju J. Polyurea for blast and impact protection: A review // *Polymers*: 14(13), 2022; P. 2670. <https://doi.org/10.3390/polym14132670>. EDN AQMRBA.
17. Chu D., Li Z., Yao K., Wang Y., Tian R., Zhuang Z., Liu Z. Studying the strengthening mechanism and thickness effect of elastomer coating on the ballistic-resistance of the polyurea-coated steel plate // *International Journal of Impact Engineering*: 163, 2022; P. 104181. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104181>. EDN FGQFRQ.
18. Fuseini M., Zaghoul M. M. Y., Abakar D., Zaghoul M. M. Y. Review of epoxy nano-filled hybrid nanocomposite coatings for tribological applications // *FlatChem*: 49, 2025; P. 100768. <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2024.100768>. EDN AYQWAO.
19. Singhal V., Shelly D., Saxena A., Gupta R., Verma V. K., Jain A. Study of the influence of nanoparticle reinforcement on the mechanical and tribological performance of aluminum matrix composites-a review // *Lubricants*: 13(2), 2025; P. 93. <https://doi.org/10.3390/lubricants13020093>. EDN DSSTLO.
20. Khan S.A., Amjad H., Ahmad F., Khan H.A.A. Scientometric Review Summarizing the Impact of Nanomaterials on the Fresh, Hardened, and Durability Properties of Cement-Based Materials // *Advances in Civil Engineering*: 2024(1), 2024; P. 8639483. <https://doi.org/10.1155/adce/8639483>
21. Akbarpour M.R., Mirabad H.M., Alipour S. Microstructural and mechanical characteristics of hybrid SiC/Cu composites with nano-and micro-sized SiC particles // *Ceramics International*: 45(3), 2019; P. 3276–3283. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.235>
22. Adhithya K. Investigation of mechanical properties, wear behaviour, and hole quality analysis of Al2014-ZrO2-Sn composites // *Advances in Materials and Processing Technologies*: 11(3), 2025; P. 1644–1687. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2024.2397182>
23. Rethon R., DeArmitt C. Fillers (including fiber reinforcements) // *Brydson's Plastics Materials*. Butterworth-Heinemann, 2017; P. 169–204. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00008-6>
24. Schmid F. Understanding and modeling polymers: The challenge of multiple scales // *ACS Polymers Au*: 3(1), 2022; P. 28–58. <https://doi.org/10.1021/acspolymersau.2c00049>. EDN UHRZMJ.
25. Bustamante-Torres M., Romero-Fierro D., Arcentales-Vera B., Pardo S., Bucio E. Interaction between filler and polymeric matrix in nanocomposites: Magnetic approach and applications // *Polymers*: 13(17), 2021; P. 2998. <https://doi.org/10.3390/polym13172998>. EDN FGNUBF.
26. Rao Y.S., Mohan N.S., Shetty N., Shivamurthy B. Effects of solid lubricant fillers on the flexural and shear strength response of carbon fabric-epoxy composites // *Polymer Testing*: 96, 2021; P. 107085. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107085>. EDN MRNPJG.
27. Sarkar M., Mandal N. Solid lubricant materials for high temperature application: A review // *Materials Today: Proceedings*: 66, 2022; P. 3762–3768. DOI 10.1016/j.matpr.2022.06.030. EDN LVQWCT.
28. Fuseini M., Zaghoul M.M.Y., Abakar D., Zaghoul M.M.Y. Review of epoxy nano-filled hybrid nanocomposite coatings for tribological applications // *FlatChem*: 49, 2025; P. 100768. <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2024.100768>. EDN AYQWAO.
29. Tüfekci M., Baytak T., Bulut O., Pir İ., Acarer Arat S., Özkal B., Salles L. Nonlinear behaviour of epoxy and epoxy-based nanocomposites: an integrated experimental and computational analysis // *Mechanics Based Design of Structures and Machines*: 52(9), 2024; P. 6858–6888. <https://doi.org/10.1080/15397734.2023.2293763>. EDN CKTOQV.

REFERENCES

1. Pakes A., Edil T., Sanger M., Olley R., Klink T. Environmental benefits of cold-in-place recycling. *Transportation Research Record*. 2018; 2672(24): 11–19. <https://doi.org/10.1177/0361198118758691>

2. Cao R., Li H., Yao L., Jiang J., Leng Z., Ni F., Zhao Z. Comparative analysis of cold in-place recycling for roadway maintenance and rehabilitation from the perspectives of technical-cost-environmental nexus. *Journal of Cleaner Production*. 2024; 439: 140768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140768>. EDN EUDJXU.
3. Jin D., Yin L., Malburg L., You Z. Laboratory evaluation and field demonstration of cold in-place recycling asphalt mixture in Michigan low-volume road. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 20: e02923. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02923>. EDN DEKCHW.
4. Niță A., Petrescu M.G., Dumitru T., Burlacu A., Tănase M., Laudacescu E., Ramadan I. Experimental research on the wear behavior of materials used in the manufacture of components for cement concrete mixers. *Materials*. 2023; 16(6): 2326. <https://doi.org/10.3390/ma16062326>
5. Burlacu A., Petrescu M.G., Răzvan G.R., Dumitru T., Laudacescu E.V., Ramadana I.N., Niță A. Experimental Investigations on Wear Phenomena Specific to Rotary Dryer Flights (Blades). *Tribology in Industry*. 2024; 46(1): 56. <https://doi.org/10.24874/ti.1549.08.23.10>. EDN GBUCUO.
6. Ren Y., Zhang L., Xie G., Li Z., Chen H., Gong H., Luo J. A review on tribology of polymer composite coatings. *Friction*. 2021; 9(3): 429-470. DOI 10.1007/s40544-020-0446-4. EDN VYQUSV.
7. Seenath A.A., Baig M.M.A., Katiyar J.K., Mohammed A.S. A Comprehensive Review on the Tribological Evaluation of Polyether Ether Ketone Pristine and Composite Coatings. *Polymers*. 2024; 16(21): 2994. <https://doi.org/10.3390/polym16212994>. EDN VJHKIU.
8. Zvonkina I.J. Adhesion of polymer coatings: Principles and evaluation. In: *Industrial Applications for Intelligent Polymers and Coatings*. Cham: Springer International Publishing; 2016; p. 605-617. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26893-4_28.
9. Jeandin M., Koivuluoto H., Vezzu S. Coating properties. In: *Modern Cold Spray: Materials, Process, and Applications*. Cham: *Springer International Publishing*; 2015; p. 107-224. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16772-5_4. EDN WTLYMB.
10. Antony Jose S., Lapierre Z., Williams T., Hope C., Jardin T., Rodriguez R., Menezes P.L. Wear and corrosion-resistant coatings for extreme environments: advances, challenges, and future perspectives. *Coatings*. 2025; 15(8): 878. <https://doi.org/10.3390/coatings15080878>. EDN XZCXXL.
11. Wu M., Cao G., Xiao Z. Polyimide-modified epoxy coatings reinforced with functional fillers for enhanced thermal stability and corrosion resistance. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2025; 8(2): 1-16. <https://doi.org/10.1007/s42114-025-01265-6>. EDN GLWYTP.
12. Bhavith K., Prashanth Pai M., Sudheer M., Ramachandra C.G., Maruthi Prashanth B.H., Kiran Kumar B. The effect of metal filler on the mechanical performance of epoxy resin composites. *Engineering Proceedings* : 59(1), 2023; P. 200. <https://doi.org/10.3390/engproc2023059200>
13. Zhao X., Lu S., Li W., Zhang S., Li K., Nawaz K., Webb E. Epoxy as filler or matrix for polymer composites. *Epoxy-Based Composites*. 2022; 1. <https://doi.org/10.5772/intechopen.102448>
14. Abdellaoui H., Raji M., Bouhfid R., el kacem Quiss A. Investigation of the deformation behavior of epoxy-based composite materials. In: *Failure analysis in biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites*. Woodhead Publishing; 2019; p. 29-49. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102293-1.00002-4>. EDN ZFOVMO.
15. Chen Y., Hu J., Wu X., Duan S., Wang H., Ma T. Synthesis and Evaluation of Polyurethane as Waterproof Adhesion Layer for Steel Bridge Deck. *Polymers*. 2024; 16(22): 3140. <https://doi.org/10.3390/polym16223140>. EDN SIMVEE.
16. Zhang R., Huang W., Lyu P., Yan S., Wang X., Ju J. Polyurea for blast and impact protection: A review. *Polymers*. 2022; 14(13): 2670. <https://doi.org/10.3390/polym14132670>. EDN AQMRBA.
17. Chu D., Li Z., Yao K., Wang Y., Tian R., Zhuang Z., Liu Z. Studying the strengthening mechanism and thickness effect of elastomer coating on the ballistic-resistance of the polyurea-coated steel plate. *International Journal of Impact Engineering*. 2022; 163: 104181. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104181>. EDN FGQFRQ.
18. Fuseini M., Zaghloul M.M.Y., Abakar D., Zaghloul M.M.Y. Review of epoxy nano-filled hybrid nanocomposite coatings for tribological applications. *FlatChem*. 2025; 49: 100768. <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2024.100768>. EDN AYQWAO.
19. Singhal V., Shelly D., Saxena A., Gupta R., Verma V.K., Jain A. Study of the influence of nanoparticle reinforcement on the mechanical and tribological performance of aluminum matrix composites-a review. *Lubricants*. 2025; 13(2): 93. <https://doi.org/10.3390/lubricants13020093>. EDN DSSTLO.
20. Khan S.A., Amjad H., Ahmad F., Khan H.A. A Scientometric Review Summarizing the Impact of Nanomaterials on the Fresh, Hardened, and Durability Properties of Cement-Based Materials. *Advances in Civil Engineering*. 2024; 2024(1): 8639483. <https://doi.org/10.1155/adce/8639483>
21. Akbarpour M.R., Mirabad H.M., Alipour S. Microstructural and mechanical characteristics of hybrid SiC/Cu composites with nano- and micro-sized SiC particles. *Ceramics International*. 2019; 45(3): 3276-3283. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.235>
22. Adhithya K. Investigation of mechanical properties, wear behaviour, and hole quality analysis of Al2014-ZrO2-Sn composites. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2025; 11(3): 1644-1687. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2024.2397182>
23. Rothon R., DeArmitt C. Fillers (including fiber reinforcements). In: *Brydson's Plastics Materials*. Butterworth-Heinemann; 2017; p. 169-204. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00008-6>
24. Schmid F. Understanding and modeling polymers: The challenge of multiple scales. *ACS Polymers Au*. 2022; 3(1): 28-58. <https://doi.org/10.1021/acspolymersau.2c00049>. EDN UHRZMJ.

25. Bustamante-Torres M., Romero-Fierro D., Arcentales-Vera B., Pardo S., Bucio E. Interaction between filler and polymeric matrix in nanocomposites: Magnetic approach and applications. *Polymers*. 2021; 13(17): 2998. <https://doi.org/10.3390/polym13172998>. EDN FGNUBF.

26. Rao Y.S., Mohan N.S., Shetty N., Shivamurthy B. Effects of solid lubricant fillers on the flexural and shear strength response of carbon fabric-epoxy composites. *Polymer Testing*. 2021; 96: 107085. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107085>. EDN MRNPJG.

27. Sarkar M., Mandal N. Solid lubricant materials for high temperature application: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 66: 3762-3768. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.030>. EDN LVQWCT.

28. Fuseini M., Zaghloul M.M.Y., Abakar D., Zaghloul M.M.Y. Review of epoxy nano-filled hybrid nanocomposite coatings for tribological applications. *FlatChem*. 2025; 49: 100768. <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2024.100768>. EDN AYQWAO.

29. Tüfekci M., Baytak T., Bulut O., Pir İ., Acarer Arat S., Özkal B., Salles L. Nonlinear behaviour of epoxy and epoxy-based nanocomposites: an integrated experimental and computational analysis. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2024; 52(9): 6858-6888. <https://doi.org/10.1080/15397734.2023.2293763>. EDN CKTOQV.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Зорин В.А. Организация работы авторского коллектива, формирование направления и формулирование проблемы исследования, постановка задач и методики проведения исследования, редактирование материала статьи.

Нгуен Куанг Хай. Постановка задач и методик проведения исследования, обзор предшествующих исследований, подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных, подготовка материала для статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Zorin V.A. Organization of the authorship team, designing the research concept, the research problem identification, setting research objectives and methodology, editing the manuscript.

Nguyen Q.H. Setting research objectives and methodology, state-of-the-art analysis, conducting experiments, processing the data obtained, writing the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нгуен Куанг Хай – аспирант кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, г. Москва, Ленинградский проспект, 64).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7713-915X>,

e-mail: nguyenquanghai2796@gmail.com

Зорин Владимир Александрович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожно-строительных машин» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, г. Москва, Ленинградский проспект, 64).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7392-8318>,

SPIN-код: 5612-1652,

e-mail: madi-dm@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nguyen Quang Hai – postgraduate student, Department of Automobile and Road Machinery Manufacturing and Maintenance, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (64, Leningradsky Prospect, Moscow, 125319).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7713-915X>,

e-mail: nguyenquanghai2796@gmail.com

Zorin Vladimir Alexandrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automobile and Road Machinery Manufacturing and Maintenance, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (64, Leningradsky Prospect, Moscow, 125319).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7392-8318>,

SPIN-code: 5612-1652,

e-mail: madi-dm@list.ru

Научная статья

УДК 625.08:624.131

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-402-414>

EDN: JYOVGF



МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА ДОРОЖНОГО КАТКА С УПЛОТНЯЕМОЙ ГРУНТОВОЙ СРЕДОЙ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

С.В. Савельев¹, В.В. Михеев², И.К. Потеряев¹ ✉, А.С. Савельев¹

¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия

²Омский государственный технический университет (ОмГТУ),
г. Омск, Россия

✉ ответственный автор
ilya_poter@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена изучению особенностей моделирования процесса взаимодействия вибровальца с деформируемым грунтом при уплотнении технологических слоев автодороги.

Методы и материалы. Производится математическое моделирование колебательной системы «вибровалец катка – деформируемая среда», заключающееся в построении системы дифференциальных уравнений, описывающих взаимодействующие элементы системы. Система включает в себя массивные тела, обладающие различными совокупностями упругих, вязких и фрикционных свойств. Эти свойства соответствуют реологическим характеристикам рабочего органа катка и деформируемой им грунтовой среды.

Результаты. Представлены системы дифференциальных уравнений движения колеблющихся масс, позволяющие выявить особенности процесса уплотнения грунтов вибровальцами. На основе анализа уравнений систем выявлены параметры энергоэффективных режимов уплотнения и проведена их оценка с учетом известной зависимости коэффициента вязкого трения деформируемого грунта от влияния внешней деформирующей силы.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования комплекса эксплуатационных параметров рациональных режимов работы виброкатка на различных этапах уплотнения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: каток, уплотнение, грунт, коэффициент уплотнения, автомобильная дорога, деформация, энергоэффективность, уплотнение

Статья поступила в редакцию 07.10.2025; одобрена после рецензирования 24.03.2026; принята к публикации 15.06.2026.

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: Савельев С.В., Михеев В.В., Потеряев И.К., Савельев А.С. Математические модели взаимодействия рабочего органа дорожного катка с уплотняемой грунтовой средой с точки зрения энергоэффективности // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 3. С. 402-414. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-402-414>

© Савельев С.В., Михеев В.В., Потеряев И.К., Савельев А.С., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-402-414>

EDN: JYOVGF

MATHEMATICAL MODELS OF INTERACTION BETWEEN OPERATING EQUIPMENT OF ROAD ROLLER AND COMPACTED SOIL IN TERMS OF ENERGY EFFICIENCY

Sergey V. Savelyev¹, Vitaly V. Mikheyev², Ilya K. Poteyaev¹ ✉, Andrey S. Savelyev¹

¹Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia,

²Omsk State Technical University,
Omsk, Russia,

✉ corresponding author
ilya_poter@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. This article is devoted to modeling interaction between a vibratory drum and soil under deformation during compaction of roadbed layers.

Methods and Materials. Mathematical modeling of the roller vibratory drum-deformable medium oscillatory system is presented. This modeling involves building a system of differential equations which describes interacting elements of the oscillatory system. The system includes massive bodies with rigid and viscous properties; the latter comply with the rheological characteristics of the roller drum and the soil compacted.

Results. Systems of differential equations for vibrating mass motion are presented, enabling to determine the average vibration acceleration values within the volume of compacted soil. The obtained dependences of the viscous friction coefficient of the deformable soil on the influence of an external deforming force are presented.

Discussion and Conclusion. The results obtained can be used to substantiate rational operating parameters of vibratory roller modes at various compaction stages.

KEYWORDS: roller, compaction, soil, compaction coefficient, highway, deformation, energy efficiency, compaction

The article was submitted: October 07, 2025; **approved after reviewing:** March 24, 2026; **accepted for publication:** June 15, 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: Savelyev S.V., Mikheyev V.V., Poteyaev I.K., Savelyev A.S. Mathematical models of interaction between operating equipment of road roller and compacted soil in terms of energy efficiency. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (3): 402-414. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-402-414>

© Savelyev Sergey V., Mikheyev Vitaly V., Poteyaev Ilya K., Savelyev Andrey S., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог – это ответственная и сложная технологическая операция. Качество выполнения работ при данной операции напрямую влияет на работоспособность и долговечность автодороги [1, 2]. Уплотнение грунтов земляного полотна осуществляется дорожными катками, вследствие большого разнообразия типов грунтов применяются различные типы катков. Еще одним фактором, усложняющим операцию уплотнения, является то, что в процессе уплотнения обычно используют сразу несколько типоразмеров уплотняющей техники [2, 3]. Обоюдность и взаимосвязанность данных факторов усложняют определение эффективных режимных и конструктивных параметров дорожных машин¹. Особенно ярко это проявляется при обосновании параметров новых конструкций дорожных катков, для которых ещё нет достаточной статистики по производству работ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для выявления рациональных конструктивных и технологических рекомендаций по использованию дорожных катков необходимо проводить не только экспериментальные, но и теоретические исследования. При помощи методов математического моделирования возможно выявить эффективные режимы работы уплотнителя в зависимости от физико-механических характеристик деформируемых дорожных материалов [4, 5]².

Кинетика деформирования грунтовой среды дорожными катками может быть формализована в виде представления физи-

ко-механических свойств грунтов реологическими моделями, отражающими их наиболее существенные характеристики при уплотнении. Формально уплотняемый грунт можно описать в виде упруговязкопластичной среды [6, 7]:

$$\sigma_{el} + \sigma_{pl} + \sigma_v = (F_o \sin \omega t + F_{cm}) / S, \quad (1)$$

где σ_{el} – напряжения, обусловленные упругими деформациями, Па (реологическая модель Гука); σ_{pl} – напряжения, обусловленные пластическими деформациями, Па (реологическая модель Сен-Венана); σ_v – напряжения, обусловленные вязким сопротивлением деформированию, Па (реологическая модель Ньютона); ω – частота колебаний, с⁻¹; F_o – амплитуда вынуждающей силы, Н; $F_{cm} = Mg$ – сила тяжести РО, Н; S – площадь пятна контакта, м².

Представленные реологические модели имеют широкое применение [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17], причём в зависимости от условий и режимов взаимодействия в системе «уплотняемый грунт – рабочий орган уплотнителя» её конкретные элементы будут формироваться в виде различных наборов вышеуказанных реологических тел [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30].

Рассмотрим модель взаимодействия рабочих органов катков с деформируемыми грунтовыми средами (рисунок 1). Модель описывает деформирование слоя грунта, подвергаемого воздействию от рабочего органа катка. При превышении на поверхности грунтового слоя напряжения, соответствующего пределу текучести, упругие деформации отсутствуют (грунт реализован массивным телом Сен-Венана с вязкостью).

¹ Определение параметров и режимов уплотнения дорожных катков: учебное пособие / Г.В. Кустарев, В.И. Баловнев, Р.Г. Данилов, С.А. Павлов. М.: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2022. 142 с.

² СП 34.13330.2021 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85. [Электронный ресурс]. URL: <http://rosdomii.novateh.ru/docs/> (дата обращения: 03.10.2025).

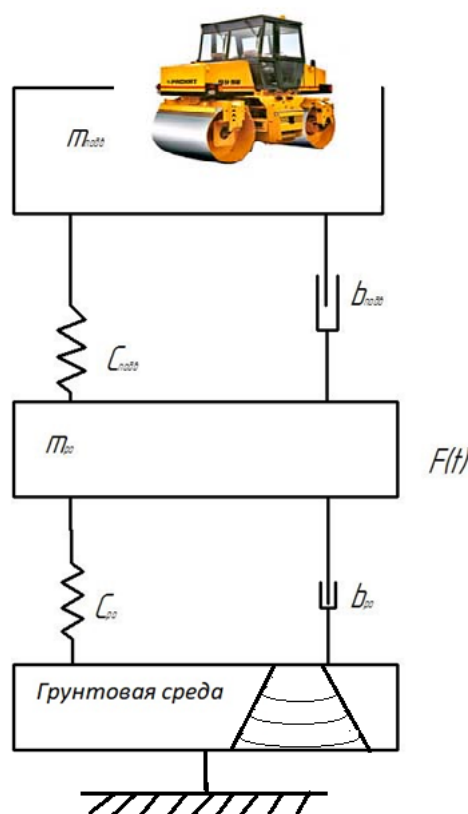


Рисунок 1 – Модель взаимодействия РО уплотнителя с грунтовой средой (в общем случае деформируемого)
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Model of interaction of the drum and the soil (deformable, in the general)
Source: compiled by the authors.

$$\begin{cases} m_{PO}\ddot{z}_{PO} = -c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1) - b_{PO}(z_{PO})\dot{z}_{PO} + F_{ext}(t) \\ m_1(t)\ddot{z}_1 = c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1)(1 - \theta(\sigma - \sigma_{pl})) - b_1(z_1)(\dot{z}_1) - \frac{\dot{z}_1}{|\dot{z}_1|}\theta(\sigma - \sigma_{pl})S_{cont}(t)\sigma_{pl} \end{cases} \quad (2)$$

Здесь введены следующие обозначения, сохраняющиеся в дальнейшем:

m_{PO} – масса рабочего органа; c_{PO} – жёсткость рабочего органа; b_{PO} – вязкость рабочего органа; $F_{ext}(t)$ – величина внешней силы, воздействующей на грунт; z_{PO} – координата центра масс рабочего органа; m_1 – масса уплотняемой области грунта, непосредственно взаимодействующей с РО; b_1 – вязкость уплотняемой области грунта; z_1 – координата центра масс уплотняемой области грунта; σ – контактное давление; σ_{pl} – предел текучести грунта; $S_{cont}(t)$ – площадь пятна контакта рабочего органа с грунтом. Величины, характеризующие силы сопротивления грунта деформированию, считаются зависящими от величины деформации,

описывая самый общий случай взаимодействия грунта с РО.

Рассмотрим следующий случай (система (3)): область грунтового слоя деформируется как единый упруговязкопластичный элемент. Накопленная неупругая деформация полностью сохраняется (грунт представлен массивным линейно деформируемым вязким телом) [8, 9, 10]. В таком состоянии грунтовая среда накапливает пластические деформации, однако не так интенсивно, как в случае, описываемом системой (2). При этом реализация параметров катка режимов обработки среды, приводящие среду в указанный тип напряжённо-деформируемого состояния (НДС), являются вполне достижимыми.

$$\begin{cases} m_{PO}\ddot{z}_{PO} = -c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1) - b_{PO}(z_{PO})\dot{z}_{PO} + F_{ext}(t) \\ m_1(t)\ddot{z}_1 + \frac{dm_1(t)}{dt}\dot{z}_1 = c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1) - \text{sign}(\sigma)c_1z_1 - b_1(z_1)(\dot{z}_1) \end{cases}, \quad (3)$$

c_1 – жесткость уплотняемой области грунта по отношению к деформации сжатия.

Далее рассмотрим систему, когда материал слоя деформируется рабочим органом как единый упруговязкий элемент (грунт реализован телом Кельвина – Фойгта). Данная система не соответствует энергоэффективному уплотнению, обеспечивая диссипацию энергии уплотнителя на преодоление вязких сил сопротивления. При попытках подбора частотного параметра энергоэффективного режима возможно возникновение нежелательных резонансных явлений или переход к вибротрамбованию.

$$\begin{cases} m_{PO}\ddot{z}_{PO} = -c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1) - b_{PO}(z_{PO})\dot{z}_{PO} + F_{ext}(t) \\ m_1(t)\ddot{z}_1 + \frac{dm_1(t)}{dt}\dot{z}_1 = -c_1(z_1)z_1 - b_1(z_1)\dot{z}_1 \end{cases}, \quad (4)$$

c_1 – жесткость уплотняемой области грунта.

Подобные модели весьма часто встречаются при интегрировании уравнений динамики уплотняемого материала для активной области слоя [8, 9, 10]. Ее реализация в технологическом процессе является нежелательной, поскольку интенсивной обработке грунтового слоя с накоплением пластических деформаций подвергается только околоповерхностный участок деформируемого слоя, а нижняя часть слоя деформируется квазиупруго (неравномерно в зависимости от нагружения или разгрузки). Параметры работы катка, обеспечивающие такое НДС грунта, не являются энергоэффективными. Чаще всего это происходит при неправильном выборе толщины уплотняемого слоя. Теоретическое рассмотрение энергоэффективности уплотнения в рамках модели Кельвина – Фойгта принципиально невозможно, поскольку неупругие деформации в ней отсутствуют и для их рассмотрения привлекаются дополнительные методы. Несмотря на это, движение массы грунтовой среды, взаимодействующей с РО катка, описывается удовлетворительно.

$$\begin{cases} m_{PO}\ddot{z}_{PO} = -c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1) - b_{PO}(z_{PO})\dot{z}_{PO} + F_{ext}(t) \\ m_1(t)\ddot{z}_1 = c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1)(1 - \theta(\sigma - \sigma_{fl})) - b_1(z_1 - z_2)(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{|\dot{z}_1 - \dot{z}_2|} \theta(\sigma - \sigma_{fl})S_{cont}(t)\sigma_{pl} \\ m_2(t)\ddot{z}_2 = \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{|\dot{z}_1 - \dot{z}_2|} \theta(\sigma - \sigma_{pl})S_{cont}(t)\sigma_{pl} - c_{2qel}(z_2)(z_2) - b_2(z_2)(\dot{z}_2) \end{cases}, \quad (5)$$

где z_2 – координата центра масс области грунта, деформируемой как упруго-вязкое тело; m_2 – масса области грунта, деформируемой как упруго-вязкое тело; c_{2qel} – жесткость области грунта, деформируемой как упруго-вязкое тело; b_2 – вязкость области грунта, деформируемой как упруго-вязкое тело.

Рассмотрим более общую модель (система (6)), в которой приповерхностный участок слоя, взаимодействующий с рабочим органом катка, деформируется как массивное тело Сен-Венана. Следующий участок по глубине слоя полностью сохраняет линейные по напряжению пластические деформации. Режим работы катка, обеспечивающий динамику активной области слоя, отличается высокой энергоэффективностью. Практически вся энергия уплотняющего воздействия уходит на преодоление сил сцепления между частицами грунта в ходе неупругого деформирования.

$$\begin{cases} m_{PO}\ddot{z}_{PO} = -c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1) - b_{PO}(z_{PO})\dot{z}_{PO} + F_{ext}(t) \\ m_1(t)\ddot{z}_1 = c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1)(1 - \theta(\sigma - \sigma_{fl})) - \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{|\dot{z}_1 - \dot{z}_2|} \theta(\sigma - \sigma_{fl}) S_{cont}(t) \sigma_{pl} , \\ m_2(t)\ddot{z}_2 = \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{|\dot{z}_1 - \dot{z}_2|} \theta(\sigma - \sigma_{pl}) S_{cont}(t) \sigma_{pl} - c_{2d}(z_2)(z_2) \text{sign}(\sigma) - b_2(z_2)(\dot{z}_2) \end{cases} \quad (6)$$

c_{2d} – жесткость второй области грунта по отношению к деформации сжатия.

Трехмассовая модель (система (7)), в которой поверхность уплотняемого слоя напрямую взаимодействует с рабочим органом катка, деформируется в соответствии с моделью Сен-Венана. Следующий по глубине слоя массивный элемент – с частичным сохранением линейных по напряжению пластических деформаций. Режим уплотнения, когда уплотняемая среда переводится в состояние, аналогичное рассматриваемой модели, более энергозатратен, чем в предыдущем случае. Различие в полезной работе уплотнителя на данном режиме по отношению к предыдущему случаю определяется энергией, расходуемой на восстановление упругих деформаций второго массивного тела.

$$\begin{cases} m_{PO}\ddot{z}_{PO} = -c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1) - b_{PO}(z_{PO})\dot{z}_{PO} + F_{ext}(t) \\ m_1(t)\ddot{z}_1 = c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1)(1 - \theta(\sigma - \sigma_{fl})) - \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{|\dot{z}_1 - \dot{z}_2|} \theta(\sigma - \sigma_{fl}) S_{cont}(t) \sigma_{pl} . \\ m_2(t)\ddot{z}_2 = \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{|\dot{z}_1 - \dot{z}_2|} \theta(\sigma - \sigma_{pl}) S_{cont}(t) \sigma_{pl} - c_{2d}(z_2)(z_2) - b_2(z_2)(\dot{z}_2) \end{cases} \quad (7)$$

Далее представлена система уравнений динамики (8), взаимодействующего рабочего органа катка и активной области грунтового слоя, которая описывает нежелательную, но тем не менее часто реализуемую ситуацию образования грунтового ядра. Это приповерхностная область слоя деформируется как массивное упруго-вязкое тело Кельвина – Фойгта, образуя условное ядро. Область слоя, которая находится под ним, накапливает пластическую деформацию как вязкопластичное тело Сен-Венана. Уплотнение грунтового слоя, находящегося в состоянии, описываемом данной моделью, не может считаться энергоэффективным, поскольку значительная доля энергии рассеивается за счет вязкости ядра. Однако если конструктивные особенности катка не позволяют избежать такого состояния слоя, то для повышения эффективности процесса могут быть использованы резонансные свойства грунтового ядра:

$$\begin{cases} m_{PO}\ddot{z}_{PO} = -c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1) - b_{PO}(z_{PO})\dot{z}_{PO} + F_{ext}(t) \\ m_1(t)\ddot{z}_1 + \frac{dm_2(t)}{dt} \dot{z}_1 = -c_{1gel}(z_1)(z_1 - z_2) - b_1(z_1 - z_2)(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) \\ m_2(t)\ddot{z}_1 = c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_2)(1 - \theta(\sigma - \sigma_{fl})) - b_2(z_2)(\dot{z}_2) - \frac{\dot{z}_2}{|\dot{z}_2|} \theta(\sigma - \sigma_{fl}) S_{cont}(t) \sigma_{pl} \end{cases} \quad (8)$$

Следующая модель, в виде уравнений динамики (9), также учитывает образование грунтового ядра в приповерхностном участке активной области слоя. Нижний участок отвечает линейному по напряжению деформированию с полным восстановлением упругих деформаций. В случае неизбежности образования ядра, как и в предыдущем случае, его негативное влияние на энергоэффективность процесса уплотнения может быть частично нейтрализовано корректировкой частоты колебаний рабочего органа уплотнителя. Необходимо учитывать резонансные характеристики колебательной системы.

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{PO} \ddot{z}_{PO} = -c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1) - b_{PO}(z_{PO}) \dot{z}_{PO} + F_{ext}(t) \\ \\ m_1(t) \ddot{z}_1 = -c_{1_{gel}}(z_1)(z_1 - z_2) - b_1(z_1 - z_2)(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) \\ m_2(t) \ddot{z}_2 = \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{|\dot{z}_1 - \dot{z}_2|} \theta(\sigma - \sigma_{pl}) S_{cont}(t) \sigma_{pl} - c_{2d}(z_2)(z_2) \text{sign}(\sigma) - b_2(z_2)(\dot{z}_2) \end{array} \right. \quad (9)$$

Всё описание, приведенное для предыдущей системы, относится к случаю образования грунтового ядра (система (10)). Первый – это элемент Кельвина – Фойгта, второй элемент уже с частичным восстановлением

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{PO} \ddot{z}_{PO} = -c_{PO}(z_{PO})(z_{PO} - z_1) - b_{PO}(z_{PO}) \dot{z}_{PO} + F_{ext}(t) \\ \\ m_1(t) \ddot{z}_1 = -c_{1_{gel}}(z_1)(z_1 - z_2) - b_1(z_1 - z_2)(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) \\ m_2(t) \ddot{z}_2 = \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{|\dot{z}_1 - \dot{z}_2|} \theta(\sigma - \sigma_{pl}) S_{cont}(t) \sigma_{pl} - c_{2d}(z_2)(z_2) - b_2(z_2)(\dot{z}_2) \end{array} \right. \quad (10)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результатами использования методов математического моделирования процесса взаимодействия рабочих органов катков с деформируемыми средами будут рационально обоснованные габаритно-массовые и режимные параметры уплотняющей техники. Масса и геометрические характеристики, а также деформативные свойства вальца определяют, прежде всего, площадь пятна контакта с уплотняемой средой, создаваемые контактные давления и, как следствие, обрабатываемый объем грунта. Существующие модели гладковальцовых грунтовых катков как отечественные, так и зарубежные, обладают схожими массогабаритными параметрами. Радиус вальца варьируется от 0,4 до 0,8 м, ширина от 1,4 до 2,4 м, масса от 500 до 3000 кг.

При определении динамической вязкости грунтовой среды для представленных моделей могут быть использованы полиномиальные зависимости, аппроксимирующие экспериментальные данные, полученные проф. Д.Д. Барканом, С.В. Вяловым, Н.Я. Хархутой [27, 31, 32]. Полученные уравнения регрессии представлены на рисунке 2.

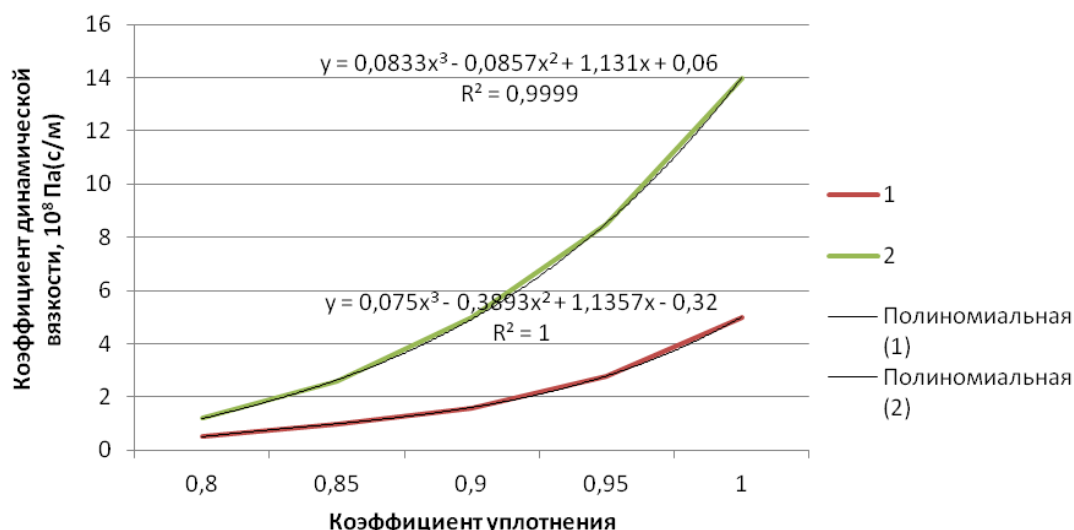


Рисунок 2 – Аппроксимационные зависимости динамической вязкости грунтов при работе катка:
1 – суглинок; 2 – супесь
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Approximation dependences of soil dynamic viscosity during roller operation:
1 – loam, 2 – sandy loam
Source: compiled by the authors.

В качестве критериев эффективности вибрационного уплотнения вальцом катка грунтовой среды, описываемой конкретной моделью (из представленных выше), предлагается выбрать соотношение полной энергии вынужденных колебаний среды и энергии, затраченной на неупругое деформирование. Для области грунта, реализованной телом Кельвина – Фойгта (с возможностью пластического деформирования), величиной, определяющей полную деформацию грунта при вибрационном нагружении, является его полное сопротивление деформированию (механический импеданс)

$$Z = m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + k^2\omega^2},$$

где $\omega_0^2 = c/m$ – собственная частота системы при отсутствии вязкого трения, $k = b/m$; ω – циклическая частота приложения периодической силы.

Таким образом, остаточная неупругая деформация Δz_{res} может быть определена через модуль вынуждающей силы

$$\Delta z_{res} = \alpha \Delta z_{max} = \frac{\alpha F_0}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + k^2\omega^2}},$$

где коэффициент α задается соотношением модуля упругой E_{el} и неупругой E_{pl} деформации следующим образом:

$$\alpha = \frac{E_{pl}}{E_{pl} + E_{el}}.$$

Тем самым доля работы, затраченной на пластическое деформирование, может быть определена как

$$W_{pl} = \frac{c_{pl}(\alpha \Delta z_{max})^2}{2}.$$

В свою очередь полная энергия, передаваемая колеблющейся массе грунта,

$$W_{tot} = \frac{m(\Delta z_{max}\omega)^2}{2}.$$

Доля энергии, затраченной на пластическое деформирование, есть

$$\eta = \frac{W_{pl}}{W_{tot}} = \frac{c_{pl}\alpha^2}{m\omega^2}.$$

В том случае, если область грунта находится в состоянии, когда неупругое деформирование реализуется посредством элемента сухого трения Сен-Венана, как, например, в системе (2), притом, что допускается также упругое деформирование до перехода контактного давления за предел пластичности.

Полная работа внешних сил, затраченная на деформацию грунта массы m , складывается из работы W_{el} упругого деформирования элемента Гука жесткости c_{el} при возрастании внешней силы до величины F_0 и работы W_{pl} неупругого деформирования при дальнейшем возрастании внешней силы до величины F_{np} , соответствующей пределу прочности грунта.

Оценим соотношение этих работ для выявления энергоэффективности. Работа по преодолению линейной по деформации упругой силы сопротивления есть

$$W_{el} = \frac{F_0^2}{2c_{el}}.$$

Дальнейшее увеличение внешней силы до F_{np} за время T приведет к совершению работы, равной

$$W_{pl} = \frac{F_0^2 T^2}{2m} \left(1 + \left(\frac{F_{np}}{F_0} - 1 \right) \frac{T}{2} \right)^2,$$

что дает долю энергии, затраченной на пластическое деформирование

$$\eta = \frac{W_{pl}}{W_{tot}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{F_{np}}{F_0} - 1 \right) \frac{T}{2} \right)^2}{\frac{m}{c_{el}T^2} + \left(1 + \left(\frac{F_{np}}{F_0} - 1 \right) \frac{T}{2} \right)^2}.$$

Для проведения численного анализа предлагается использовать численные зависимости динамических характеристик супеси и суглинка, графически представленные на рисунках 2, 3, 4, 5 и их аналитические выражения.

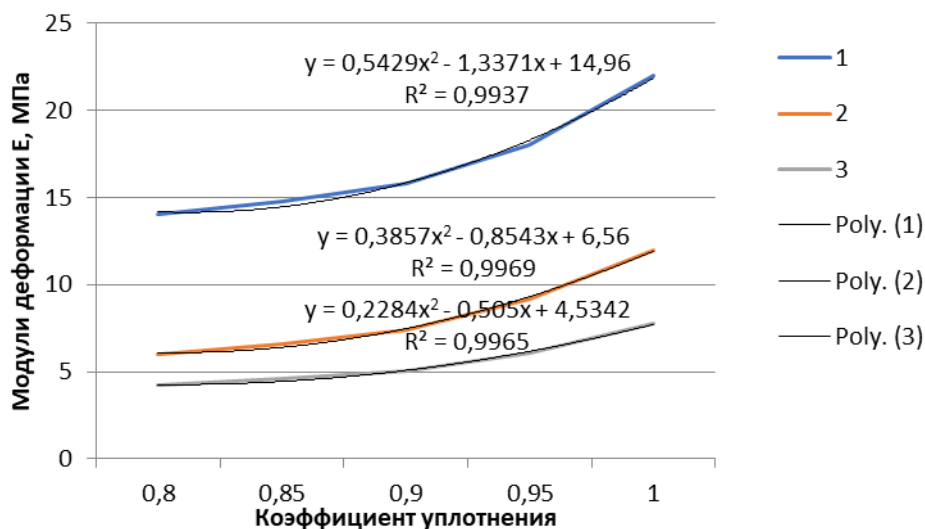


Рисунок 3 – Аппроксимационные зависимости модулей деформации супеси от стадии уплотнения при работе катка:
 1 – модуль Юнга; 2 – модуль пластической деформации; 3 – модуль полной деформации
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Approximation relationships between deformation moduli for sandy loam and compaction stage during roller operation:
 1- modulus of elasticity, 2 - plastic deformation modulus, 3 - total deformation modulus
 Source: compiled by the authors.

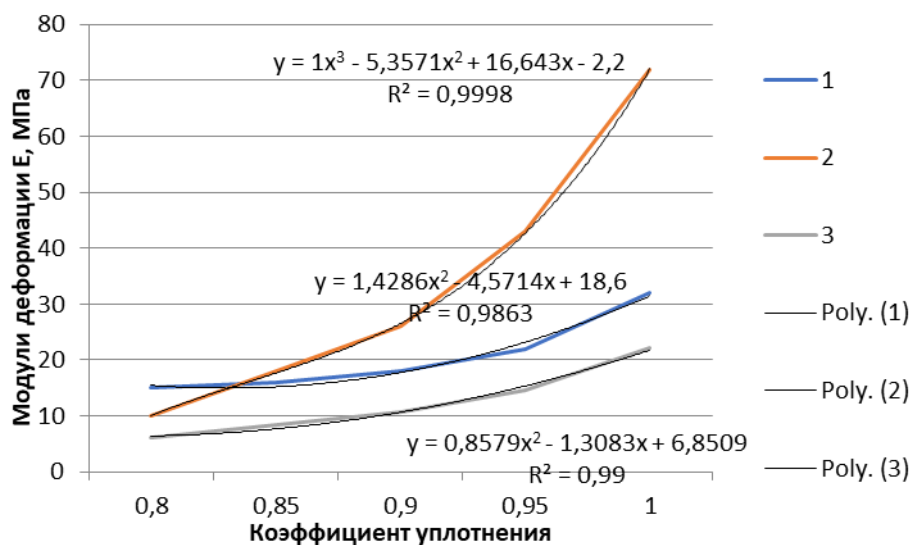


Рисунок 4 – Аппроксимационные зависимости модулей деформации суглинка от стадии уплотнения при работе катка:
 1 – модуль Юнга; 2 – модуль пластической деформации; 3 – модуль полной деформации
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Approximation relationships between loam deformation moduli and compaction stage during roller operation:
 1 – modulus of elasticity, 2 – plastic deformation modulus, 3 – total deformation modulus
 Source: compiled by the authors.

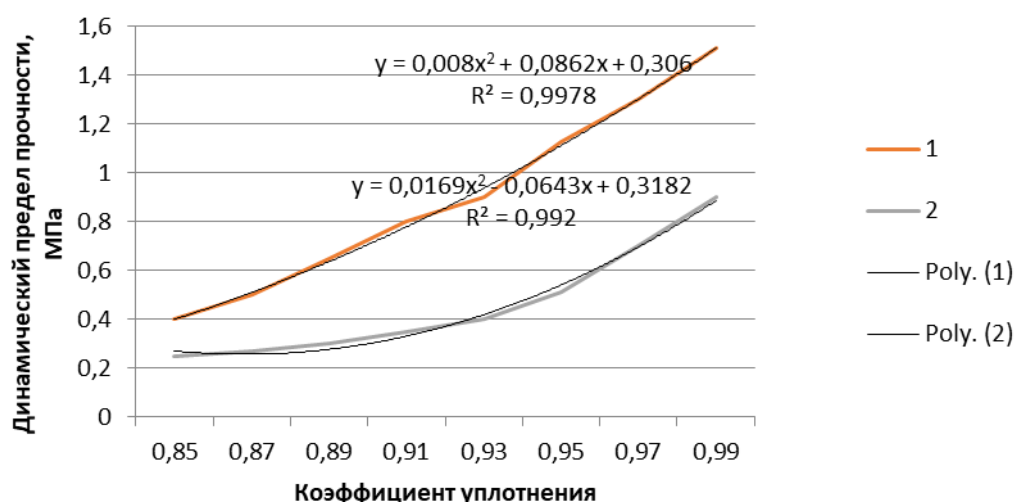


Рисунок 5 – Аппроксимационные зависимости динамического предела прочности грунтов при работе катка:
1 – суглинок; 2 – супесь
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Approximation relationships of dynamic soil tensile strength during roller operation:
1– loam, 2 – sandy loam
Source: compiled by the authors.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ процесса деформирования уплотняемых сред дорожными катками и разработанная математическая модель могут быть использованы при определении параметров режимов работы уплотняющей машины и массово-габаритных характеристик рабочих органов, соответствующих оптимальному с точки зрения энергоэффективности процессу уплотнения.

Исследования проводятся при поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) и Правительства Омской области № 23–29–10010 на тему «Разработка дорожных катков для повышения эффективности транспортного строительства с учетом региональных условий Омской области».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тюремнов И.С. Анализ технических характеристик различных типов ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6(94):706–716. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>. EDN IGOKXE.
2. Савельев С.В., Пермяков В.Б., Михеев В.В., Потеряев И.К. Инновационная уплотняющая техника и рекомендации по её использованию для ресурсосберегающих технологий дорожного строительства. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2019. 193 с.

3. Шишкин Е.А., Иванченко С.Н., Сидорков В.В. [и др.]. Исследование взаимосвязи конструктивных и технологических параметров вибрационных и осцилляционных катков // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. № 2. С. 183–188.

4. Зайченко С.В. Исследование реологических характеристик грунтовых и бетонных смесей при их уплотнении // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2014. № 7:112–119.

5. Mikheyev V.V., Saveliev S.V., Permyakov V.B. Complex approach to the optimal energy efficient work pattern for vibratory roller // Journal of Physics: Conference Series, Omsk, 23–24 апреля 2019 года. Vol. 1260, 11. Omsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 112020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/11/112020>

6. Баженов В.Г., Котов В. Л. Математическое моделирование нестационарных процессов удара и проникания осесимметричных тел и идентификация свойств грунтовых сред. М : ФИЗМАТЛИТ, 2011. 208 с.

7. Козлов В.В. Лагранжева механика и сухое трение // Нелинейная динамика. 2010. Т. 6, № 4:855–868.

8. Тарасов В.Н., Бояркина И.В., Серебrenников В.С. Модуль деформации грунтов при уплотнении дорожным катком легкого типа // Строительные и дорожные машины. 2019. № 3:25–30.

9. Савельев С.В., Михеев В.В. Исследования деформирования упруго-вязкой среды при ударном нагружении // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2012. № 4(26):100–103.

10. Paulmichl I., Adam Ch., Adam D. Analytical modeling of the stick-slip motion of an oscillation

- drum // *Acta Mechanica*. 2019. Vol. 230, No. 9:3103-3126. <https://doi.org/10.1007/s00707-019-02454-3>. EDN VQNCJJ.
11. Yuan Ma, Wei Lu, Ying-cheng Luan, Tao Ma, Chuan-le Wang. Research on global optimization mechanism of intelligent compaction parameters of soil subgrade based on difference method // *Journal of Building Engineering*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108381>
12. Мотова М.И., Шалфеев В.Д. От теории колебаний – к нелинейной динамике // *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика*. 2014. Т. 22, № 1:93–103. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2014-22-1-93-103>. EDN SWKELJ.
13. Qinwu Xu, George K. Chang. Evaluation of intelligent compaction for asphalt materials // *Automation in Construction*. 2013. 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.015>
14. Ma Y., Chen F., Ma T., Huang X., Zhang Y. Intelligent compaction: An improved quality monitoring and control of asphalt pavement construction technology // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021. Т. 23. № 9:14875-14882.
15. Xu C., Chen Z., Li J., Xiao Y. Compaction of subgrade by high-energy impact rollers on an airport runway // *Journal of performance of constructed facilities*. 2014. Т. 28. № 5. Pp. 04014021.
16. Stepień J, Chomicz-Kowalska A, Tutaj-Dudala M, Dudala M, Maciejewski K, Ramiaczek P, Iwanski MM. Influence of Compaction Methods on Properties of Roller-Compacted Concrete Pavement Wearing Surfaces. *Materials*. 2025; 18(3):492. <https://doi.org/10.3390/ma18030492>
17. Shi M., Wang J., Li Q., Cui Bo., Guan Sh., Zeng T. Accelerated earth-rockfill dam compaction by collaborative operation of unmanned roller fleet // *Journal of Construction Engineering and Management*. 2022. Т. 148. № 7. Pp. 04022046.
18. Jiao Yu., Zhao R., Chen Ye.H., Jiao Sh., Zhang X. A switched servo constraints control for the smart vibratory roller in unmanned compaction // *Automation in Construction*. 2023. Т. 152. Pp. 104883.
19. Головин О.В. Вибрационные машины // *Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: сборник докладов, Белгород, 20–21 мая 2024 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. С. 48–52. EDN XPTLQV.*
20. Савельев С.В., Сачук Ю.С., Литовченко Р.Е. Обоснование параметров вибрационного пневмошинного катка для уплотнения грунтов при строительстве автодорог // *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. 2023. № 2(73). С. 33–39. EDN GYZEFE.
21. Jonsson A. Modelling, simulation and experimental investigation of a rammer compactor machine // *Department of Mechanical Engineering Blekinge Institute of Technology, Sweden, 2001. 24 p.*
22. Зеленков Г.А., Каратаева Н.Г. Математическое моделирование в процессе формирования профессиональных компетенций // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2014. Т. 10, № 5-2. С. 76–79. EDN UHGVPF.
23. Савельев С.В., Михеев В.В., Сачук Ю.С. Эффективность использования вибрации в пневмошинных дорожных катках при устройстве автомобильных дорог // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023. № 12. С. 640–644. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-12-640-641>. EDN XVSTAZ.
24. Yao Y., Ruan Y., Chen J., Geng Y. Research on a real-time monitoring platform for compaction of high embankment in airport engineering // *Journal of Construction Engineering and Management*. 2018. Т. 144. № 1. С. 04017096.
25. Zhang X., Luo T., Song Er.Bo., Geng Yi. Algorithm for optimal path planning of impact roller in high-embankment airport // *Japanese Geotechnical Society Special Publication*. 2020. Т. 8. № 5:159-163.
26. Kuenzel R., Mueller M., Teizer J., Blickle A. SmartSite: Intelligent and autonomous environments, machinery, and processes to realize smart road construction projects // *Automation in Construction*. 2016. Т. 71:21-33.
27. Шишкин Е.А. Метод расчета фазового угла между вынуждающей силой вибровозбудителя и перемещением вальца // *Вестник СибАДИ*. 2024. Т. 21, № 3(97):388–394. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-388-394>. EDN HQAJCW.
28. Тюремнов И.С., Шорохов Д.А. Моделирование взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2024. Т. 21, № 2(96). С. 202–216. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216>. EDN BSOEFX.
29. Тюремнов И.С., Игнатъев А.А., Филатов И.С. Статистический анализ технических характеристик грунтовых вибрационных катков // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2014. № 3(34). С. 81–88. EDN STVNAD.
30. Xuefei Wang, Xiangdong Li, Jiale Li, Jianmin Zhang, Guowei Ma. Training strategy and intelligent model for in-situ rapid measurement of subgrade compactness // *Automation in Construction*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105581>.
31. Речицкий А.С., Речицкий С.В. Сравнительный анализ уплотнения дорожными катками с различными рабочими органами // *Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта*. 2024. № 1(12):79–85. https://doi.org/10.52170/2712-9195_2024_1_79. EDN FINDAC.
32. Клигунова З.А., Шишкин Е.А., Клигунов Е.С. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния грунта в процессе уплотнения дорожным катком // *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2024. № 25: 67–72. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-25-67-72>. EDN SGRHRN.

REFERENCES

1. Tjurenov I.S. Analiz tehnikeskikh harakteristik razlichnyh tipov udarno-vibracionnyh grun-

- touplotnjajushhih mashin. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*. 2023; T. 20, № 6(94):706-716. (in Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>. EDN IGOKXE.
2. Saveliev S.V., Permyakov V.B., Mikheev V.V., Poteryaev I.K.. Innovative compaction equipment and recommendations for its use for resource-saving technologies in road construction. Omsk: Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), 2019; 193 p. (in Russ.)
 3. Shishkin E.A., Ivanchenko S.N., Sidorkov V.V. [et al.] Study of the relationship between the design and technological parameters of vibratory and oscillating rollers. *Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University*. 2021; No. 2. P. 183-188. (in Russ.)
 4. Zaychenko S.V. Study of rheological characteristics of soil and concrete mixtures during their compaction. News of higher educational institutions. *Mining journal*. 2014; No. 7. P. 112-119. (in Russ.)
 5. Kligunova Z.A., Shishkin E.A., Kligunov E.S. Matematicheskoe modelirovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojaniya grunta v processe uplotneniya dorozhnym katkom. *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo*. 2024; № 25. S. 67-72. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-25-67-72>. EDN SGRHRN.
 6. Bazhenov V.G., Kotov V.L. Mathematical modeling of non-stationary processes of impact and penetration of axisymmetric bodies and identification of properties of soil media. M: FIZMATLIT, 2011; 208 p. (in Russ.)
 7. Kozlov V.V., Lagrangian mechanics and dry friction. *Nonlinear Dynamics*, 2010; Vol. 6, No. 4, pp. 855–868. (in Russ.)
 8. Tarasov V.N., Boyarkina I.V., Serebrennikov V.S. Soil deformation modulus during compaction by a light-duty road roller. *Construction and road machinery*. 2019; No. 3. P. 25-30. (in Russ.)
 9. Saveliev S.V., Mikheev V.V. Research of deformation of elastic-viscous medium under impact loading. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway Academy*. 2012; No. 4 (26). P. 100-103. (in Russ.)
 10. Paulmichl I., Adam Ch., Adam D. Analytical modeling of the stick-slip motion of an oscillation drum. *Acta Mechanica*. 2019; Vol. 230, No. 9:3103-3126. <https://doi.org/10.1007/s00707-019-02454-3>. EDN VQNCJJ.
 11. Yuan Ma, Wei Lu, Ying-cheng Luan, Tao Ma, Chuan-le Wang. Research on global optimization mechanism of intelligent compaction parameters of soil subgrade based on difference method. *Journal of Building Engineering*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108381>
 12. Motova M.I., Shalfeev V.D. Ot teorii kolebanij - k nelinejnoj dinamike. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Prikladnaja nelinejnaja dinamika*. 2014. T. 22, № 1. S. 93-103. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2014-22-1-93-103>. EDN SWKELJ. (in Russ.)
 13. Qinwu Xu, George K. Chang. Evaluation of intelligent compaction for asphalt materials. *Automation in Construction*. 2013. Pp. 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.015>
 14. Ma Y., Chen F., Ma T., Huang X., Zhang Y. Intelligent compaction: An improved quality monitoring and control of asphalt pavement construction technology. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021. T. 23. №. 96 14875-14882.
 15. Xu C., Chen Z., Li J., Xiao Y. Compaction of subgrade by high-energy impact rollers on an airport runway. *Journal of performance of constructed facilities*. 2014. T. 28. №. 5. Pp. 04014021.
 16. Stepien J., Chomicz-Kowalska A., Tutaj-Dudala M., Dudala M., Maciejewski K., Ramiaczek P., Iwanski MM. Influence of Compaction Methods on Properties of Roller-Compacted Concrete Pavement Wearing Surfaces. *Materials*. 2025; 18(3):492. <https://doi.org/10.3390/ma18030492>
 17. Shi M., Wang J., Li Q., Cui Bo., Guan Sh., Zeng T. Accelerated earth-rockfill dam compaction by collaborative operation of unmanned roller fleet. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2022. T. 148. № 7. Pp. 04022046.
 18. Jiao Yu., Zhao R., Chen Ye.H., Jiao Sh., Zhang X. A switched servo constraints control for the smart vibratory roller in unmanned compaction. *Automation in Construction*. 2023. T. 152. Pp. 104883.
 19. Golovin O.V. Vibracionnye mashiny. Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija molodyh uchenykh BGTU im. V.G. Shuhova : Sbornik dokladov, Belgorod, 20–21 maja 2024 goda. Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova, 2024; S. 48-52. EDN XPTLQV. (in Russ.)
 20. Savel'ev S.V., Sachuk Ju.S., Litovchenko R.E.. Obosnovanie parametrov vibracionnogo pnevmoshinnogo katka dlja uplotnenija gruntov pri stroitel'stve avtodorog. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta(MADI)*. 2023. №2(73). S.33-39. EDNGYZEFE. (in Russ.)
 21. Jonsson A. Modelling, simulation and experimental investigation of a rammer compactor machine. Department of Mechanical Engineering Blekinge Institute of Technology, Sweden, 2001. 24 p.
 22. Zelenkov G.A., Karataeva. N.G. Matematicheskoe modelirovanie v processe formirovaniya profesional'nyh kompetencij. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta*. 2014; T. 10, № 5-2. S. 76-79. EDN UHGVPF. (in Russ.)
 23. Savel'ev S.V., Miheev V.V., Sachuk Ju.S. Jefferktivnost' ispol'zovaniya vibracii v pnevmoshinnyh dorozhnyh katroh pri ustrojstve avtomobil'nyh dorog. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*. 2023; № 12. S. 640-644. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-12-640-641>. EDN XVSTAZ. (in Russ.)
 24. Yao Y., Ruan Y., Chen J., Geng Y. Research on a real-time monitoring platform for compaction of high embankment in airport engineering. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2018; T. 144. №. 1. C. 04017096.
 25. Zhang X., Luo T., Song Er.Bo., Geng Yi. Algorithm for optimal path planning of impact roller in high-embankment airport. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*. 2020; T. 8. №. 5. C. 159-163.

26. Kuenzel R., Mueller M., Teizer J., Blickle A. SmartSite: Intelligent and autonomous environments, machinery, and processes to realize smart road construction projects. *Automation in Construction*. 2016; T. 71. C. 21-33.

27. Shishkin E.A. The method for calculating phase angle between exciter force of vibration exciter and roller displacement. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(3): 388–394. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-388-394>. EDN: HQAJCW.

28. Tjurennov I.S., Shorohov D.A. Modelirovanie vzaimodejstviya vibracionnogo katka s uplotnjajemyim gruntom. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*. 2024; T. 21, № 2(96). S. 202-216. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216>. EDN BSOEFX. (in Russ.)

29. Tjurennov I.S., Ignat'ev A.A., Filatov I.S. Statisticheskij analiz tehnicheskikh harakteristik gruntovyh vibracionnyh katkov. *Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014; № 3(34). S. 81-88. EDN STVNAD. (in Russ.)

30. Xuefei Wang, Xiangdong Li, Jiale Li, Jianmin Zhang, Guowei Ma. Training strategy and intelligent model for in-situ rapid measurement of subgrade compactness. *Automation in Construction*. 2024; <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105581>

31. Rechitskiy A.S., Rechitskiy S.V. Comparative analysis of compaction by road rollers with different screeds Fundamental and applied transport issues. 2024; 1(12): 79–85. (In Russ.) https://doi.org/10.52170/2712-9195_2024_1_79. EDNFINDAC.

32. Kligunova Z.A., Shishkin E.A., Kligunov E.S. Mathematical modeling of the stress-strain state of the soil in the process of compaction by a road roller. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2024; 25: 67–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-25-67-72>. EDN SGRHRN.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Савельев С.В. Разработка модели и анализ результатов (25%).

Мухеев В.В. Разработка модели и анализ результатов (25%).

Потеряев И.К. Проведение обзора (25%).

Савельев А.С. Проведение обзора (25%).

CO-AUTHORS' CONTRIBUTION

Savelyev S.V. Development of the model and analysis of the results (25%).

Miheeov V.V. Development of the model and analysis of the results (25%).

Poteryaev I.K. Conducting the literature review (25%).

Savelyev A.S. Conducting the literature review (25%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Савельев Сергей Валерьевич – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (644050, г. Омск, пр. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4034-2457>,

Scopus Author: 57159787800,

Researcher ID: A-4081-2019,

SPIN-код: 4135-8370,

e-mail: saveliev_sergval@mail.ru

Мухеев Виталий Викторович – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Комплексная защита информации» Омского государственного технического университета (ОмГТУ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 11).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8881-5404>,

Scopus Author: 7102121335,

Researcher ID: S-5724-2016,

SPIN-код: 2272-6944,

e-mail: vvm125@mail.ru

Потеряев Илья Константинович – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (644050, г. Омск, пр. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4350-2495>,

Scopus Author: 57203586410,

Researcher ID: W-7052-2018,

SPIN-код: 3684-9850,

e-mail: poteryaev_ik@mail.ru

Савельев Андрей Сергеевич – студент Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (644050, г. Омск, пр. Мира, 5).

e-mail: savelevandrej914@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saveliev Sergey V. – Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor at the Department of Oil and Gas and Construction Machinery, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4034-2457>,

Scopus Author: 57159787800,

Researcher ID: A-4081-2019,

SPIN-code: 4135-8370,

e-mail: saveliev_sergval@mail.ru

Mikheev Vitaly V. – Dr. Sci. (Engineering), Assistant Professor, Professor at the Department of Comprehensive Information Security, Omsk State Technical University (11, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8881-5404>,

Scopus Author: 7102121335,

Researcher ID: S-5724-2016,

SPIN-код: 2272-6944,

e-mail: vvm125@mail.ru

Poteryaev Ilya K. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, head of the Department of Oil and Gas and Construction Machinery, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4350-2495>,

Scopus Author: 57203586410,

Researcher ID: W-7052-2018,

SPIN-code: 3684-9850,

e-mail: poteryaev_ik@mail.ru

Savelyev Andrey S. – undergraduate student, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

e-mail: savelevandrej914@gmail.com

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.1
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-416-431>
EDN: QXJVIP



АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ СИСТЕМ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

Ю.А. Колебер

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия
uljachabol@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Системы пассажирских перевозок крупных городов характеризуются большими масштабами развития, динамичностью и высоким уровнем неопределённости. Их функционирование носит двойственный характер: с одной стороны, они должны обеспечивать потребности населения в передвижениях с сохранением достаточного уровня качества транспортного обслуживания населения, с другой стороны, вносить вклад в развитие экономики города, региона, страны. Всё это определяет необходимость как оперативного, так и стратегического контроллинга городских пассажирских перевозок, который включает в себя, в частности, оценку результативности. Такая оценка необходима специалистам в области транспорта для формирования системы мер и воздействий, направленных на улучшение процессов внутри системы.

Материалы и методы. Нечеткая логика широко применяется в настоящее время для решения управленческих задач, в частности, для оценки функционирования сложных процессов и систем. Она позволяет выводить интегральные значения на основе большого количества разнородных исходных данных, учитывая многомерность системы.

Результаты. Сформирован алгоритм оценки результативности систем городского пассажирского транспорта общего пользования, основанный на положениях теории нечёткой логики. Предложенный алгоритм позволяет определять результативность транспортного процесса по нескольким направлениям: в рамках отдельного показателя, по блокам (областям) оценки результативности, для каждого участника и для всей системы в целом. Новизна исследования заключается в том, что в процессе реализации алгоритма нечёткой логики предложен новый механизм нечеткого вывода, сочетающий простоту реализации и эффективность расчета.

Обсуждение и заключение. Сформированный алгоритм позволит специалистам в области транспорта оперативно осуществлять оценку, выявлять «слабые» места развития системы и своевременно принимать меры по их устранению. Научная ценность исследования заключается в формировании научных положений по расчету результативности сложных систем с использованием положений теории нечеткой логики. Сформированный алгоритм реализуется в специально созданном для целей исследования программном обеспечении.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: алгоритм, оценка результативности, система городского пассажирского транспорта общего пользования, нечеткая логика

БЛАГОДАРНОСТИ: автор выражает благодарность анонимным рецензентам и своему научному руководителю Мочалину Сергею Михайловичу, д-ру техн. наук, проф. Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета «СибАДИ» за научное консультирование и поддержку в ходе исследований.

Статья поступила в редакцию 04.02.2026; одобрена после рецензирования 20.03.2026; принята к публикации 15.06.2026.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

© Колебер Ю.А., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Колебер Ю.А. Алгоритм оценки результативности систем городского пассажирского транспорта общего пользования // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 3. С. 416-431. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-416-431>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-416-431>

EDN: QXJVIP

ALGORITHM FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF URBAN PUBLIC PASSENGER TRANSPORT SYSTEMS

Yuliya A. Koleber

Siberian State Automobile and Road University,

Omsk, Russia

uljachabol@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Passenger transportation systems in large cities are characterized by large-scale development, dynamism, and a high level of uncertainty. Their functioning is dual: on the one hand, they must meet the needs of the population for movement while maintaining a sufficient level of public transportation service quality; on the other hand, they must contribute to the development of the economy of the city, of the region, and of the country. All this determines the demand for both operational and strategic controlling of urban passenger transportation, which includes, in particular, performance assessment. Such evaluation is necessary for specialists in the field of transport to form a system of measures and actions aimed at improving processes within the system.

Materials and methods. Nowadays fuzzy logic is widely used to solve management problems, in particular, to estimate the functioning of complex processes and systems. It allows you to derivate integral values based on a large number of heterogeneous input data, taking into account the multidimensional nature of the system.

Results. The algorithm for evaluating the effectiveness of urban public passenger transport systems based on the principles of fuzzy logic theory has been developed. The proposed algorithm makes it possible to determine the effectiveness of the transport process in several areas: within a single indicator, by blocks according to the areas, for each participant and for the entire system as a whole. The novelty of the research lies in the fact that in the process of implementing the fuzzy logic algorithm, a new fuzzy inference mechanism has been proposed combining simplicity of realization and calculation efficiency.

Discussion and conclusion. The developed algorithm will allow experts in the field of transport to conduct the assessment quickly: identify weak points in the development of the system and take timely measures to eliminate them. The scientific value of the research lies in the development of scientific principles for calculating the effectiveness of complex systems using the concepts of fuzzy logic theory. The generated algorithm is implemented in the software specially designed for research purposes.

KEYWORDS: algorithm; effectiveness evaluation; urban public passenger transport system; fuzzy logic

ACKNOWLEDGEMENTS. The author expresses gratitude to the anonymous reviewers and to her supervisor, Sergey Mikhailovich Mochalin, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Siberian State Automobile and Highway University "SibADI", for his scientific consulting and support during the research.

The article was submitted: February 04, 2026; approved after reviewing: March 20, 2026; accepted for publication: June 15, 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. Koleber Yu.A. Algorithm for evaluating the effectiveness of urban public passenger transport systems. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (3): 416-431. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-416-431>

© Koleber Yuliya A., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Современные системы городского пассажирского транспорта общего пользования (СГПТОП) в крупных и крупнейших городах имеют сложную структуру, разновекторные интересы участников, отличаются динамичным и стохастическим развитием. Социально-экономический характер системы определяет частичное расхождение и обособление целей ее участников: с одной стороны, существует необходимость обеспечения потребности населения в передвижениях с соблюдением качества транспортного обслуживания, с другой стороны, в транспортном процессе участвуют перевозчики, стремящиеся максимизировать свою прибыль. Значения показателей функционирования СГПТОП находятся в непрерывном изменении, поскольку зависят от множества факторов, таких как погодные условия, наличие транспортных заторов, уровень автомобилизации, нестабильность пассажиропотока и др. В связи с этим процесс управления данными системами требует формирования научно обоснованных механизмов, учитывающих перечисленные характеристики.

Одним из составляющих этапов процесса управления является контроль, включающий в себя оценку результатов развития системы. При этом оценка может быть как оперативной, так и итоговой, характеризующей результат в конце заданного отчетного периода (этапа). С научной точки зрения представляется целесообразным формирование такого механизма оценки результативности СГПТОП, который бы учитывал интересы каждого из ее участников, мог быть реализован в любой момент времени для обеспечения оперативности принятия решений в условиях постоянной нестабильности и неопределенности, а также учи-

тывал бы сложность внутренних процессов и соблюдение нормативных требований.

Научные вопросы оценки результатов работы городского пассажирского транспорта общего пользования достаточно подробно отражены в работах как отечественных, так и зарубежных ученых. В процессе развития методов оценки функционирования СГПТОП развивался понятийный аппарат: так, если раньше в работах рассматривались вопросы оценки качества^{1,2,3}, эффективности⁴ [1, 2], результативности [3, 4] (при этом зачастую одно понятие в смысловой интерпретации подменялось другим), то в настоящее время появляются исследования по оценке доступности [5, 6], привлекательности пассажирских услуг. В зарубежных исследованиях используется преимущественно понятие «качество», поскольку большой акцент сделан на улучшение условий транспортного обслуживания населения, включая, в частности, экологические и этические аспекты. Однако использование того или иного понятия должно отражать специфику научного исследования и используемые для оценки показатели. В работе [7] изучен понятийный аппарат оценки СГПТОП и приведены отличительные признаки указанных понятий. Самым емким понятием применительно к оценке работы транспортной системы является результативность, поскольку она, согласно [7, с. 148–149], включает в себя вопросы эффективности и качества транспортных услуг.

Существующие научные исследования отличаются также по набору используемых для оценки показателей. Наиболее часто в качестве параметров оценки учеными выбираются время пассажиров на передвижения⁵ [8], интервал движения подвижного состава,

¹ Славина Ю.А. Научно-практические методы оценки качества обслуживания населения городским наземным пассажирским транспортом: специальность 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта»: дис. ... на соиск. ученой степ. канд. техн. наук / Славина Юлия Андреевна. Волгоград, 2015. 194 с.

² Спирин И.В. Научные основы комплексной реструктуризации городского автобусного транспорта: 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта»: автореф. дис.... на соиск. ученой степ. д-ра техн. наук / Спирин Иосиф Васильевич. Москва, 2007. 39 с.

³ Якунина Н.В. Методология повышения качества перевозок пассажиров общественным автомобильным транспортом: 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта»: автореф. дис. ...на соиск. ученой степ. д-ра техн. наук / Спирин Иосиф Васильевич. Оренбург, 2013. 32 с.

⁴ Сафронов Э.А. Транспортные системы городов, регионов: учебное пособие для вузов с грифом Министерства образования РФ. М.: Изд-во АСВ, 2007. 272 с.

⁵ Пышный В.А. Повышение эффективности городского автомобильного транспорта: 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта»: автореф. дис... на соиск. ученой степ. канд. техн. наук / Пышный Владислав Александрович. Орел, 2013. 20 с.

его наполняемость⁶ [9], уровень пересадочности⁷. Некоторые авторы наиболее комплексно подошли к формированию перечня оцениваемых показателей. В работах [4, 10, 11, 12] предложены модели оценки СГПТОП, учитывающие и обрабатывающие целый комплекс показателей, в том числе с использованием информационных технологий и систем. Однако все указанные исследования учитывают только одного участника системы – пассажира. Новый подход к оценке функционирования СГПТОП предложен в работах [3, 13]. Авторы [13] предлагают методику управления качеством пассажирских перевозок, включающую как показатели, отражающие качество обслуживания пассажиров, так и учет показателей доходов и расходов перевозчиков. Авторы [3] формируют показатели результативности сразу для трех участников системы: пассажира, заказчика транспортных услуг и перевозчика. Такой подход отвечает требованиям системности и учета интересов всех участников городских пассажирских перевозок и взят за основу в настоящем исследовании.

Отличаются изученные работы с применяемыми методами оценки результативности комплексных систем. Наиболее распространены следующие методы оценки функционирования СГПТОП: оценка качества транспортного обслуживания населения с использованием функции желательности, основанной на психофизиологическом законе Вебера-Фехнера⁸; использование шкалы оценивания [14], расчет интегрального показателя путем нахождения среднего арифметического всех используемых параметров с применением весовых коэффициентов [10], использование гравитационной модели [15], квадрантный анализ [2, 4], метод MAGDM (многоуровневое принятие решений) с множественными критериями [16], интеграция метода комплексной пропорциональной оценки (COPRAS) и метода определения предпочтений по сходству с идеальным решением (TOPSIS) [17], метод индексного нормирования [18]. В настоящее время многими авторами применяются методы оценки сложных систем, основанные на положениях теории не-

четкой логики, которая позволяет определять промежуточные значения для общепринятых оценок: да – нет, ложь – истина, описывать нечеткие понятия и делать нечеткие выводы, выступая удобным инструментом управления сложными системами [19, с. 42–43]. Главным недостатком нечеткой логики является зависимость результата от выбора типа и вершин функций принадлежности при настройке параметров логического вывода. Однако СГПТОП в силу своей сложности, динамичности и зависимости от факторов неопределенности требует применения экспертного подхода для обеспечения гибкости и непрерывной настройки процесса под заданные (часто меняющиеся условия). К такой системе достаточно сложно применять четко формализованные методы. Нечеткая логика использована в работах [20, 21, 22, 23, 24] для комплексной оценки качества обслуживания пассажиров. Эти работы являются ценным исследованием в области формирования моделей интегральных оценочных показателей и взяты за основу для настоящего исследования.

Все представленные методы имеют свою специфику и внесли большой вклад в развитие науки в области комплексной оценки показателей работы СГПТОП. В то же время с научной точки зрения представляется актуальным формирование механизмов оценки результативности функционирования СГПТОП, которые бы учитывали одновременно следующие положения:

1. Учет интересов всех участников транспортного процесса и возможность оценки результативности для каждого из них отдельно.
2. Возможность оценки результативности для каждой из систем показателей, сформированных автором и представленных в исследовании [25, с. 72].
3. Возможность расчета результативности системы в рамках значений каждого отдельного показателя.
4. Возможность анализа и оценки достаточно большого набора сгруппированных показателей, представленных в исследовании [25].

⁶ Яценко С.А. Повышение эффективности городских пассажирских перевозок на основе применения оптимальной структуры парка / С.А. Яценко, А.С. Константинов, М.А. Матвеева // Совершенствование образования в области городского транспортного планирования: материалы Международной научно-практической конференции. Иркутск: Иркутский государственный технический университет. 2012 С. 86–90.

⁷ Нгуен Тхи Тху Хыонг. Повышение качества обслуживания населения г. Ханоя автобусными перевозками за счет совершенствования технологии и организации перемещения пассажиров: 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта»: автореф. дис. ... на соиск. ученой степ. канд. техн. наук / Нгуен Тхи Тху Хыонг. Волгоград, 2015. 20 с.

⁸ Мун Э.Е., Рубец А.Д. Оптимизация перевозок пассажиров маршрутными такси. М.: Транспорт, 1986.

5. Возможность как горизонтальной оценки (по периодам), так и вертикальной оценки (рейтинг результатов работы перевозчиков).

Целью настоящего исследования является формирование методики оценки результативности СГПТОП, одновременно учитывающей приведенные выше положения. Основными задачами в ходе достижения поставленной цели будут являться формирование адаптированной к специфике СГПТОП математической модели оценки результативности, а также построение алгоритма реализации методики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

СГПТОП является сложной, многофункциональной системой с достаточно большим количеством взаимосвязей и характеризуется определенной неустойчивостью и динамичностью своего развития. Управление такой системой, включая оценку ее функционирования, должно базироваться на системном подходе, который предполагает баланс целей участников, соответствие текущих целей глобальной стратегической цели и охват всех областей функционирования системы. В настоящее время расширяются возможности применения средств моделирования для описания сложных систем и процессов. Для разработки таких средств используется неклассическая логика, основанная, в частности, на теории нечеткой логики⁹. Потенциал применения нечеткой логики достаточно велик в условиях неопределенности и нечеткости, характерных для социально-экономических систем, к которым относится также и СГПТОП.

Нечеткая логика представляет знания, основанные не на четкой принадлежности, как в классической бинарной логике, а на степенях принадлежности. Истинность в нечеткой логике заменяется многозначными множествами истинности, как правило, в интервале от 0 до 1. В процессе движения от 0 к 1 степень истинности возрастает [26].

Типовой механизм реализации управления системами на основе нечеткой логики представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Типовой механизм реализации управления на основе нечеткой логики
Источник: составлено автором на основе данных работы [29].

Figure 1 – Typical mechanism of control implementation based on fuzzy logic
Source: compiled by the author based on data from work [29].

На этапе фазификации для каждой входящей переменной (лингвистической переменной) задается терм-множество – множество всех возможных ее значений. Мера принадлежности значений лингвистической переменной заданному терм-множеству задается функцией принадлежности. Функция принадлежности определяет степень соответствия переменной истинности. Самыми распространенными функциями принадлежности являются треугольная функция, трапециевидная функция и гауссова функция. При использовании типового механизма на этапе фазификации рассчитываются функции принадлежности на основе четких исходных значений входящих переменных.

Треугольная функция принадлежности $\mu_j^A(x_i)$ рассчитывается по формуле (1)

$$\mu_j^A(x_i) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ 1 - \frac{x-a}{m-a}, & a < x < m \\ 1 - \frac{b-x}{b-m}, & m < x < b \\ 0, & x \geq b \end{cases}, \quad (1)$$

где x_i – численное значение i -й входящей переменной;

a, m, b – это значения вершин функции принадлежности [19, с. 44].

⁹Титов А.В. О системном подходе к развитию общей теории управления и методов моделирования задач управления сложными системами // Анализ, моделирование, управление, развитие социально-экономических систем (АМУР-2023): сборник научных трудов XVII Международной школы-симпозиума. К 105-летию ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского», Симферополь-Судак, 14–27 сентября 2023 года. Симферополь: Индивидуальный предприниматель Корниенко Андрей Анатольевич, 2023. С. 413–418.

Трапецевидная функция принадлежности $(\mu_j^A(x_i))$ рассчитывается по формуле (2)

$$\mu_j^A(x_i) = \begin{cases} 0, (x \leq a) \text{ or } (x > d) \\ \frac{x-a}{b-a}, a \leq x \leq b \\ 1, b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, c \leq x \leq d \end{cases}, \quad (2)$$

где a, b, c, d – это значения вершин функции принадлежности [19, с. 44].

Гауссова функция принадлежности $(\mu_j^A(x_i))$ рассчитывается по формуле (3)

$$\mu_j^A(x_i) = \exp \left[-\left(\frac{x-m}{\varphi} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где m – это центральное/среднее значение нечеткого множества;

φ – коэффициент, задающий ширину функции принадлежности [19, с. 45].

Вершины функций принадлежности определяются на основе экспертных оценок в зависимости от целей получения результата. Если каждый j -й эксперт определит границы интервала значений вершин для функций принадлежности $[a_j; b_j]$, то для трапецевидной функции принадлежности итоговые (обобщающие) значения вершин будут определяться по формулам (4), (5), (6), (7) [27]:

$$a = \min(a_j), \quad (4)$$

$$b = \min\{\max(a_j), \min(b_j)\}, \quad (5)$$

$$c = \max\{\max(a_j), \min(b_j)\}, \quad (6)$$

$$d = \max(b_j). \quad (7)$$

Для треугольной функции принадлежности вершины a и b будут определяться по формулам (4) и (7) соответственно, а вершина m будет рассчитана по формуле (8)

$$m = \frac{\min(a_j) + \max(b_j)}{2}. \quad (8)$$

Далее необходимо вычислить функцию принадлежности для исходящей (результатирующей) переменной. Однако данная функция принадлежности отличается, как правило, сложной формой и определяется на основе логического вывода, являющегося вторым этапом механизма реализации управления на основе нечеткой логики. Существует несколько алгоритмов нечеткого вывода: алгоритм Мамдани, алгоритм Сугено, алгоритм Ларсена и алгоритм Цукамото [28]. Самыми распространенными из них являются алгоритм Мамдани и алгоритм Сугено. Они отличаются между собой представлением правил. Если при использовании алгоритма Мамдани логические правила представлены в виде: ЕСЛИ $x = A$, ТО $y = B$, то при использовании алгоритма Сугено в заключение правил представлена функция: ЕСЛИ $x = A$, ТО $y = f(x)$ (где x и y – входящая и исходящая переменные соответственно, а A и B – значения нечетких подмножеств). Однако при наличии большого количества исходящих переменных использование представленных алгоритмов нечеткого вывода представляет собой трудоемкую процедуру, сопровождающуюся необходимостью формирования внушительной базы правил в случае применения системы Мамдани и сложностью выведения функций в случае применения системы Сугено. Поэтому в рамках настоящего исследования функцию принадлежности для исходящей (результатирующей) переменной предлагается определять путем применения правил соответствия термов для входящей и исходящей переменной по результатам фазификации, активации и агрегирования (объединения) функций принадлежности для исходящих переменных.

Последний этап механизма реализации управления на основе нечеткой логики – дефазификация – вычисление исходящей (результатирующей) переменной – результативности СГПТОП. Существует несколько методов дефазификации, наиболее простым и применимым из которых является метод центра тяжести [19, с. 45; 29]. При расчетах по данному методу должны быть учтены коэффициенты значимости, отражающие степень важности включения показателя в процесс оценивания результативности.

При использовании метода центра тяжести итоговая результативность будет рассчитываться по формуле (9)

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot y_i \cdot \mu(y_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(y_i)}, \quad (9)$$

где w_i – коэффициент значимости i -й переменной;

y_i – переменная, соответствующая выходной лингвистической переменной;

$\mu(y_i)$ – функция принадлежности нечеткого множества, соответствующего выходной лингвистической переменной.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам проведенных исследований автором сформирован алгоритм оценки результативности СГПТОП, основанный на положениях нечеткой логики. Укрупненная схема этапов алгоритма показана на рисунке 2.

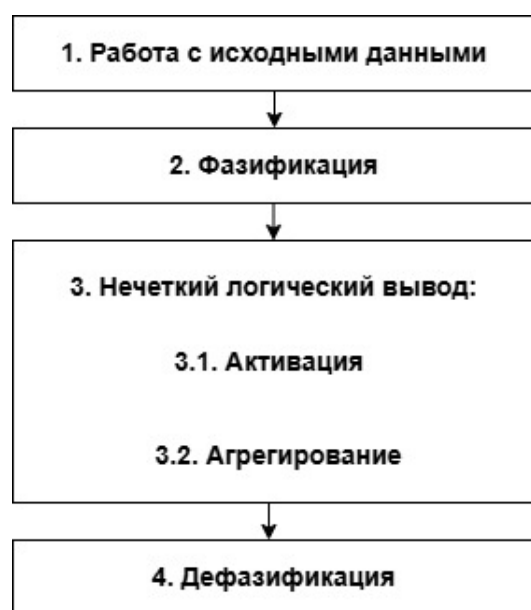


Рисунок 2 – Укрупненный алгоритм оценки результативности системы городского пассажирского транспорта общего пользования
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Comprehensive algorithm of effectiveness evaluation of the urban public passenger transport system
Source: compiled by the author.

Поскольку алгоритм является достаточно большим, для удобства он декомпозирован на несколько последовательных алгоритмов, представленных на рисунках 3, 4, 5, 6, 7.

На рисунке 3 представлен первый этап алгоритма – подготовка к расчетам. На данном этапе экспертами формируется перечень показателей (исходных данных, входящих переменных) оценки результативности СГПТОП в зависимости от целей и направлений процедуры оценивания. Каждому показателю присваивается коэффициент его значимости.

Далее показатели классифицируются по участникам и блокам (областям) системы показателей оценки результативности. Один и тот же показатель может относиться сразу к нескольким классификационным областям. При оценке деятельности нескольких перевозчиков вводятся значения показателей отдельно по каждому из них.

Данный этап определяется экспертами и зависит от целей и направлений оценки результативности.

Полный перечень показателей оценки результативности СГПТОП с разбивкой по блокам и участникам транспортного процесса приведен в отдельном исследовании автора [25]. Предложенный перечень основан как на результатах исследования трудов ученых, так и на основе действующей нормативно-правовой документации. Так, за основу взяты показатели, предлагаемые в социальном¹⁰ и региональном¹¹ стандартах транспортного обслуживания населения. Стоит отметить, что данный перечень не является исчерпывающим и строго регламентированным, и окончательное решение по набору исходных данных принимают специалисты, осуществляющие процедуру оценивания.

¹⁰ Распоряжение Министерства транспорта Российской Федерации от 31 января 2017 года № НА-19-р «Об утверждении социального стандарта транспортного обслуживания населения при осуществлении перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом» (с изменениями на 8 октября 2024 года).

¹¹ Постановление Правительства Российской Федерации от 8 декабря 2023 года № 2086 «Об утверждении требований к региональному стандарту транспортного обслуживания населения».

ЭТАП 1. РАБОТА С ИСХОДНЫМИ ДАННЫМИ

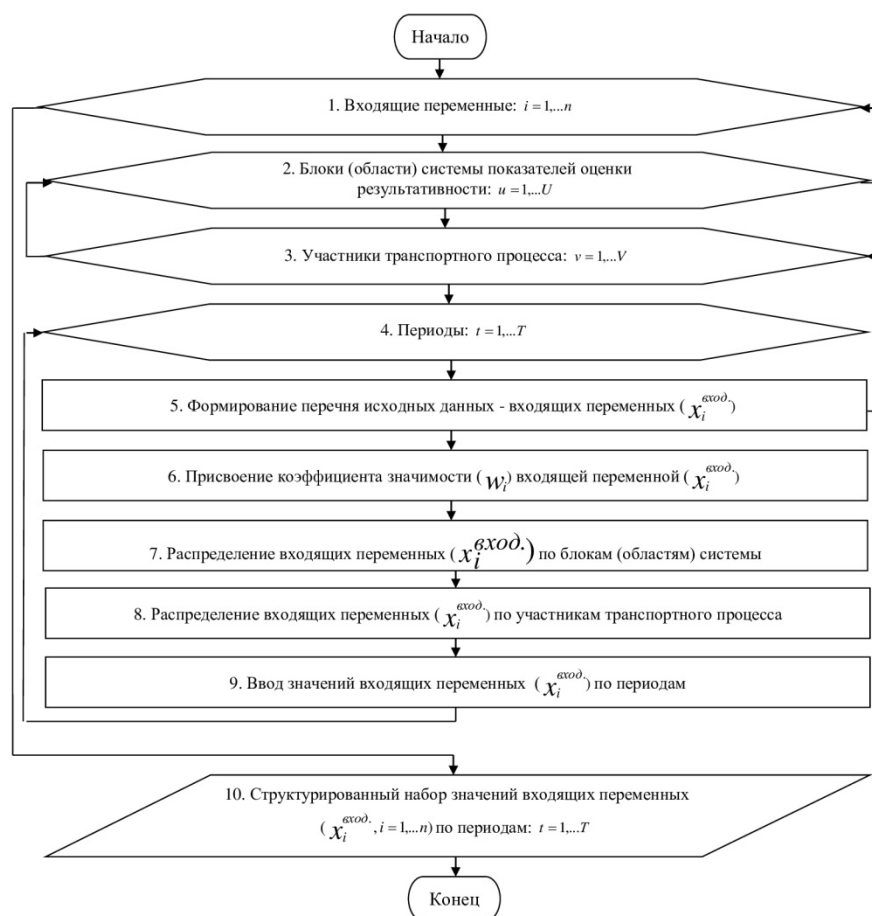


Рисунок 3 – Алгоритм этапа 1-й оценки результативности системы городского пассажирского транспорта общего пользования: работа с исходными данными
Источник: составлено автором.

Figure 3 – The 1-st stage algorithm of effectiveness evaluation of the urban public passenger transport system: work with the initial data
Source: compiled by the author.

На рисунке 4 представлен второй этап алгоритма – фазификация. Создание терм-множеств осуществляется экспертами. Для каждого показателя набор терм-множеств зависит от его специфики. Это важно учитывать на данном этапе. Например, для некоторых показателей в наборе терм-множеств должна присутствовать терма «недопустимое значение». Это позволяет получать в итоге более точные и понятные для интерпретации оценочные значения.

Для задания вершин функций принадлежности осуществляется опрос экспертов, результаты которого обрабатываются по формулам (4)–(8) и выводятся итоговые значения вершин, принимаемые для дальнейших расчетов.

Расчет функций принадлежности для каждой исходящей переменной – результат фазификации – осуществляется по формулам (1)–(3) в зависимости от их типа.

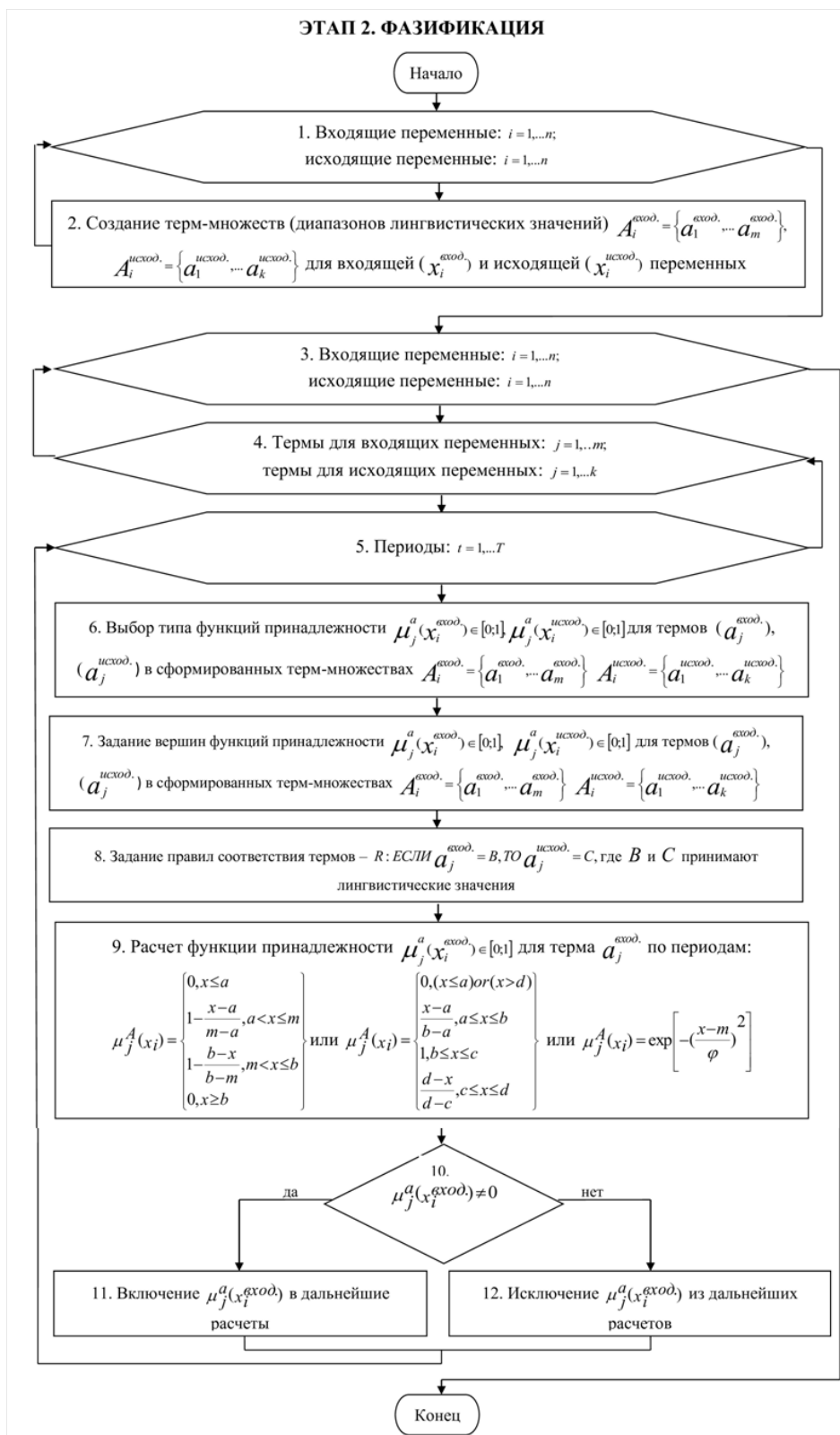


Рисунок 4 – Алгоритм этапа 2-й оценки результативности системы городского пассажирского транспорта общего пользования: фазификация
Источник: составлено автором.

Figure 4 – The 2-nd stage algorithm of effectiveness evaluation of the urban public passenger transport system: fuzzification
Source: compiled by the author.

ЭТАП 3. АКТИВАЦИЯ

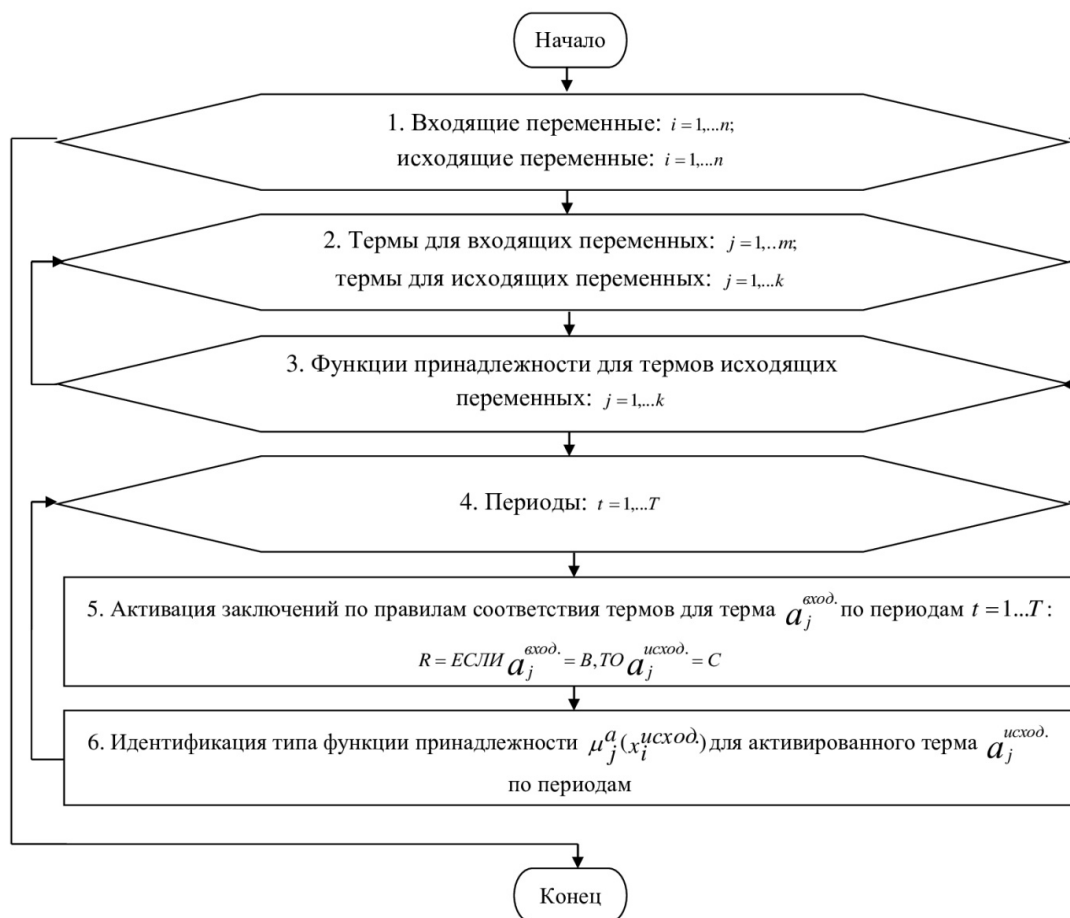


Рисунок 5 – Алгоритм этапа 3-й оценки результативности системы городского пассажирского транспорта общего пользования: активация
Источник: составлено автором.

Figure 5 – The 3-d stage algorithm of effectiveness evaluation of the urban public passenger transport system: activation
Source: compiled by the author.

На рисунке 5 представлен третий этап алгоритма – активация термов для исходящих переменных, которая осуществляется по заданным правилам соответствия термов. Каждый активированный терм соответствует функции принадлежности, заданной для него на этапе фазификации. Данный этап дает возможность перейти от входящих переменных к исходящим для продолжения дальнейших расчетов. Значения всех исходящих переменных лежат в интервале от 0 до 1. В результате обеспечивается переход от исходных данных, имеющих неодинаковую размерность к единому измери-

тельному интервалу, соответствующему классической теории результативности. В этом заключается большое преимущество нечеткой логики по сравнению с другими методами.

На рисунке 6 представлен четвертый этап алгоритма – агрегирование. Активированные функции принадлежности для исходящих переменных «обрезаются» на уровне их рассчитанных значений и объединяются (агрегируются) в одну функцию принадлежности, образуя определенную фигуру (в случае, если значение входящей переменной попало в более чем один терм).

ЭТАП 4. АГРЕГИРОВАНИЕ

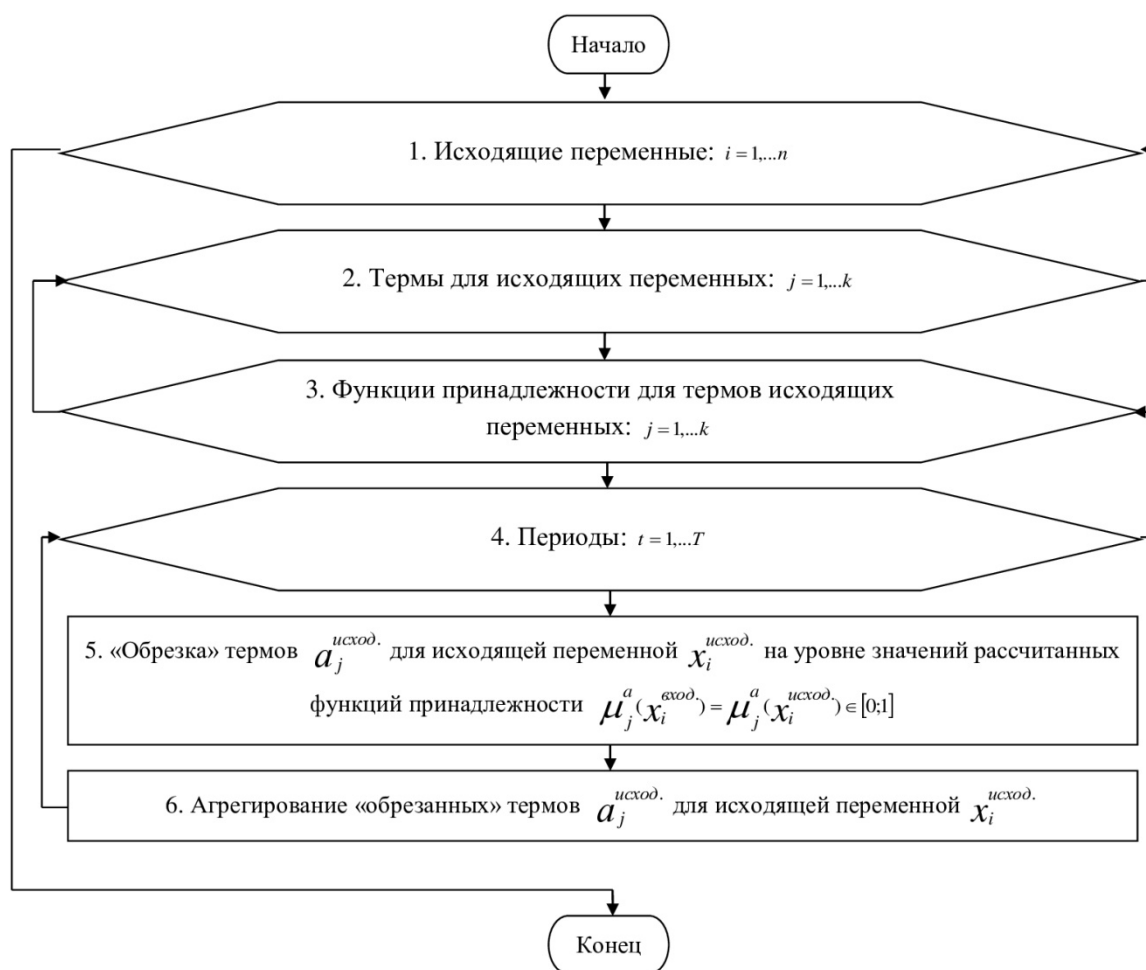


Рисунок 6 – Алгоритм этапа 4-й оценки результативности системы городского пассажирского транспорта общего пользования: агрегирование
Источник: составлено автором.

Figure 6 – The 4-th stage algorithm of effectiveness evaluation of the urban public passenger transport system: aggregation
Source: compiled by the author.

На рисунке 7 представлен пятый этап алгоритма – деаггрегация: получение и обработка результата. На основе значений функций принадлежности для исходящих переменных осуществляется расчет самих значений исходящих переменных по формулам (1)–(3),

только в обратную сторону (известны функции принадлежности).

Итоговая результативность рассчитывается путем нахождения центра тяжести получившейся фигуры по формуле (9) с использованием коэффициентов значимости.

ЭТАП 5. ДЕФАЗИФИКАЦИЯ: ПОЛУЧЕНИЕ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТА

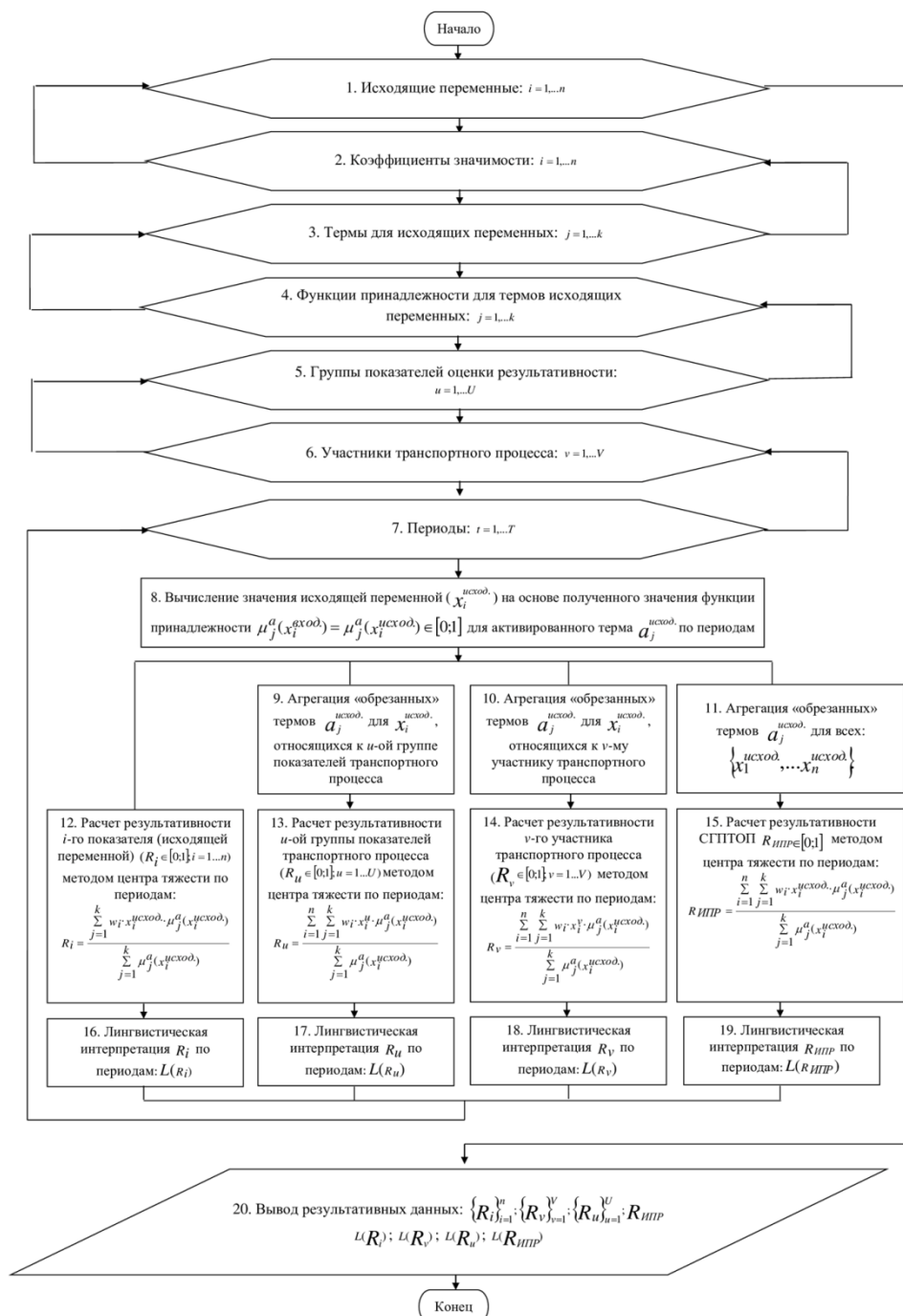


Рисунок 7 – Алгоритм этапа 5-й оценки результативности системы городского пассажирского транспорта общего пользования: дефазификация
 Источник: составлено автором.

Figure 7– The 5-th stage algorithm of effectiveness evaluation of the urban public passenger transport system: defuzzification
 Source: compiled by the author.

Стоит отметить, что предложенная адаптированная модель оценки результативности СГПТОП позволяет, с одной стороны, рассчитать результативность для каждого отдельного участника системы, с другой стороны, обеспечить расчет результативности по блокам и для всей системы в целом с учетом противоречий целей ее участников за счет включения в агрегирование функций принадлежности всех участников.

Предложенный алгоритм достаточно трудоемкий для ручных вычислений, поэтому для его реализации было создано специальное программное обеспечение¹², в котором достаточно быстро можно произвести необходимые расчеты и получить графический анализ модели: результаты расчетов могут быть визуализированы с помощью 3D-графиков. Программное обеспечение написано на языке C# (си-шарп). Для лучшей визуализации выбрана технология windows forms.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учет комплексного характера транспортно-го процесса уже давно является основой для научных исследований. Для оценки результативности сложных процессов и систем, в частности СГПТОП, ученые используют различные математические модели, которые со временем совершенствуются и способны учитывать достаточно большое количество факторов. Развитию таких моделей способствуют, в частности, современные информационные технологии, позволяющие обрабатывать большой объем данных за достаточно небольшое время, автоматизируя процесс принятия решений. Большое распространение для оценки комплексных систем получила нечеткая логика, положения которой явились базой для исследования.

Разработан алгоритм оценки результативности СГПТОП, который позволяет:

- учитывать большой объем исходных данных;
- учитывать данные, имеющие разные измерительные характеристики (как качественные, так и количественные);
- осуществлять оценку с позиции всех участников системы, учитывая «конфликт» их интересов;

- осуществлять оценку одновременно в разных форматах измерения: для отдельного показателя/участника/блока системы оценки результативности;

- рассчитывать интегральный показатель результативности всей системы в целом.

Новизной исследования является адаптированная процедура нечеткого логического вывода, позволяющая учесть многочисленные параметры СГПТОП без применения сложных и многочисленных правил.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Оленина Е.А. Повышение эффективности пассажирских перевозок // Железнодорожный транспорт. 1999. № 7. С. 60–63.
2. Putra A. Adris. Transportation system performance analysis urban area public transport // International Refereed Journal of Engineering and science. 2013. 2 (6). pp. 1-15.
3. Мочалин С.М., Каспер М.Е. Формирование расчетных показателей для оценки результативности функционирования системы городского общественного пассажирского транспорта // Вестник СибАДИ. 2017. № 6(58). С. 37–47. EDN YNHMUZ.
4. Raoniar R., Rao M., Senathipathi V. Public Transport Performance Evaluation Techniques - A Review. 2015. 3. URL: https://www.researchgate.net/publication/305992592_Public_Transport_Performance_Evaluation_Techniques_-_A_Review (дата обращения: 29.01.2026).
5. Glock JP., Gerlach Ju. Berlin Pankow: a 15-min city for everyone? A case study combining accessibility, traffic noise, air pollution, and socio-structural data // Eur. Transp. Res. Rev. 2023. Vol. 15. No. 7. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-12-2710.1186/s12544-023-00577-2>
6. Mocanu T., Joshi J., Winkler C. A data-driven analysis of the potential of public transport for German commuters using accessibility indicators // Eur. Transp. Res. Rev. 2021. Vol. 13, No. 54. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-12-2710.1186/s12544-021-00507-0>
7. Колебер Ю.А., Мочалин С.М. Развитие понятийного аппарата в области оценки организации городских пассажирских перевозок // International Journal of Advanced Studies. 2024. Т. 14, № 1. С. 136–155. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-1-273>. EDN KQWAGD.
8. Спирин И.В. Определение затрат времени пассажиров на поездки в городах // Мир транспорта. 2020. Т. 18, № 3(88). С. 218–227. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-28-43>. EDN HTJUMM.

¹² Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025616632 Российская Федерация. Оценка результативности функционирования городского наземного пассажирского транспорта общего пользования с применением метода нечеткой логики: заявл. 12.03.2025; опубл. 18.03.2025 / Ю.А. Колебер, С.М. Мочалин, Е.В. Пискунов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет». EDN XLYRMX.

9. Фадеев А.И., Фомин Е.В. Методика решения задачи определения оптимальной структуры парка подвижного состава городского пассажирского транспорта общего пользования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 1(132). С. 42–45. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-218-227>. EDN YMMWJT.
10. Елифанов В.В., Тюрин А.С. Повышение качества перевозок в системе городского пассажирского автомобильного транспорта на основе оценки удовлетворенности потребителей: монография; под ред. М.Ю. Обшивалкина. Ульяновск: УлГТУ, 2017. 195 с.
11. Dziaduch I., Peternek P. Assessing Public Transport Quality Using AHP and SUTI Indicator 4: A Case Study of the Sustainable Mobility Plan in Wrocław, Poland // Sustainability. 2024. 16 (24), 11182. <https://doi.org/10.3390/su162411182>
12. De Aquino J.T., de Melo F.J.C., Jerônimo T.d., de Medeiros D.D. Evaluation of Quality in Public Transport Services: The Use of Quality Dimensions as an Input for Fuzzy TOPSIS // International Journal of Fuzzy Systems. 2019. 21 (1). PP. 176-193. <https://doi.org/10.1007/s40815-018-0524-1>
13. Володькин П.П., Загорский И.О. Оценка качества регулярных перевозок как критерия эффективности организации транспортного обслуживания населения // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2010. № 5. С. 22–25. EDN MGUIXZ.
14. Лизогуб Р.П. Оценка эффективности качества регулярных перевозок в системе управления городским пассажирским транспортом // Сборник научных работ серии «Экономика». 2021. № 21. С. 134–143. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4892501>. EDN RVFQTC.
15. Андреев С.А. Разработка метода оценки качества транспортного обслуживания населения в системах планирования городских транспортных систем // Мир транспорта. 2023. Т. 21, № 5(108). С. 84–92. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-5-10>
16. Cai Y.A generalized integrated framework for urban public transport operations evaluation based on interval neutrosophic TODIM and EDAS technique // Soft Comput. 2024. Vol. 28. pp. 10331–10344. <https://doi.org/10.1007/s00500-024-09787-9>
17. Solanki V.S., Agarwal P.K. Identification of key performance indicators using hybrid COPRAS-TOPSIS for urban public transit systems by evaluating with AHP and FAHP // Multimed Tools Appl. 2024. Vol. 83. pp. 82439–82469. <https://doi.org/10.1007/s11042-024-18851-3>
18. Мочалин С.М., Каспер М.Е. Выбор метода оценки результативности функционирования комплексных систем в теории пассажирских автомобильных перевозок // Вестник СибАДИ. 2018. Т. 15, № 1(59). С. 60–69. EDN YTMCLZ.
19. Колебер Ю.А., Мочалин С.М., Пискунов Е.В. Применение нечеткой логики для оценки результативности функционирования систем городского пассажирского транспорта общего пользования // Мир транспорта и технологических машин. 2025. № 3-2(90). С. 41–50. [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-3-2\(90\)](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-3-2(90)). EDN BVQNSI.
20. Гусев С.А., Славина Ю.А. Сравнительный анализ методик оценки качества функционирования системы городского наземного пассажирского транспорта // Научная мысль. 2015. № 2. С. 25–29. EDN TUFJSN.
21. Клявин В.Э., Ризаева Ю.Н., Гринченко А.В. Комплексный показатель качества пассажирских перевозок автомобильным транспортом // Мир транспорта и технологических машин. 2023. № 2(81). С. 51–57. [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-2\(81\)-51-57](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-2(81)-51-57). EDN CFZFIH.
22. Alkharabsheh A., Moslem, S., Duleba S., Oubahman L. An integrated approach of multi-criteria decision-making and grey theory for evaluating urban public transportation systems // Sustainability. 13(5). <https://doi.org/10.3390/su13052740>
23. Li X-H., Huang L., Li Q., Liu H-C. Passenger Satisfaction Evaluation of Public Transportation Using Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA Method under Large Group Environment // Sustainability. 2020. No. 12. <https://doi.org/10.3390/su12124996>
24. Ottomanelli M., Bray S., Caggiani L., Dell'Orco M. Features Selection based on Fuzzy Entropy for Data Envelopment Analysis Applied to Transport Systems // Sustainability. №13(5). <https://doi.org/10.3390/su13052740>
25. Колебер Ю.А., Мочалин С.М. Формирование набора показателей для оценки результативности функционирования городского пассажирского транспорта общего пользования // International Journal of Advanced Studies. 2025. Т. 15, № 1. С. 65–90. EDN KQWAGD.
26. Saleh I., Alhady S.S.N., Rahiman W. Comparison of Mamdani and Sugeno Fuzzy Logic Performance as Speed Controller. In: Ibrahim, H., Iqbal, S., Teoh, S., Mustafa, M. (eds) 9th International Conference on Robotic, Vision, Signal Processing and Power Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2017; Vol 398. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1721-6_40
27. Карпова Н.А. Применение методов нечеткой логики при оценке и прогнозировании финансовой устойчивости консолидированных групп компаний // Интернет-журнал «Науковедение». 2015. Т. 7, № 5(30). <https://doi.org/10.15862/199EVN515>
28. Blej M., Azizi M. Comparison of Mamdani-type and Sugeno-type fuzzy inference systems for fuzzy real time scheduling // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. No. 22. pp. 11071-11075.
29. Ермаков С.А., Болгов А.А., Чурсин А.Г. Нечеткая логика на основе экспертных оценок как альтернативный инструмент для оценки риска в условиях неопределенности // Информация и безопасность. 2022. Т. 25, № 2. С. 247–262. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.25.2.009>. EDN AKMKSC.

REFERENCES

- Olenina E.A. Improving the efficiency of passenger transportation. *Rail transport*. 1999. No. 7. pp. 60-63. (in Russ.)
- Putra A. Adris. Transportation system performance analysis urban area public transport. *International Refereed Journal of Engineering and science*. 2013. no. 2 (6): 1-15.
- Mochalin S.M., Kasper M.E. Formation of calculation indicators for assessing the performance of the urban public passenger transport system. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017. No. 6(58). pp. 37-47. (in Russ.) EDN YNHMUZ.
- Raoniar R., Rao M., Senathipathi V. Public Transport Performance Evaluation Techniques. A Review. 2015. 3. URL: https://www.researchgate.net/publication/305992592_Public_Transport_Performance_Evaluation_Techniques_-_A_Review (accessed 29.01.2026).
- Glock JP., Gerlach Ju. Berlin Pankow: a 15-min city for everyone? A case study combining accessibility, traffic noise, air pollution, and socio-structural data. *Eur. Transp. Res. Rev.* 2023. Vol. 15. No. 7. <https://doi.org/10.1186/s12544-023-00577-2>
- Mocanu T., Joshi J., Winkler C. A data-driven analysis of the potential of public transport for German commuters using accessibility indicators. *Eur. Transp. Res. Rev.* 2021. Vol. 13. No. 54. <https://doi.org/10.1186/s12544-021-00507-0>
- Koleber Yu.A., Mochalin S.M. Development of a conceptual apparatus in the field of assessing the organization of urban passenger transportation. *International Journal of Advanced Studies*. 2024. Vol. 14. No. 1. pp. 136-155. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-1-273>. (in Russ.) EDN KQWAGD.
- Spirin I.V. Determination of passengers' time costs for travel in cities. *World of Transport and Transportation*. 2020. Vol. 18. No. 3(88). pp. 218-227. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-28-43>. (in Russ.) EDN HTJUMM.
- Fadeev, A. I., Fomin E.V. Metodika resheniya zadachi opredeleniya optimal'noi struktury parka podvizhnogo sostava gorodskogo passazhirskogo transporta obshchego pol'zovaniya. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018. T. 22. № 1(132). S. 42-45. (in Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-218-227>. EDN YMMWJT.
- Epifanov V.V., Tyurin A.S. *Improving the quality of transportation in the urban passenger road transport system based on consumer satisfaction assessment: Monograph*. Ulyanovsk State Technical University. 2017: 195. (in Russ.)
- Dziaduch I., Peternek P. Assessing Public Transport Quality Using AHP and SUTI Indicator 4: A Case Study of the Sustainable Mobility Plan in Wrocław, Poland. *Sustainability*. 2024. 16 (24), 11182. <https://doi.org/10.3390/su162411182>
- De Aquino J.T., de Melo F.J.C., Jerônimo T.d., de Medeiros D.D. Evaluation of Quality in Public Transport Services: The Use of Quality Dimensions as an Input for Fuzzy TOPSIS *International Journal of Fuzzy Systems*. 2019. 21 (1). pp. 176-193. <https://doi.org/10.1007/s40815-018-0524-1>
- Volod'kin P.P. Zagorskii I.O. Evaluation of the quality of regular transportation as a criterion for the effectiveness of the organization of public transport services. *Transport: science, equipment, management*. 2010. No. 5. pp. 22-25. (in Russ.) EDN MGUIXZ.
- Lizogub R.P. Evaluation of the efficiency of regular transportation quality in the urban passenger transport management system. Collection of scientific papers in the series «Economics». 2021. No. 21. pp. 134-143. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4892501>. (in Russ.) EDN RVFQTC.
- Andreev S.A. Development of a Method for Assessing the Quality of Public Transport Services within Urban Transportation Planning Systems. *World of Transport and Transportation*. 2023. Vol. 21, No. 5(108). pp. 84-92. (in Russ.) <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-5-10>
- Cai Y.A generalized integrated framework for urban public transport operations evaluation based on interval neutrosophic TODIM and EDAS technique. *Soft Comput.* 2024. Vol. 28. pp. 10331–10344. <https://doi.org/10.1007/s00500-024-09787-9>
- Solanki V.S., Agarwal P.K. Identification of key performance indicators using hybrid COPRAS-TOPSIS for urban public transit systems by evaluating with AHP and FAHP. *Multimed Tools Appl.* 2024. Vol. 83. pp. 82439–82469. <https://doi.org/10.1007/s11042-024-18851-3>
- Mochalin S.M., Kasper M.E. Evaluating methods' application of complex systems' effectiveness in the automobile passenger transport theory. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018. Vol. 15. No. 1(59). pp. 60-69. (in Russ.) EDN YTMCLZ.
- Koleber YU.A., Mochalin S.M., Piskunov E.V. Applying fuzzy logic to evaluation the effectiveness of the functioning of the public urban passenger transport systems. *World of transport and technological machines*. 2025. No. 3-2(90). pp. 41-50. (in Russ.) [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-3-2\(90\)](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2025-3-2(90)). EDN BVQNSI.
- Gusev S.A., Slavina YU.A. Comparative analysis of methods for assessing the performance of the urban ground passenger transport system. *Scientific thought*. 2015. No. 2. pp. 25-29. (in Russ.) EDN TUFJSN.
- Klyavin, V.EH., Rizaeva YU.N., Grinchenko A.V. Comprehensive indicator of the quality of passenger transportation by road. *World of transport and technological machines*. 2023. No. 2(81). pp. 51-57. (in Russ.) [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-2\(81\)-51-57](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-2(81)-51-57). EDN CFZFIH.
- Alkharabsheh A., Moslem, S., Duleba S., Oubahman L. An integrated approach of multi-criteria decision-making and grey theory for evaluating urban public transportation systems. *Sustainability*. 13(5). <https://doi.org/10.3390/su13052740>
- Li X-H., Huang L., Li Q., Liu H-C. Passenger Satisfaction Evaluation of Public Transportation Using Pythagorean Fuzzy MULTIMOORA Method under Large Group Environment. *Sustainability*. 2020. No. 12. <https://doi.org/10.3390/su12124996>
- Ottomanelli M., Bray S., Caggiani L., Dell'Orco M. Features Selection based on Fuzzy Entropy for

Data Envelopment Analysis Applied to Transport Systems. *Sustainability*. №13(5). <https://doi.org/10.3390/su13052740>

25. Koleber Yu.A., Mochalin S.M. Formation of a set of indicators to assess the effectiveness of the functioning of urban public passenger transport. *International Journal of Advanced Studies*. 2025. Vol. 15. No. 1. pp. 65-90. (in Russ.) EDN KQWAGD.

26. Saleh I., Alhady S.S.N., Rahiman W. Comparison of Mamdani and Sugeno Fuzzy Logic Performance as Speed Controller. In: Ibrahim, H., Iqbal, S., Teoh, S., Mustafa, M. (eds) *9th International Conference on Robotic, Vision, Signal Processing and Power Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2017; Vol. 398. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1721-6_40

27. Karpova N.A. Application of methods of fuzzy logic in valuation and forecasting of financial capability of the consolidated groups of companies. Online journal «Science Studies». 2015. Vol. 7. No. 5(30). (in Russ.) <https://doi.org/10.15862/199EVN515>

28. Blej M., Azizi M. Comparison of Mamdani-type and Sugeno-type fuzzy inference systems for fuzzy real time scheduling. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016. Vol. 11. No. 22. pp. 11071-11075.

29. Ermakov S.A., Bolgov A.A., Chursin A.G. Fuzzy logic based on expert assessments as an al-

ternative tool for risk assessment in conditions of uncertainty. *Information security*. 2022. Vol. 25. No. 2. pp. 247-262. (in Russ.) <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.25.2.009>. EDN AKMKSC.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Колебер Юлия Андреевна – ст. преп. кафедры «Экономика, логистика и управление качеством» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6844-1895>,

Researcher ID: JDW-2885-2023,

Scopus Author ID: 57219312035,

SPIN-код: 5455-7507,

e-mail: uljachabol@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Koleber Yuliya A. – Senior Lecturer, Economics, Logistics and Quality Management Department, Siberian State Automobile and Highway University (5, Prospekt Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6844-1895>,

Researcher ID: JDW-2885-2023,

Scopus Author ID: 57219312035,

SPIN-code: 5455-7507,

e-mail: uljachabol@mail.ru

Научная статья
УДК 621.431
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-432-445>
EDN: SWFYKM



АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАЗНОСТИ РАСХОДОВ ВОЗДУХА КАК ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ПАРАМЕТР ЦИЛИНДРО-ПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

П.С. Яковчук¹ ✉, С.Н. Кривцов^{1,2}, В.Г. Дыгало³

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИрНТУ),
г. Иркутск, Россия

²Северо-Восточный федеральный университет им М.К. Аммосова,
г. Якутск, Россия

³Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(Мытищинский филиал),
г. Москва, Россия

✉ ответственный автор
Pashajakovchuk@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Дизельные двигатели остаются основным типом силовых установок для грузового транспорта и специальной техники, при этом в ближайшей перспективе их массовое замещение электрической тягой маловероятно. В этих условиях актуальной задачей является контроль технического состояния двигателя, в частности цилиндро-поршневой группы, ресурс которой определяет долговечность силового агрегата. Износ ЦПГ в процессе эксплуатации приводит к ухудшению основных эксплуатационных показателей двигателя. Несмотря на наличие различных методов диагностики, большинство из них отличается высокой трудоемкостью либо носит относительный характер. Наиболее надежные способы требуют применения внешних диагностических средств, тогда как бортовые системы самодиагностики позволяют оценивать состояние двигателя лишь косвенно. В связи с этим целесообразным является развитие методов оценки изношенности двигателя с использованием параметров, доступных для бортового контроля, таких как расход картерных газов.

Материалы и методы. Исследование зависимости расхода картерных газов с увеличением зазора в поршневом кольце от диаметра цилиндров проводилось математическим путем. В исследовании участвовали различные модели дизельных двигателей легкового и коммерческого сегмента. Для проведения исследования были выбраны дизельные двигатели с различными характеристиками, включая диаметр цилиндров в диапазоне от 83 до 144 мм и рабочий объем от 2 до 16,0 л. Для обработки данных применялись методы регрессионного анализа в программной среде MATLAB, в результате чего получены закономерности изменения расхода картерных газов через неплотности цилиндров и пропорциональная им величина – разность расходов воздуха с замкнутой системой вентиляции картера и при изоляции сапуна от впускного тракта. Дополнительно проводилась проверка адекватности модели путем сравнения расчетных данных с экспериментальными замерами в лабораторных и полевых условиях.

Обсуждение и заключение. Закономерность, полученная в ходе исследований, позволяет узнать степень изношенности цилиндропоршневой группы по значению расхода воздуха, измеренного штатными средствами бортового диагностирования, причем измерения проводятся с подсоединенным патрубком принудительной вентиляции картера и при изолировании данного патрубка от измерительного тракта в идентичных условиях. Научный вклад работы заключается в экспериментальном обосновании количественной связи между разностью расхода воздуха в двух режимах измерения (с подключенным и изолированным патрубком вентиляции картера) и степенью износа ЦПГ, что ранее в литературе не было представлено в виде явной диагностической закономерности, пригодной для использования со штатными датчиками. Установлено, что измерение разности расхода воздуха является надежным индикатором износа ЦПГ, позволяя прогнозировать состояние двигателя без применения инвазивных методов диагностики. В заключение исследования подчеркивается важность регулярного контроля состояния ЦПГ для поддержания оптимальных рабочих характеристик и продления срока службы двигателя. Дальнейшие работы рекомендуются направить на интеграцию предложенной методики в бортовые диагностические системы.

© Яковчук П.С., С.Н. Кривцов С.Н., Дыгало В.Г., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: надёжность двигателя, дизельный двигатель, эксплуатационный ресурс, вероятность отказа, цилиндропоршневая группа

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность редакции журнала «Вестник СибАДИ» и анонимным рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 04.02.2026; одобрена после рецензирования 08.05.2026; принята к публикации 15.06.2026.

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: Яковчук П.С., Кривцов С.Н., Дыгало В.Г. Аналитическая оценка разности расходов воздуха как диагностический параметр цилиндра-поршневой группы дизельных двигателей // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 3. С. 432-445. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-432-445>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-432-445>

EDN: SWFYKM

ANALYTICAL ASSESSMENT OF THE DIFFERENCE IN AIR FLOW RATES AS A DIAGNOSTIC PARAMETER OF THE CYLINDER-PISTON GROUP OF DIESEL ENGINES

Pavel S. Yakovchuk¹ ✉, Sergey N. Krivtsov^{1, 2}, Vladislav G. Dygalo³

¹Irkutsk National Research Technical University
Irkutsk, Russia

²North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov,
Yakutsk, Russia

³Moscow State Technical University named after N.E. Bauman (Mytishchinskiy branch),
Moscow, Russia

✉ corresponding author
Pashajakovchuk@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Diesel engines remain the primary powertrain for trucks and special-purpose vehicles and their widespread replacement by electric traction is unlikely in the near future. Under these conditions, monitoring the technical condition of the engine, particularly the cylinder-piston group, whose service life determines the longevity of the powertrain, is a pressing issue. The cylinder-piston group wear during operation leads to a deterioration in the engine key performance indicators. Despite the availability of various diagnostic methods, most are labor-intensive or of limited practical value. The most reliable methods require the use of external diagnostic tools, while onboard self-diagnostic systems provide only indirect assessment of engine condition. Therefore, it is advisable to develop methods for estimating engine wear using parameters available for onboard monitoring, such as crankcase gas flow rate.

Materials and Methods. The study of the dependance of crankcase gas flow with increase of the clearance in the piston ring on cylinder diameter has been conducted by mathematical method. Various diesel engine models for passenger cars and commercial vehicles have been used in the research. Diesel engines with various characteristics have been selected for examination, including cylinder diameters ranging from 83 to 144 mm and engine capacity from 2 to 16.0 liters. Regression analysis methods in the MATLAB software environment have been applied to process the data, resulting in the determination of patterns of crankcase gas flow rate changes due to cylinder leaks and a proportional value – the difference in airflow rates with a closed crankcase ventilation system and with the crankcase breather isolated from the intake tract. The validation of the model has additionally been conducted by comparing the calculated data with experimental measurements in laboratory and in field conditions.

Discussion and Conclusion. The pattern obtained through the study allows us to determine the wear degree of the cylinder-piston group based on the air flow rate measured by standard on-board diagnostics. Measurements have been conducted with the forced crankcase ventilation hose connected and with this hose isolated from the

© Yakovchuk Pavel S., Krivtsov Sergey N., Dygalo Vladislav G., 2026



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

measurement tract under identical conditions. The scientific contribution of this study lies in the experimental substantiation of a quantitative relationship between the difference in air flow in two measurement modes (with the crankcase ventilation hose connected and isolated) and the degree of cylinder-piston group wear. This relationship has not previously been presented in the literature as a clear diagnostic pattern suitable for use with standard sensors. It has been established that measuring the difference in air flow is a reliable indicator of cylinder-piston group wear, allowing to predict the engine condition without the use of invasive diagnostic methods. In conclusion, the study highlights the importance of regular monitoring the cylinder-piston group condition to maintain optimal performance and extend engine service life. Further work is recommended to focus on integrating the proposed methodology into on-board diagnostic systems.

KEYWORDS: engine reliability, diesel engine, service life, failure probability, cylinder-piston group

ACKNOWLEDGMENTS. The authors express their gratitude to the Editors of The Russian Automobile and Highway Industry Journal and the anonymous reviewers of this article.

The article was submitted: February 04, 2026; approved after reviewing: May 08, 2026; accepted for publication: June 15, 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. Yakovchuk P.S., Krivtsov S.N., Dygalo V.G Analytical assessment of the difference in air flow rates as a diagnostic parameter of the cylinder-piston group of diesel engines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (3): 432-445. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-432-445>

ВВЕДЕНИЕ

Двигатели внутреннего сгорания с самовоспламенением от сжатия (дизельные двигатели) на сегодняшний момент являются основной силовой установкой, применяемой на автомобилях грузового сегмента и спецтехнике. Есть все основания полагать, что и в будущем значительного замещения на электротягу у указанной техники не произойдет, по крайней мере, в России. Следовательно, задача поддержания их работоспособности в условиях реальной эксплуатации сохраняет высокую практическую значимость, а поиск эффективных методов диагностики технического состояния остается актуальным научно-прикладным направлением.

Цилиндро-поршневая группа (ЦПГ) является одной из базовых составляющих дизельного двигателя, а достижение ей предельного состояния определяет ресурс [1, 2, 3]. С увеличением наработки (пробега) техническое состояние неуклонно ухудшается, что приводит к снижению мощности, увеличению расхода топлива и масла на угар, повышению дымности отработавших газов, возрастанию расхода картерных газов и др. [4]. Несвоевременное выявление критического износа ЦПГ ведет к внезапным отказам, дорогостоящим ремонтам и простоям техники, что обосновывает экономическую и эксплуатационную значимость ранней диагностики.

В настоящее время разработан обширный арсенал методов и средств диагностирования технического состояния ЦПГ. Анализ работ,

посвященных этой проблематике, позволил заключить, что используемые методы либо трудоемки (подразумевают частичную разборку), либо в известной степени считаются относительными [5]. Классическими и достаточно универсальными методами являются замер компрессии и использование пневматических тестеров для опрессовки надпоршневого пространства [6], однако они наиболее трудоемки. Виброакустический метод менее трудоемок, но сложен в реализации [7]. Весьма оперативным методом оценки изношенности ЦПГ является измерение расхода картерных газов, поскольку между их количеством и износом существует тесная взаимосвязь [8].

При этом существующие подходы имеют два существенных ограничения, определяющих проблемную область настоящего исследования: 1) большинство достоверных методов требуют внешнего диагностического оборудования и вмешательства в конструкцию; 2) штатные бортовые системы самодиагностики оценивают состояние ЦПГ лишь косвенно (например, по неравномерности вращения коленчатого вала при прокрутке стартером, току или пульсации напряжения [9,10]), что не позволяет напрямую судить о величине износа и прогнозировать остаточный ресурс.

Таким образом, актуальной научно-технической задачей является разработка способа диагностики износа ЦПГ:

- который основывался бы на штатных датчиках и не требовал дополнительного оборудования;

- обеспечивал количественную, а не только относительную оценку состояния;
- мог быть интегрирован в бортовые диагностические системы без разборки двигателя.

Цель исследования: выявление закономерности, отражающей взаимосвязь разности расходов воздуха с замкнутой системой вентиляции картера и при изоляции сапуна от впускного тракта с параметром технического состояния цилиндров – площадью сечения неплотности ЦПГ для дизельных двигателей разной размерности.

Задачи исследования:

1. Разработать аналитическую модель для расчета разности расходов воздуха с замкнутой системой вентиляции картера и при изоляции сапуна от впускного тракта (пропорциональной расходу картерных газов).
2. Выполнить расчеты для дизельных двигателей разной размерности расхода картерных газов от площади сечения неплотности ЦПГ.
3. Выявить закономерность изменения расхода картерных газов от площади сечения неплотности ЦПГ для дизельных двигателей разной размерности.
4. Выполнить экспериментальную проверку возможности применения разности расходов воздуха с замкнутой системой вентиляции картера и при изоляции сапуна от впускного тракта в качестве диагностического параметра.

Научная значимость работы состоит в обосновании новой диагностической закономерности, связывающей непосредственно измеряемый штатными средствами параметр (разность расходов воздуха) с физической величиной износа (площадью неплотности ЦПГ), что позволяет перейти от косвенных признаков к количественной оценке состояния. Практическая значимость заключается в возможности реализации предложенного метода в рамках штатной электроники автомобиля без дополнительных датчиков и разборки двигателя.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При износе цилиндро-поршневой группы происходит изменение структурных параметров, а именно, зазора в замке компрессионных колец, а также диаметров и геометрии поршня и гильзы цилиндров. Это, в свою очередь, приводит к утечкам рабочего тела через увеличенные неплотности [8,11]. При этом не-

обходимо учесть и геометрические размеры цилиндров (ход поршня, диаметр цилиндра, рабочий объем и т.д.), поскольку при одних и тех же зазорах площади, через которые происходят утечки, различаются.

Методика расчёта утечек через поршневые кольца основана на типовом расчёте рабочего цикла ДВС [12], в которой определяются изменения давления P_u и температуры T_u по углу поворота вала на разных режимах работы ДВС и дополнительно производится расчёт расхода газа $G_{кр}$, прошедшего через неплотности ЦПГ условной площадью f_u (рисунок 1, а).

Исходная система уравнений содержит закон сохранения энергии, массы, состояния газа и имеет вид [13]:

$$U_2 - U_1 = - \int_{V_1}^{V_2} p * dV + \sum I_j^* + Q_x - Q_w; \quad (1)$$

$$G_2 - G_1 = \sum \Delta G_j; \quad (2)$$

$$P * V = G * R * T, \quad (3)$$

где $\int_{V_1}^{V_2} p * dV$ – механическая работа, совершенная рабочим телом;

I_j^* – энтальпия рабочего тела, подведенная к системе в результате добавления массы ΔG_j от j -го источника массы;

Q_x – количество теплоты, подведенной к рабочему телу от постороннего источника (вследствие сгорания топлива);

Q_w – количество теплоты, отведенной в стенки;

p, T, G, V, U, R – давление, температура, масса, объём, внутренняя энергия и газовая постоянная рабочего тела.

Индексы 1 и 2 обычно относят к началу и концу рассматриваемого термодинамического процесса.

Указанная система уравнений является общепринятой системой для многих программных продуктов по расчету ДВС. К числу таких программ относится свободно распространяемая отечественная программа Дизель-РК (МГТУ им. Баумана). Примечательно, что она позволяет смоделировать и утечки рабочего тела и рассчитать массовый расход газа $G_{кр}$, прорывающегося через неплотности.

Массовый расход $G_{кр}$ (г/с) для докритического режима истечений определяется по выражению [15]:

$$G_{\text{кр}} = f_{\text{щ}} * \frac{p_{\text{ц}}}{\sqrt{R * T_{\text{ц}}}} * \sqrt{\frac{2k}{k-1} * \left[\left(\frac{p_{\text{к}}}{p_{\text{ц}}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_{\text{к}}}{p_{\text{ц}}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (4)$$

Для критического режима истечений определяется по выражению

$$G_{\text{кр}} = f_{\text{щ}} * \frac{p_{\text{ц}}}{\sqrt{R * T_{\text{ц}}}} * \sqrt{\frac{2k}{k+1} * \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}}, \quad (5)$$

где R – газовая постоянная для газа, Дж/(кг*К);
 $f_{\text{щ}}$ – площадь сечения неплотности ЦПГ (щели), м²;

k – показатель адиабаты газа;

$T_{\text{ц}}$ – температура газа в цилиндре (на входе), К;

$p_{\text{ц}}, p_{\text{к}}$ – давление газа в цилиндре и картере, Па.

Расход воздуха через ДМРВ согласно уравнениям (2) и (3) вычисляется как

$$G'_{\text{в}} = G_{\text{в}} - G_{\text{кр}} \quad (6)$$

Следовательно, разность расходов воздуха с замкнутой системой вентиляции картера и при изоляции сапуна от впускного тракта, вычисляемая посредством ДМРВ, будет пропорциональна известному диагностическому параметру – расходу картерных газов. Однако в данном случае это именно разность массовых расходов воздуха:

$$\dot{G}_{\text{в}} - G'_{\text{в}} = f(G_{\text{кр}}), \quad (7)$$

где $G'_{\text{в}}$ – расход воздуха, проходящий через ДМРВ;

$G_{\text{в}}$ – расход воздуха, поступающего из атмосферы при изолировании сапуна системы вентиляции картера от системы впуска;

$G_{\text{кр}}$ – расход картерных газов, проходящих через сапун двигателя.

Расход воздуха двигателем (то есть расход воздуха, прошедший через датчик массового расхода воздуха) можно определить по следующей зависимости¹:

$$G_{\text{в}} = \frac{120}{\tau} i_{\text{ц}} n_e V_{\text{h}} \rho_0 \eta_v, \quad (8)$$

где τ – тактность двигателя 2 либо 4;

$i_{\text{ц}}$ – количество цилиндров;

n_e – частота вращения коленчатого вала; мин⁻¹;

V_{h} – рабочий объем цилиндра, м³;

ρ_0 – плотность заряда, кг/м³;

η_v – коэффициент наполнения.

Коэффициент наполнения в свою очередь определяется как¹

$$\eta_v = \varphi_1 \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{p_{\text{а}}}{p_{\text{к}}} \frac{T_{\text{к}}}{T_{\text{к}} + \Delta T + \varphi \varphi_1 \gamma T_{\text{г}}}, \quad (9)$$

где φ_1 – коэффициент дозарядки;

ε – степень сжатия.

$p_{\text{а}}$ и $p_{\text{к}}$ – соответственно давления на впуске и поступающего в цилиндр, Па;

φ – отношение теплоемкостей продуктов сгорания и свежей смеси;

$T_{\text{к}}$ и $T_{\text{г}}$ – соответственно температуры воздуха, поступающего в цилиндр и остаточных газов, К;

γ – коэффициент остаточных газов;

ΔT – температура подогрева заряда, К.

Моделирование расхода картерных газов от диаметра цилиндра и зазора поршневых колец проводилось с помощью отечественной программы Дизель-РК (МГТУ им. Баумана) [16]. В качестве отправной точки были взяты в расчёт модели двигателей, диаметр цилиндра которых варьируется в пределах от 83 до 144 мм. Моделировался режим холостого хода, поскольку он является достаточно стабильным, легко реализуемым, а справочная величина минимальной частоты вращения холостого хода известна для каждого двигателя.

В качестве допущений принято:

- износ ЦПГ характеризуется площадью сечения ее неплотности $f_{\text{щ}}$ (см. рисунок 1, а), которую изменяли от 1 до 9 мм²;

- рециркуляция отработавших газов не учитывается;

- влиянием наличия турбокомпрессора для режима холостого хода пренебрегли [17].

В таблице 1 представлены данные, которые были приняты в качестве исходных данных при расчетах, а на рисунке 1, б – фрагмент расчета расхода газов через первое компрессионное кольцо в программе Дизель-РК.

¹ Автомобильные двигатели: учебник / М. Г. Шатров, К. А. Морозов, И. В. Алексеев [и др.]; под ред. М.Г. Шатрова. М.: Академия, 2010. 464 с.

Таблица 1
Технические характеристики двигателей, используемых для расчёта
Источник: составлено авторами.

Table 1
Technical characteristics of engines used for calculation
Source: compiled by the authors.

Модель Model	204DTD	D4CB	Cummins ISF3.8	TD520GE	КамАЗ- 740	D13A440	TAD1640 GE
Число цилиндров Number of cylinders	4	4	4	4	8	6	6
Рабочий объём, л Volume, l	2,0	2,5	3,8	4,8	11,8	12,8	16,1
Диаметр цилиндра, мм Bore, mm	83	91	102	108	120	131	144
Ход поршня, мм Stroke of the piston, mm	92,35	96	115	130	130	158	165
Атмосферное давление, бар Ambient pressure, bar	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
Температура, К Ambient temperature, K	295	295	295	295	295	295	295
Объём цилиндра, л Volume of cylinder, l	0,5	0,624	0,940	1,191	1,470	2,130	2,687
Цикловой массовый расход воздуха, мг Stroke mass airflow, mg	475,69	594,40	894,59	1133,75	1399,69	2027,34	2558,21
Степень сжатия Compression ratio	15,5	17,6	17,2	17,5	18	18,1	17,5
Номинальная частота вращения, мин ⁻¹ Nominal speed, min ⁻¹	4000	3800	3600	1500	2600	2100	1500

Выполнение расчетов с помощью разных специализированных пакетов программ, например, Дизель-РК или GT-Power, является трудоемкой вычислительной задачей, поэтому нами предложено было сделать серию вычислений для двигателей разной размерности, а выявленные закономерности использовать в дальнейшем как регрессионную зависимость. Для этой цели применялось программное обеспечение MatLab.

Эксперименты выполнялись на двигателе D4CB автомобилей Hyundai/Kia в условиях лаборатории «Технической эксплуатации» ИРНТУ (его характеристики приведены в таблице 1), а производственный эксперимент выполнялся в условиях дилерского центра Land-rover (г. Иркутск) на однотипных марках дизельных двигателей 306DT. Данный двигатель имеет следующие характеристики: рабочий объем 2993 см³, диаметр цилиндра

84 мм, ход поршня 90 мм, степень сжатия – 16,1, число цилиндров – 6.

Важным моментом при испытаниях было соблюдение постоянства теплового режима. Для этого измерения проводились только для полностью прогретого до рабочей температуры двигателя.

Расходы воздуха с замкнутой системой вентиляции картера и при изоляции сапуна от впускного тракта измерялись приборным комплексом USB Autoscope III. Осциллограф при этом работал в двухканальном режиме с частотой дискретизации 125 кГц, где один из каналов служил измерителем сигнала с ДМРВ, а второй – с датчика положения распределительного вала для синхронизации с порядком работы цилиндров. При обработке применялся созданный авторами скрипт для обработки аналогового циклического сигнала².

² Программа для обработки и фильтрации экспериментальных данных FILTERING KYD / Кривцов С.Н., Яковчук П.С., Денгин И.Д. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022680578, 02.11.2022. Заявка № 2022680041 от 28.10.2022.

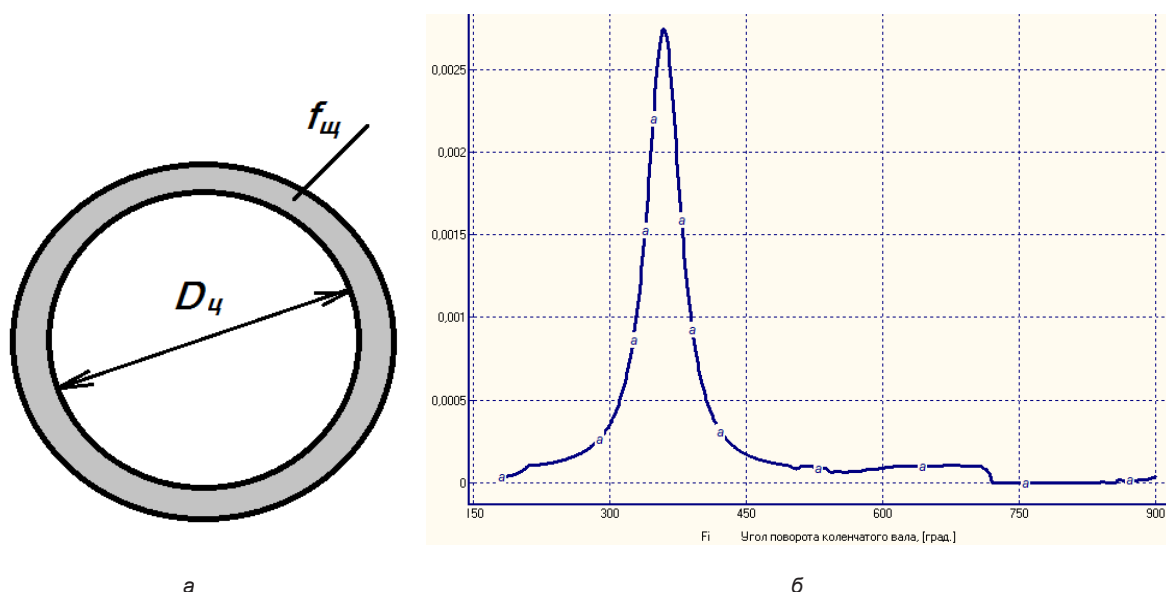


Рисунок 1 – Площадь сечения неплотности цилиндро-поршневой группы и фрагмент расчета расхода газов через первое компрессионное кольцо: а – графическое представление площади сечения неплотности ЦПГ; б – фрагмент расчета расхода газов через первое компрессионное кольцо
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Cross-sectional area of the cylinder-piston group leak and a fragment of the calculation of gas flow through the first compression ring: а – graphic scheme of cross-sectional area of the cylinder-piston group leak; б – fragment of the calculation of gas flow through the first compression ring
Source: compiled by the authors.

$f_{щ}$ – площадь сечения неплотности ЦПГ,
 $D_{ц}$ – диаметр цилиндра
 $f_{щ}$ – cross-sectional area of the cylinder-piston group leak, $D_{ц}$ – bore.

При расчетах определялось как абсолютное значение расхода картерных газов в гр/с как разность расходов воздуха с замкнутой системой вентиляции картера и при изоляции сапуна от впускного тракта, так и относительное, в процентах от расхода воздуха, поступившего в цилиндр:

$$\delta = \frac{G_B - G'_B}{G_B} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где G'_B – расход воздуха, проходящий через ДМРВ,

G_B – расход воздуха, поступающего из атмосферы при изолировании сапуна системы вентиляции картера от системы впуска.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты моделирования расхода воздуха и расхода картерных газов с учетом выражений (1), (2), (3), (4), (5) приведены в таблице 2. В ней указаны расходы картерных газов для исследуемых двигателей (см. таблицу 1), с учетом изменения площади неплотностей от 1 до 9 мм².

Графическая интерпретация выявленной зависимости приведена на рисунке 2.

Таблица 2

Данные расхода картерных газов через один цилиндр в зависимости от диаметра цилиндра и площади утечек через поршневые кольца
Источник: составлено авторами.

Table 2

Data on the of crankcase gases flow through one cylinder depending on the cylinder diameter and the area of leaks through the piston rings
Source: compiled by the authors.

$f_{ц}, \text{мм}^2$	Расход картерных газов при диаметре цилиндра $D_{ц}$ (мм) Crankcase gas flow at bore $D_{ц}$ (mm)						
	83	91	102	108	120	131	144
1	0,28	0,30	0,30	0,31	0,31	0,32	0,32
2	0,53	0,58	0,59	0,61	0,62	0,63	0,63
3	0,77	0,84	0,86	0,90	0,92	0,94	0,94
4	0,99	1,09	1,13	1,18	1,20	1,24	1,24
5	1,19	1,32	1,38	1,45	1,48	1,53	1,54
6	1,38	1,54	1,63	1,71	1,76	1,82	1,83
7	1,56	1,74	1,86	1,95	2,02	2,10	2,11
8	1,72	1,93	2,08	2,20	2,28	2,38	2,40
9	1,87	2,11	2,30	2,44	2,53	2,66	2,68

Зависимость расхода картерных газов на холостом ходу от диаметра и площади неплотности цилиндр/поршень была аппроксимирована уравнением множественной регрессии с помощью приложения Curve fitting tool, в среде MatLab.

Статистическая оценка регрессионной модели процесса формирования зависимости расхода картерных газов от диаметра цилиндра

и площади неплотностей ЦПГ выполнена в программной среде MATLAB с использованием метода наименьших квадратов. При доверительной вероятности 0,99 рассчитаны следующие статистические параметры: сумма квадратов SSE, коэффициент детерминации R^2 , скорректированный коэффициент R^2 , среднеквадратичная ошибка RMSE. Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты статистической оценки регрессионной модели процесса формирования разности расхода воздуха от диаметра цилиндра и площади неплотностей ЦПГ
Источник: составлено авторами.

Table 3

Results of statistical evaluation of the regression model of the formation process of the difference in air flow from the cylinder diameter and the area of leaks of the cylinder-piston group
Source: compiled by the authors.

Зависимость Function	Статистические параметры при доверительной вероятности 0,99 Statistical parameters at a confidence level of 0.99			
	SSE	R^2	Adjusted R^2	RMSE
$G_{кр} = f(D_{ц}, f_{ц})$	0,0102	0,999	0,999	0,0138

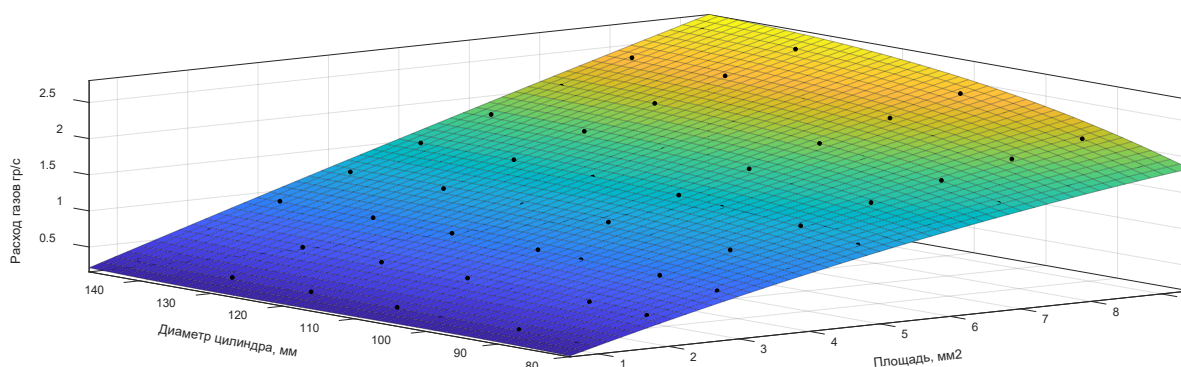


Рисунок 2 – График зависимости расхода газов от диаметра цилиндра и площади утечек
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Graph of gas flow dependence on cylinder diameter and leak area
Source: compiled by the authors.

Обработка данных позволила констатировать, что наилучшие результаты множественной регрессии получены при использовании полиномиальной зависимости второго порядка. После оценки значимости коэффициентов с доверительной вероятностью 0,99 получено следующее выражение:

$$G_{кр} = 0,03203 \cdot D_{ц} - 0,08484 \cdot f_{щ} - 0,01504 \cdot f_{щ}^2 + 0,006465 \cdot f_{щ} \cdot D_{ц} - 0,0003098 \cdot D_{ц}^2 + 0,00009171 \cdot f_{щ}^2 \cdot D_{ц} - 0,00002571 \cdot f_{щ} \cdot D_{ц}^2 + 0,0000009689 \cdot D_{ц}^3 - 1,065 \quad (11)$$

где $D_{ц}$ – диаметр цилиндра, мм;

$f_{щ}$ – площадь неплотности цилиндра, мм².

Эксперименты, проведенные в лабораторных условиях на двигателе D4CB (рисунок 3), показали, что величины расходов воздуха с

замкнутой системой вентиляции картера и при изоляции сапуна от впускного тракта различаются в диапазоне частот вращения от 800 до 2400 мин⁻¹ и выше. Причем эта разность положительна. Это подтверждает теоретические предпосылки возможности применения этого параметра, как диагностического [18]. В то же время анализ данных графика позволяет заключить, что разность расходов воздуха с замкнутой системой вентиляции картера и при изоляции сапуна от впускного тракта практически не изменяется от частоты вращения коленчатого вала двигателя. Эти данные не противоречат фактам, представленным в работе [19, 20], где автор пришел к аналогичным выводам. Это объясняется тем, что на холостом ходу индикаторное давление в цилиндре, в том числе среднее, значительно ниже, чем под нагрузкой выражения (4), (5).

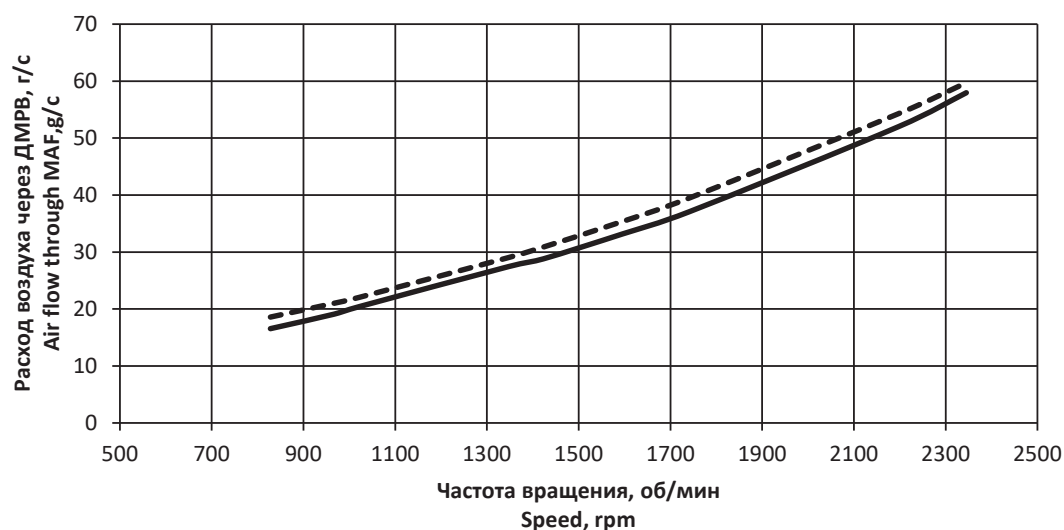


Рисунок 3 – Зависимость расходов воздуха двигателем D4CB через датчик массового расхода воздуха сплошная линия – с замкнутой системой вентиляции картера, штриховая – сапун изолирован от впуска
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Dependence of air consumption by the D4CB engine via the mass air flow sensor: solid line – with closed crankcase ventilation system, dashed line – the crankcase breather is isolated from the intake
Source: compiled by the authors.

На рисунке 4 изображена графическая зависимость разности расходов воздуха с замкнутой системой вентиляции картера и при изоляции сапуна от впускного тракта автомобилей Land Rover с двигателем 306DT, полученная в ходе производственной проверки. Используя полученную нами зависимость мо-

жем констатировать, что с увеличением пробега от 25 (то есть практически неизношенного двигателя) до 300 тыс. км, расход газов увеличивается в 3,7 раза (или от 1,8 до 9,8%), это соответствует изменению площади неплотностей цилиндра от 1 мм² до 4,2 мм².

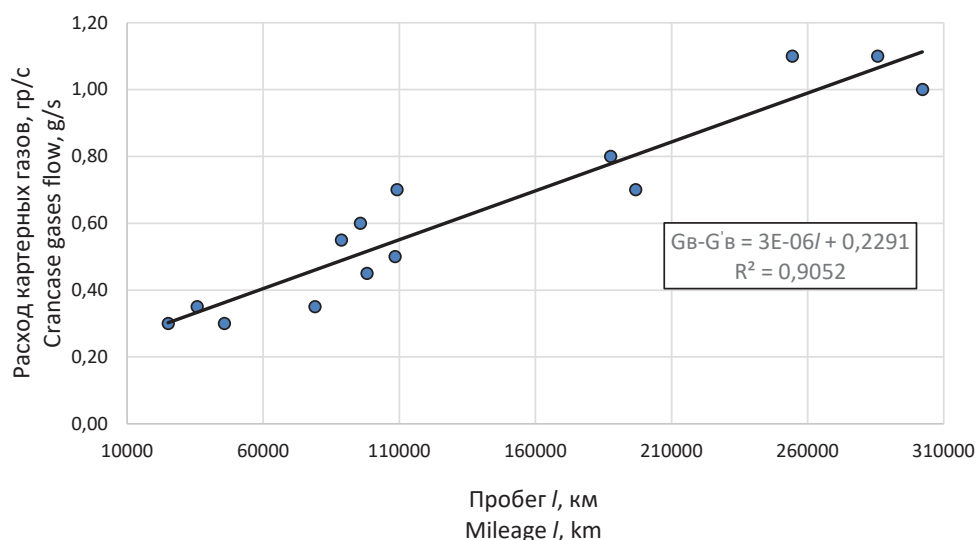


Рисунок 4 – График зависимости разности расхода воздуха на холостом ходу двигателей 306DT автомобилей Land Rover от пробега
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Graph of the dependence of the difference in air consumption at idle speed of 306DT engines of Land Rover vehicles on mileage
Source: compiled by the authors.

ВЫВОДЫ

Результаты, полученные в ходе численного эксперимента, показали следующее:

1) Выявлена универсальная закономерность расхода картерных газов от износа ЦПГ, позволяющая проверять техническое состояние двигателя посредством штатных средств бортовой самодиагностики и нормировать диагностический параметр, пропорциональный расходу картерных газов в зависимости от литража двигателя и диаметров цилиндров.

2) Установлено, что с увеличением диаметра цилиндра уменьшается процентное соотношение прорывающихся газов через неплотности цилиндров от общей массы поступающего воздуха. Так, при изменении диаметра цилиндра от 83 до 144 мм и площади утечек в 1 мм² доля прорывающихся газов изменяется от 8,76 до 1,8%.

3) Производственной проверкой установлено, что разность расходов с изолированной и замкнутой системой вентиляции картера линейно зависит от пробега автомобиля.

4) Экспериментальная проверка возможности применения разности расходов воздуха с замкнутой системой вентиляции картера и при изоляции сапуна от впускного тракта как диагностического параметра показала, что данный параметр пропорционален как структурному параметру в виде площади неплотностей цилиндра, так и проверенному диагностическому параметру – расходу картерных газов.

Ограничения исследования

Предложенная методика и выявленные закономерности имеют следующие временные и эксплуатационные границы применимости:

- метод предполагает исправность системы принудительной вентиляции картера (PCV); негерметичность патрубков или неисправность клапана вентиляции могут искажать измеряемую разность расходов воздуха;
- линейная зависимость разности расходов от пробега установлена производственной проверкой, однако пробег является косвенным показателем износа; при различных условиях эксплуатации (нагрузка, качество масла, топлива, температурные режимы) один и тот же пробег может соответствовать разной степени износа ЦПГ, что следует учитывать при практическом применении.

Указанные ограничения не снижают ценности полученных результатов, но определяют область корректного применения предложенного диагностического подхода и направления для дальнейших исследований (в частности,

изучение влияния наддува, расширение размерного ряда двигателей, учет неисправностей системы вентиляции картера).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Pavlov A., Karagodin V. Ensuring reliability of transportation vehicles with redundancy methods // MATEC Web of Conferences. 2021. Т. 334. С. 02028. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202133402028>
2. Cui Y., Mu H., Yi X., Wei, S. Reliability Optimization Design of Diesel Engine System Based on the GO Method. Appl. Sci. 2023, 13, 3727. <https://doi.org/10.3390/app13063727>
3. Wang D.F., Yang H.X. Reliability Design Analysis of Engine //Intern. Combust. Engine Accessories. 2021. Т. 333. С.37-38.
4. Huang Y., Elvin C.Y. Ng, Yat-shing Yam, Casey K.C. Lee, Nic C. Surawski, Wai-chuen Mok, Bruce Organ, John L. Zhou, Edward F.C. Chan. "Impact of potential engine malfunctions on fuel consumption and gaseous emissions of a Euro VI diesel truck," Energy Conversion and Management, vol.184, pp. 521–529, Mar. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.076>
5. Дунаев А.В., Тарасенко В.Е., Жешко А.А. Бесприборные приемы контроля технического состояния автотракторных двигателей. Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2024;1(57):199–205.
6. Чечет В.А., Демьяненко С.Н. Актуальность модернизации компрессионно-вакуумного метода в современных условиях // В сборнике: Доклады ТСХА: сб. ст. М., 2020. С. 310–312.
7. Шнитков Г.В., Воронин Д.М. Анализ современных способов оценки технического состояния цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: материалы XIII Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры надежности и ремонта машин ФГБОУ ВО Новосибирского ГАУ, Новосибирск, 15 декабря 2021 г. Новосибирск: Издательский центр Новосибирского государственного аграрного университета «Золотой колос», 2021. С. 54–58. EDN QMDDBM.
8. Понизовский А.Ю. Определение наработки двигателя по параметру неплотности цилиндропоршневой группы // В сборнике: Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: материалы XV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти доцента М.А. Анфиногенова. Новосибирск, 2023. С. 125–127.
9. Кривцов С.Н., Пукало А.В., Кривцова Т.И. Сравнение диагностических параметров оценки герметичности надпоршневого пространства цилиндров дизельного двигателя при прокручивании стартером без подачи топлива // Журнал ААИ. № 6. 2015. С. 54–57.
10. Krivtsov S.N., Krivtsova T.I., Grebennikov A.S. Rotational dynamics of piston diesel engine crank-

shaft with deactivated cylinders at idle // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 2019 International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering, ICI2AE 2019, Irkutsk, 27 мая – 01 2019 года. Vol. 632. Irkutsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012040. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012040>. EDN DXEEMC.

11. Safonov A.V., Vervey M.L., Syrbakov A.P., Shnitkov G V., Krivtsov S N., Berezhnov N N. Diagnostics of piston space tightness by pressure change in engine casing under dynamic loading // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 2019 International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering, ICI2AE 2019, Irkutsk, 27 мая – 01 2019 года. Vol. 632. Irkutsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012069. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012069> EDN SDQNXM.

12. Кулешов А.С., Козлов А.В., Фадеев Ю.М., Барченко Ф.Б. Программа ДИЗЕЛЬ-РК: Моделирование и оптимизация рабочих процессов ДВС // В сборнике: Двигатель-2010: материалы Международной конференции: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С. 287–292.

13. Kuleshov A, Mahkamov K. Multi-zone diesel fuel spray combustion model for the simulation of a diesel engine running on biofuel. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 2008;222(3):309-321. <https://doi.org/10.1243/09576509JPE530>

14. Кулешов А.С., Фадеев Ю.М., Кулешов А.А. Развитие многозонных моделей для расчета сгорания в современных ДВС // Двигателестроение. 2017. № 2(268). С. 7–10. EDN ZCHZNH.

15. Быкова Ю.С., Вагин А.А., Андриянов С.М., Исламгулов Т.Ф., Сафин Р.Ф. Комплексный анализ прокладки газового стыка и элементов, ее окружающих, численным методом // Автомобильная промышленность. 2024. № 5. С. 11–19.

16. Kuleshov A., Grekhov L., "Multidimensional Optimization of DI Diesel Engine Process Using Multi-Zone Fuel Spray Combustion Model and Detailed Chemistry NOx Formation Model," SAE Technical Paper 2013-01-0882, 2013, <https://doi.org/10.4271/2013-01-0882>

17. Кривцов С.Н., Яковчук П.С., Деньгин И.Д. Влияние технического состояния дизельного двигателя на изменения давления в цилиндре // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 25-летию Института транспорта, Тюмень, 11–12 апреля 2024 года. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2024. С. 163–167. EDN SDZRYG.

18. Кривцов С.Н., Яковчук П.С. Метод диагностирования цилиндропоршневой группы автомобильного двигателя // Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации: материалы 116-й Международной науч.-техн. конференции. (Улан-Удэ, 2023). Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2023. С. 99–104.

19. Николаев Е.В., Филиппова Е.М. Техническое состояние цилиндро-поршневой группы и расход картерных газов // Техника и оборудование для села. 2011. № 3. С. 41–42.

20. Кулаков А.Т., Нуретдинов Д.И., Назаров Ф.Л. Контроль давления картерных газов дизельного двигателя при испытаниях и в эксплуатации для встроенной системы диагностирования // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2019. № 3 (82). С. 36–42.

REFERENCES

1. Pavlov A., Karagodin V. Ensuring reliability of transportation vehicles with redundancy methods // MATEC Web of Conferences. 2021. T. 334. P. 02028. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202133402028>

2. Cui Y., Mu H., Yi X., Wei, S. Reliability Optimization Design of Diesel Engine System Based on the GO Method. Appl. Sci. 2023, 13, 3727. <https://doi.org/10.3390/app13063727>

3. Wang D. F., Yang H. X. Reliability Design Analysis of Engine //Intern. Combust. Engine Accessories. 2021. T. 333. P.37-38.

4. Huang Y., Elvin C.Y. Ng, Yat-shing Yam, Casey K.C. Lee, Nic C. Surawski, Wai-chuen Mok, Bruce Organ, John L. Zhou, Edward F.C. Chan. "Impact of potential engine malfunctions on fuel consumption and gaseous emissions of a Euro VI diesel truck," Energy Conversion and Management, vol. 184, pp. 521–529, Mar. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.076>

5. Dunaev A.V., Tarasenko V.E., Zheshko A.A. Non-instrumental methods for monitoring the technical condition of automotive and tractor engines. Mechanization and Electrification of Agriculture. 2024; 1 (57): 199–205.

6. Chechet V.A., Demyanenko S.N. Relevance of the modernization of the compression-vacuum method in modern conditions. In the collection: Reports of the Timiryazev Agricultural Academy: collection of articles. Moscow, 2020. Pp. 310-312.

7. Shnitkov G.V., Voronin D.M. Analysis of modern methods for assessing the technical condition of the cylinder-piston group of an internal combustion engine // The state and innovations of technical service of machines and equipment: Proceedings of the XIII international scientific and technical conference dedicated to the 70th anniversary of the Department of Reliability and Repair of Machines of the Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, December 15, 2021. Novosibirsk: Publishing center of the Novosibirsk State Agrarian University "Golden Ear", 2021. Pp. 54-58. EDN QMDDBM.

8. Ponizovsky A.Yu. Determination of engine operating time by the cylinder-piston group leakage parameter. In the collection: Status and Innovations in Technical Service of Machines and Equipment. Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference Dedicated to the Memory of Associate Professor M.A. Anfinogenov. Novosibirsk, 2023. pp. 125-127.

9. Krivtsov S.N., Pukalo A.V., Krivtsova T.I. Comparison of Diagnostic Parameters for Assessing the Tightness of the Above-Piston Space of Diesel Engine Cylinder Heads When Cranking with a Starter Without Fuel. *AAI Journal* No. 6, 2015, pp. 54-57.

10. Krivtsov S.N., Krivtsova T.I., Grebennikov A.S. Rotational dynamics of piston diesel engine crankshaft with deactivated cylinders at idle // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2019 International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering, ICI2AE 2019, Irkutsk, May 27 – 01, 2019. Vol. 632. Irkutsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012040. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012040>. EDN DXEEMC.

11. Safonov A.V., Verter M.L., Syrbakov A.P., Shnitkov G.V., Krivtsov S.N., Berezhnov N.N. Diagnostics of piston space tightness by pressure change in engine casing under dynamic loading. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2019 International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering, ICI2AE 2019, Irkutsk, May 27 – 01 2019. Vol. 632. Irkutsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012069. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012069>. EDN SDQNXM.

12. Kuleshov A.S., Kozlov A.V., Fadeev Yu.M., Barchenko F.B. DIESEL-RK Program: Modeling and Optimization of Internal Combustion Engine Operating Processes. In the collection: Engine-2010: Proceedings of the International Conference: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2010. Pp. 287-292.

13. Kuleshov A., Mahkamov K. Multi-zone diesel fuel spray combustion model for the simulation of a diesel engine running on biofuel. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: *Journal of Power and Energy*. 2008; 222(3): 309-321. <https://doi.org/10.1243/09576509JPE530>

14. Kuleshov A.S., Fadeev Yu.M., Kuleshov A.A. Development of multi-zone models for calculating combustion in modern internal combustion engines. *Dvigatelsestroyeniye*. 2017. No. 2(268). P. 7-10. EDN ZCHZNH.

15. Bykova Yu.S., Vagin A.A., Andriyanov S.M., Islamgulov T.F., Safin R.F. Complex analysis of the gas joint laying and the elements surrounding it using a numerical method. *Automotive industry*. 2024. No.5. P. 11-19.

16. Kuleshov A., Grekhov L., "Multidimensional Optimization of DI Diesel Engine Process Using Multi-Zone Fuel Spray Combustion Model and Detailed Chemistry NOx Formation Model," SAE Technical Paper 2013-01-0882, 2013 <https://doi.org/10.4271/2013-01-0882>

17. Krivtsov S.N., Yakovchuk P.S., Dengin I.D. Influence of the Technical Condition of a Diesel Engine on Changes in Cylinder Pressure. Transport and Transport-Technological Systems: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference Dedicated to the 25th Anniversary of the Institute of Transport, Tyumen, April 11–12, 2024. Tyumen: Tyumen Industrial University, 2024. P. 163–167. EDNSDZRYG.

18. Krivtsov S.N., Yakovchuk P.S. Method for diagnosing the cylinder-piston group of an automobile engine. Safety of wheeled vehicles under operating conditions: Proceedings of the 116th international scientific and technical conference. (Ulan-Ude, 2023). Ulan-Ude: Publishing house of VSGUTU, 2023. Pp. 99–104.

19. Nikolaev E.V., Filippova E.M. Technical condition of the cylinder-piston group and crankcase gas consumption. *Machinery and equipment for the village*. 2011; No. 3. pp. 41–42.

20. Kulakov A.T., Nuretdinov D.I., Nazarov F.L. Monitoring the crankcase gas pressure of a diesel engine during testing and operation for the built-in diagnostic system. Text: direct. *Socio-economic and technical systems: research, design, optimization*. 2019; No. 3 (82). P. 36-42.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Яковчук П.С. Сбор статистических данных, обработка данных, написание текста рукописи, редактирование текста рукописи, оформление рукописи, работа с графическим материалом (45%).

Кривцов С.Н. Формулировка направления, проблемы, темы исследования; общее руководство исследованиями (35%).

Дыгало В.Г. Обзор результатов предшествующих исследований; проверка статистических исследований (20%).

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Yakovchuk P.S. Statistical data collection, data processing, writing and editing the text, article design, working with graphic material (45%).

Krivtsov S.N. Formulation of the research direction, problem statement, theme development; general management of the research (35%).

Dygalo V.G. Review of the results of previous studies; verification of statistical studies (20%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Яковчук Павел Сергеевич – аспирант кафедры «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8192-4953>,

SPIN-код: 3053-2935,

e-mail: pashajakovchuk@mail.ru

Кривцов Сергей Николаевич – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), также проф. кафедры «Машиноведение» Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова (677000, г. Якутск, ул. Белинского, д.58).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0462-8455>,

SPIN-код: 9278-4018,

e-mail: krivcov_sergei@mail.ru

Дыгало Владислав Геннадьевич – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (Мытищинский филиал) (105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4689-5976>,

SPIN-код: 9072-3095,

e-mail: dygalovg@bmstu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yakovchuk Pavel S. – postgraduate student, Department of Automobile Transport, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov Street, Irkutsk, 664074).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8192-4953>,

SPIN-code: 3053-2935,

e-mail: pashajakovchuk@mail.ru

Krivtsov Sergey N. – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Automobile Transport, Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, Lermontov St., 83), Professor of the Department of Mechanical Engineering, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov (677000, Yakutsk, Belinskiy Street, 58).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0462-8455>,

SPIN-code: 9278-4018,

e-mail: krivcov_sergei@mail.ru

Dygalo Vladislav G. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State Technical University named after N.E. Bauman (Mytishchinskiy Branch) (5, 2-nd Baumanskaya Street, Moscow, 105005).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4689-5976>,

SPIN-code: 9072-3095,

e-mail: dygalovg@bmstu.ru

Научная статья
УДК 656.1
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-446-457>
EDN: UHUIAU



ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И НАТУРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРКОВОЧНОЙ ТЕРРИТОРИИ

М.Г. Бояршинов, Ю.А. Щукин ✉, Е.Д. Сидоров

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, Россия

✉ ответственный автор
cshukin-yura@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность исследования обусловлена необходимостью количественного обоснования планирования парковочного пространства как элемента единой транспортной системы. В работе изучены особенности функционирования парковочной территории: заполняемость, интенсивность заездов и выездов, продолжительность пребывания, интервалы между заездами. На основе натурных наблюдений установлены статистические закономерности и выполнена верификация имитационной модели. Проведено исследование особенностей функционирования парковочной территории, включая анализ заполняемости мест, интенсивности заездов и выездов, продолжительности пребывания и интервалов между заездами автомобилей, а также других ключевых показателей. Наблюдения осуществлялись в течение одной осенней недели 2024 г.

Материалы и методы. Натурное исследование проводилось с использованием стационарных систем фото- и видеофиксации «Азимут ДТ». Обработка полученных данных выполнена с помощью методов математической статистики, включая оценку законов распределения, корреляционный анализ и применение критерия Колмогорова. Для прогнозирования работы парковочной системы разработана имитационная модель, реализованная в среде AnyLogic.

Результаты. Количественные данные были собраны с помощью стационарных систем фото- и видеонаблюдения, обеспечивающих постоянный контроль за расположением автомобилей на парковке в течение всего периода исследования. Основные показатели функционирования парковочной территории показывают зависимость от дня недели, что необходимо учитывать при планировании, расположении и эксплуатации городской парковочной инфраструктуры.

Проведённый корреляционный анализ подтвердил наличие функциональной связи между интенсивностью заездов и выездов автомобилей на парковочной территории и транспортным потоком на прилегающей дороге. Полученные результаты использованы при разработке имитационной модели парковочной территории. Выполнено сравнение данных вычислительного моделирования с результатами натурных измерений. Результаты, полученные при проведении исследования, полезны для организации движения транспорта по городской улично-дорожной сети, при зонировании и планировании городской территории, могут служить основой для разработки и оценки градостроительных и архитектурно-планировочных решений.

Получены осреднённые значения интенсивности заездов и интервалов между ними (6,7–14,5 мин). Гипотеза об экспоненциальном распределении интервалов отвергнута. Гипотеза о пуассоновском потоке для малых интервалов (2 мин) согласуется с данными. Выявлена и аппроксимирована линейная корреляционная связь интенсивностей въезда/выезда с интенсивностью транспортного потока на прилегающей дороге ($R = 0,81–0,86$). Сравнение натурных и модельных кривых по чебышёвской норме показало расхождение 0,0058–0,0891.

Обсуждение и заключение. Подтверждена функциональная зависимость параметров парковочной территории от внешнего трафика. Разработанная имитационная модель адекватно воспроизводит функционирование парковочной территории. Результаты могут быть рекомендованы для градостроительного планирования и организации парковочных территорий, сопоставимых с рассматриваемой, однако разработанная методика может быть распространена на другие объекты парковочной инфраструктуры с целью рационального использования городских ресурсов и улучшения транспортной системы.

© Бояршинов М.Г., Щукин Ю.А., Сидоров Е.Д., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: парковки, имитационное моделирование, транспортный поток, натурные наблюдения, заполняемость парковочной территории, интенсивность въезда-выезда, продолжительность размещения транспортных средств, корреляционный анализ, AnyLogic, статистическая обработка, улично-дорожная сеть, оборачиваемость парковочных мест

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность муниципальному казенному учреждению «Пермская дирекция дорожного движения» за содействие в предоставлении данных об использовании объекта парковочной инфраструктуры.

Статья поступила в редакцию 12.03.2026; одобрена после рецензирования 10.04.2026; принята к публикации 15.06.2026.

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: Бояршинов М.Г., Щукин Ю.А., Сидоров Е.Д. Вычислительный эксперимент и натурное исследование характеристик парковочной территории // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 3. С. 446-457. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-446-457>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-446-457>

EDN: UHUIAU

COMPUTATIONAL EXPERIMENT AND FIELD STUDY OF PARKING AREA CHARACTERISTICS

Mikhail G. Boyarshinov, Yuriy A. Shchukin ✉, Evgeniy D. Sidorov

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russia

✉ corresponding author
cshukin-yura@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The relevance of this study comes from the need to substantiate quantitatively parking space planning as an element of a unified transportation system. The operational characteristics of the parking area, including occupancy, entry and exit rates, dwell times, and intervals between entries have been examined. Based on field observations, statistical patterns have been established and a simulation model has been verified. The survey of the parking area operational characteristics has been conducted, including an analysis of space occupancy, entry and exit rates, dwell times, and intervals between entries, as well as other key indicators. Observations were being made over the week in autumn, 2024.

Materials and Methods. The stationary Azimut DT photo and video recording systems have been used to conduct the field study. The obtained data was processed with the help of mathematical statistics methods, including distribution law assessment, correlation analysis, and the Kolmogorov test. To predict parking system performance the simulation model has been developed and implemented in the AnyLogic environment.

Results. Quantitative data has been collected by stationary photo and video surveillance systems, providing continuous monitoring of vehicle distributions in the parking lot throughout the whole research period. Key parking area performance indicators have showed a day-of-week dependence, which must be considered in planning, locating, and operating urban parking infrastructure.

The correlation analysis confirmed a functional relationship between the intensity of vehicle entry and exit within the parking area and traffic flow on the adjacent road. The obtained results have been used to develop a simulation model of the parking lot. Computational modeling data was compared with field measurements. The data obtained through the study are useful for organizing traffic flow on the urban street and road network, for zoning and designing the urban area, and can serve as a basis for developing and evaluating urban planning and architectural solutions.

Average values of entry and exit rates and intervals between them have been obtained (6.7–14.5 min). The hypothesis of an exponential distribution of intervals has been rejected. The hypothesis of a Poisson flow for short

© Boyarshinov Mikhail G., Shchukin Yuriy A., Sidorov Evgeniy D., 2026



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

intervals (2 min) is consistent with the data. A linear correlation between entry/exit rates and traffic flow rates on the adjacent road has been identified and approximated ($R = 0.81-0.86$). A comparison of the actual and simulated curves according to the Chebyshev norm revealed a discrepancy of $0.0058 - 0.0891$.

Discussion and Conclusions. The functional dependence of parking area parameters on external traffic has been confirmed. The developed simulation model reproduces the functioning of the parking area adequately. The results can be recommended for urban planning and organization of parking areas like under consideration. However, the developed methodology can be extended to other parking infrastructure facilities to ensure the rational use of urban resources and to improve the transportation system.

KEYWORDS: parking areas, simulation modeling, traffic flow, field observations, parking area occupancy, entry and exit intensity rate, vehicle dwell times, correlation analysis, AnyLogic, statistical processing, street and road network, parking space turnover

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors express their gratitude to the municipal state institution "Perm Directorate of Road Traffic" for assistance in providing data on the use of the parking infrastructure facility.

The article was submitted: March 12, 2026; **approved after reviewing:** April 10, 2026; **accepted for publication:** June 15, 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. Boyarshinov M.G., Shchukin Yu. A., Sidorov E.D. Computational experiment and field study of parking area characteristics. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (3): 446-457. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-446-457>

ВВЕДЕНИЕ

В отечественных и зарубежных исследованиях основное внимание уделяется планированию, размещению, организации и функционированию городского парковочного пространства [1, 2]. Прикладные исследования парковочного пространства позволяют выявлять закономерности и особенности взаимодействия парковочной инфраструктуры с транспортными потоками [3, 4, 5], рассматривать такие объекты как элементы единой транспортной системы [6].

В статье [7] предлагается подход к прогнозированию занятости парковочных пространств, основанный на вейвлет-преобразовании. Ключевая идея исследования состоит в том, чтобы рассматривать несколько парковок не как изолированные объекты, а как взаимосвязанную систему. Датчики стационарных систем фото- и видеофиксации применяются для оценки загруженности парковочных территорий [8, 9, 10], а также для измерения скорости и продолжительности размещения, времени размещения автомобилей [11], сбора статистических данных о работе парковочных территорий [12, 13]. Такой подход помогает выявлять характерные особенности функци-

онирования [14, 15] парковочных территорий.

В статье [16] определены входные и выходные данные, а также сформулированы функциональные требования к моделям парковочного пространства. В работе [17] предложена модель оценки доступности парковочных мест, основанная на анализе корреляционных связей между различными парковками.

Инструментарий для сбора данных о парковочной нагрузке в жилых зонах предлагается в статье [18]. Авторы исследований [19] предлагают концепцию интеллектуальной системы управления парковками в условиях использования автоматизированных транспортных средств.

Современные программные средства имитационного моделирования (AnyLogic¹, PTV Visum² и пр.) широко используются в логистике и транспортном моделировании, включая управление парковочными системами, позволяют автоматизировать процесс моделирования за счёт использования графического интерфейса, дискретно-событийной, агентной и системно-динамической парадигм, встроенного языка программирования.

Актуальность исследования обусловлена отсутствием в настоящее время достовер-

¹ AnyLogic: имитационное моделирование для бизнеса: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.anylogic.ru/> (дата обращения: 16.02.2026).

² PTV VISUM. Транспортное планирование: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ptv-vision.ru/> (дата обращения: 16.02.2026).

ного и научно-обоснованного подхода, базирующегося на достоверных результатах теоретических и эмпирических исследований, к количественному обоснованию планирования парковочного пространства как элемента единой транспортной системы. Существует насущная необходимость в надёжном инструменте прогнозирования показателей функционирования планируемых и реконструируемых парковочных территорий, позволяющего принимать обоснованные решения по оптимальному их размещению, управлению и обслуживанию.

Для непрерывного наблюдения за автомобилями использовались стационарные комплексы фото- и видеofиксации «Азимут ДТ», позволяющие фиксировать время заезда каждого автомобиля на парковочную территорию и выезда с нее. К территории парковки прилегает дорога с основным потоком транспорта.

Цель исследования – на основе натурных наблюдений установить статистические закономерности функционирования парковочной территории в центральной части города обосновать зависимость въезда/выезда транспортных средств на парковочную территорию в зависимости от внешнего трафика, провести верификацию полученных результатов с имитационной моделью.

Несмотря на значительное число работ, посвящённых планированию и организации парковочного пространства, большинство из них либо базируются на усреднённых нормативах без привязки к реальной динамике спроса, либо рассматривают парковочные территории изолированно, без учёта их взаимодействия с

транспортным потоком на прилегающей дороге. Отсутствуют количественно обоснованные модели, которые позволяли бы по данным систем фото- и видеofиксации прогнозировать заполняемость парковочной территории.

Задачи:

1. Провести непрерывный мониторинг заполняемости парковочной территории, интервалов заезда/выезда транспортных средств, а также интенсивности.
2. Оценить соответствие потоков заезда пуассоновской и экспоненциальной моделям.
3. Выполнить корреляционный и регрессионный анализ связи «парковочная территория – дорога».
4. Провести сравнение имитационной модели с результатами обработки натурных наблюдений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования – открытая неохраняемая парковочная территория вместимостью 35 автомобилей, расположенная в непосредственной близости от научно-исследовательского центра площадью 12 тыс. м², жилого комплекса на 250 квартир с частной территорией и торгового центра на 6,7 тыс. м² (рисунок 1). Парковочная территория имеет один совмещённый въезд-выезд, что упрощает фиксацию событий. Прилегающая улично-дорожная сеть представлена двухполосной дорогой районного значения (по одной полосе в каждом направлении) с ограничением скорости 60 км/ч. Вблизи расположен остановочный пункт трамвайного городского транспорта.

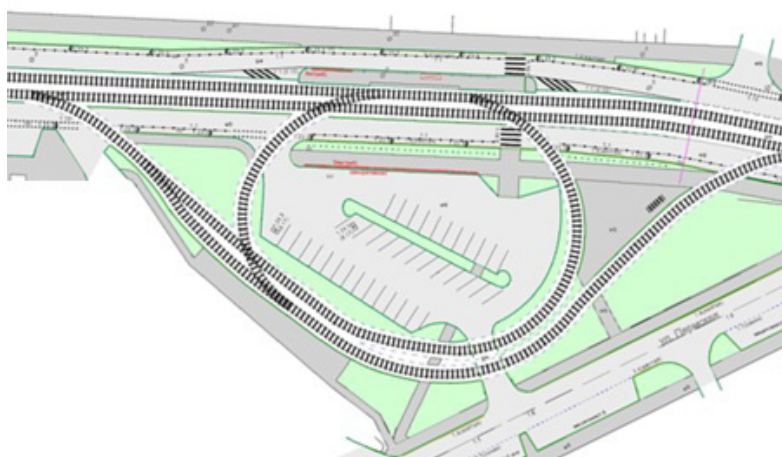


Рисунок 1 – Схема парковочной территории
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Layout of the parking area.
Source: compiled by the authors.

Период наблюдений: 7 сут октября 2024 г., круглосуточно. В постобработке в полуавтоматическом режиме фиксировались момент въезда и выезда каждого автомобиля, по которым рассчитывались:

- заполняемость K , авт.;
- интенсивность въезда N^{in} и выезда N^{out} , авт/ч;
- интервалы между последовательными въездами t_{cp} , мин.

Параллельно на прилегающей дороге (двухполосное движение, ограничение скорости 60 км/ч) тем же комплексом измерялась интенсивность транспортного потока N , авт/ч.

Статистическая обработка выполнена в среде Mathcad. Проверка гипотез о распределении проводилась с использованием критерия Колмогорова. Корреляционный анализ реализован методом Пирсона. Имитационная модель построена в AnyLogic (дискретно-событийная парадигма). Входными данными

служили: зависимость $N(t)$, функции $N^{in}(t)$ и $N^{out}(t)$, а также эмпирическое распределение времени парковки. Модельное время – 7 сут, число прогонов – 30.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Заполняемость и суточная динамика.

На рисунке 2 представлен график заполняемости в рабочий день. Пиковые значения (32–34 авт.) приходятся на 11:00–13:00 и 18:00–19:00. В нерабочие дни заполняемость ниже в 1,5–2 раза и смещена на вторую половину дня.

2. Интенсивности въезда/выезда.

На рисунке 3 показаны зависимости $N^{in}(N)$ и $N^{out}(N)$. Утренний пик въезда (до 20 авт/ч) наблюдается с 8:30 до 10:00, вечерний пик выезда (до 18 авт/ч) – с 17:00 до 19:00. Среднесуточные значения по дням недели сведены в таблицу 1.

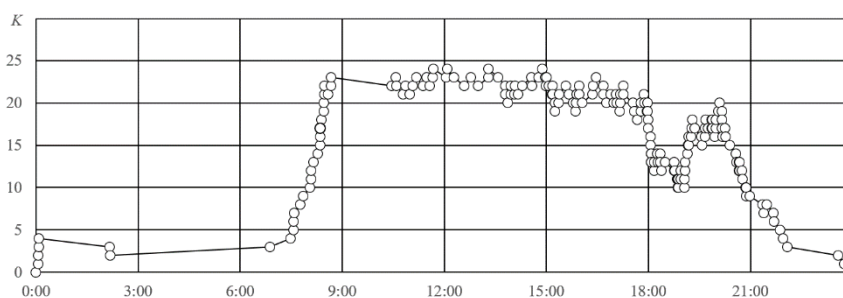


Рисунок 2 – Зависимость заполняемости парковочной территории K (авто) от времени t (час: минута)
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Dependence of the parking area occupancy K (vehicles) on time t (hour: minute)
Source: compiled by the authors.

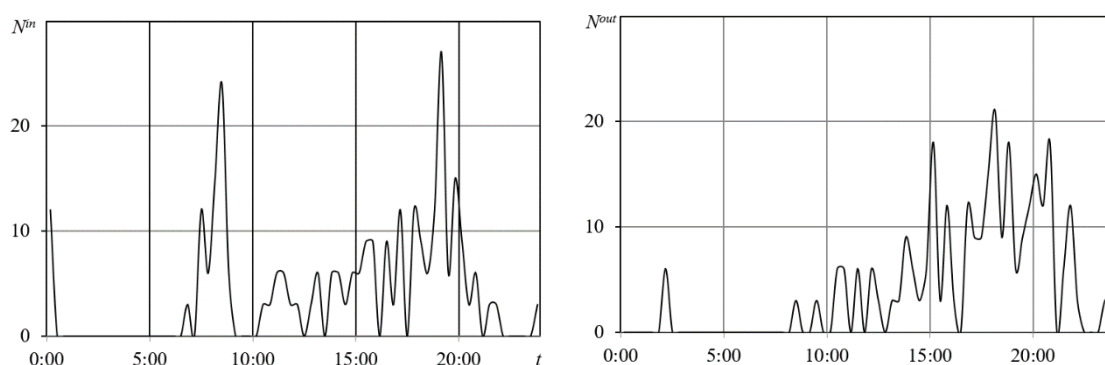


Рисунок 3 – Зависимость интенсивностей заездов N^{in} (авт/ч) на парковочную территорию (слева) и выездов N^{out} (авт/ч) с нее (справа) от времени t
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Dependence of the entry intensities N^{in} (vehicles/hour) into the parking area (on the left) and exit N^{out} (vehicles/hour) from it (on the right) on time t
Source: compiled by the authors.

Таблица 1

Среднесуточные интенсивности заездов на парковку, интервалы τ_{cp} времени между ними, значения критерия Колмогорова при оценке статистических гипотез
Источник: составлено авторами.

Table 1

Daily average parking entry intensities λ , time intervals between them τ_{cp} , and Kolmogorov test values for statistical hypothesis evaluation.

Source: compiled by the authors.

День	λ , мин ⁻¹	τ_{cp} , мин	Значения статистики Колмогорова	
			Экспоненциальное распределение	Пуассоновское распределение
Понедельник	0,0689	14,507	1,5847	0,1834
Вторник	0,0788	12,686	1,4850	0,1527
Среда	0,1488	6,7213	1,8899	0,5182
Четверг	0,1279	7,8157	1,5960	0,2800
Пятница	0,1314	7,6126	1,4418	0,3530
Суббота	0,0354	17,561	1,0143	0,0164
Воскресенье	0,0341	29,311	2,1473	0,0297

3. Статистика интервалов и проверка гипотез.

Эмпирические распределения интервалов τ (рисунок 4) имеют выраженную правостороннюю асимметрию. Гипотеза об экспоненциальном распределении отклонена для всех дней недели (критерий Колмогорова $D > 1,4$

при критическом значении 1,36). Гипотеза о пуассоновском потоке проверялась для числа заездов за двухминутные интервалы (рисунок 5); для рабочих дней расхождение незначимо ($D < 0,5$), что позволяет использовать пуассоновскую модель на малых интервалах.

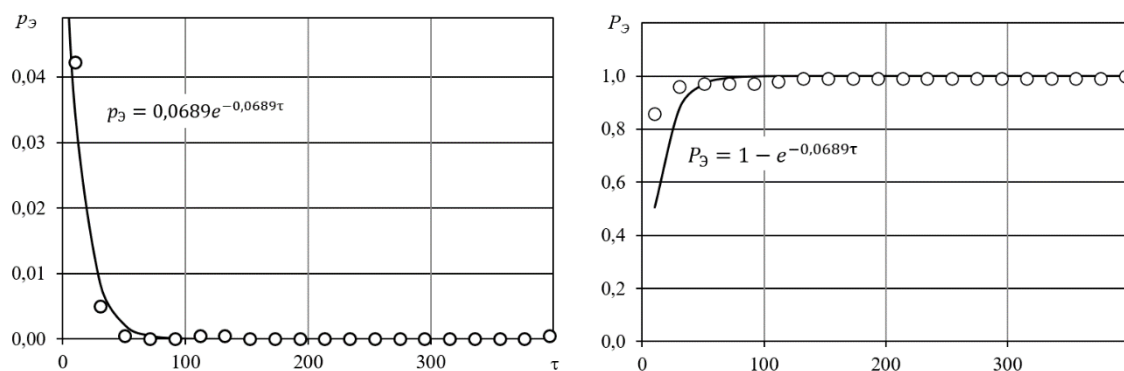


Рисунок 4 – Эмпирические (o) и экспоненциальные (—) распределения плотностей p_3 вероятностей (слева) и вероятностей P_3 (б) интервалов времени τ между заездами автомобилей на парковку (справа)
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Empirical (o) and exponential (—) distributions of the densities p_3 of probabilities (on the left) and probabilities P_3 (b) of time intervals between car entries into the parking lot (on the right)
Source: compiled by the authors.

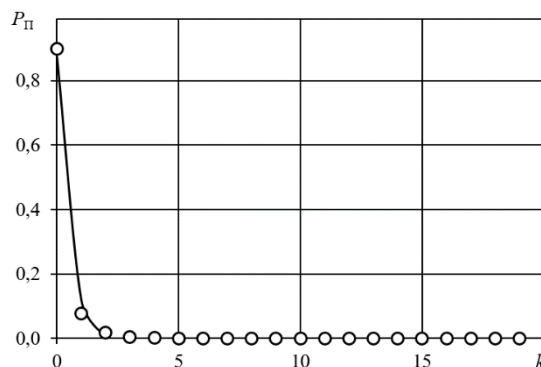


Рисунок 5 – Эмпирическое (o) и пуассоновское (—) распределения вероятностей P_k заезда k автомобилей на парковочную территорию в течение 2 мин; рабочий день октября 2024 г.
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Empirical (o) and Poisson (—) probability distributions P_k of k cars entering the parking area within 2 minutes; Weekday, October 2024
Source: compiled by the authors.

4. Корреляция с потоком транспортных средств на дороге.

На рисунках 6 и 7 показано, что динамика $N^{in}(t)$ визуально повторяет изменение интенсивности на дороге $N(t)$. Коэффициент корреляции

Пирсона для рабочих дней составляет 0,81–0,86, для выходных – 0,54–0,62. Линейная аппроксимация:

- $N^{in} = 0,21 \cdot N + 1,07$ ($R^2 = 0,73$);
- $N^{out} = 0,19 \cdot N + 0,95$ ($R^2 = 0,70$).

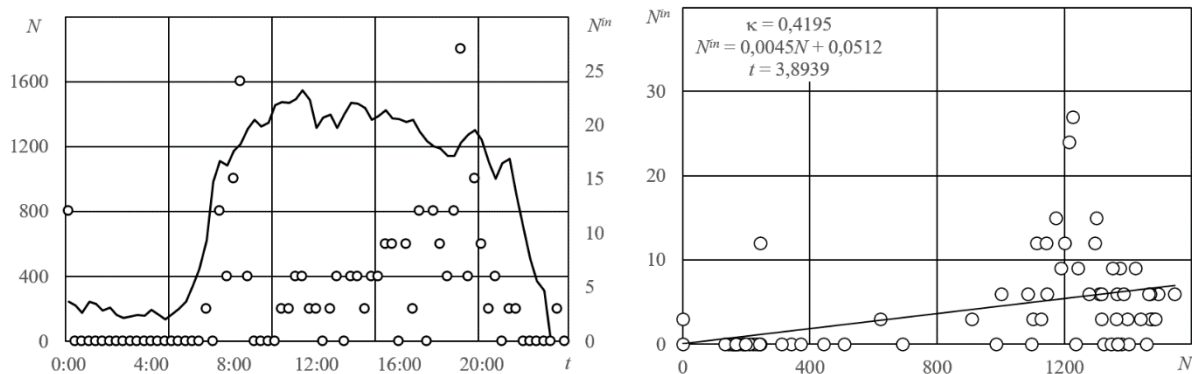


Рисунок 6 – Зависимости от времени t интенсивностей N (—, авт/ч) транспортного потока на дороге и N^{in} заезда автомобилей на придорожную парковочную территорию (маркеры «o», авт/ч, слева); зависимости $N^{in}(N)$, линейные аппроксимации (—), коэффициенты корреляции и Стьюдента (справа)
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Dependences of the intensities of the traffic flow on the road N (—, vehicles/hour) and of vehicles entering the roadside parking area N^{in} on time t (markers «o», vehicles/hour, on the left); dependences $N^{in}(N)$, linear approximations (—), correlation coefficients and Student's t-test (on the right)
Source: compiled by the authors.

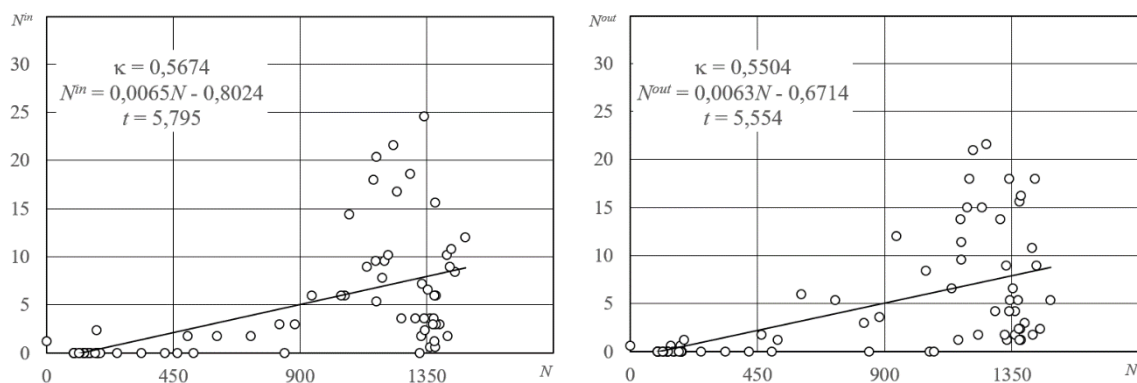


Рисунок 7 – Зависимости $N^{in}(N)$ и $N^{out}(N)$ между осредненными за рабочие дни интенсивностями транспортных потоков N на прилегающей дороге и интенсивностями въезда N^{in} (слева) автомобилей на парковочную территорию и выезда N^{out} с нее (маркеры «о», авт/ч, справа); линейные аппроксимации (—), коэффициенты корреляции и Стьюдента
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Dependencies $N^{in}(N)$ and $N^{out}(N)$ between the averaged over working days traffic flows intensities N on the adjacent road and the intensities of vehicles entering the parking area N^{in} (on the left) and leaving it N^{out} (markers "o", vehicles/hour, on the right); linear approximations (—), correlation coefficients and Student's t-test
Source: compiled by the authors.

5. Имитационное моделирование и верификация.

Модель генерирует потоки въезда (рисунок 8), распределения интервалов (рисунок 9) и

числа заездов (рисунок 10), близкие к натурным. Количественное сравнение детерминированных и вероятностных показателей представлено в таблице 2.

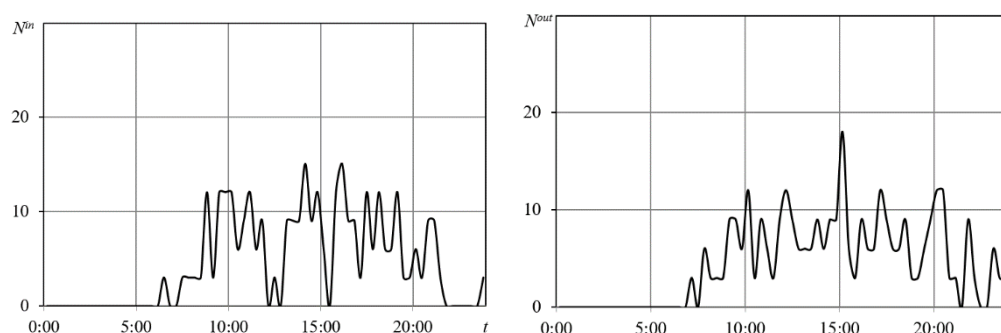


Рисунок 8 – Зависимости от времени t интенсивностей N^{in} (слева) въезда автомобилей на парковочную территорию и N^{out} (справа) выезда с неё, полученные при вычислительном моделировании; рабочий день октября 2024 г.
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Dependencies of entry N^{in} (on the left) and exit N^{out} (on the right) intensities of vehicles from the parking area on time t obtained from simulation modeling; weekday, October 2024
Source: compiled by the authors.

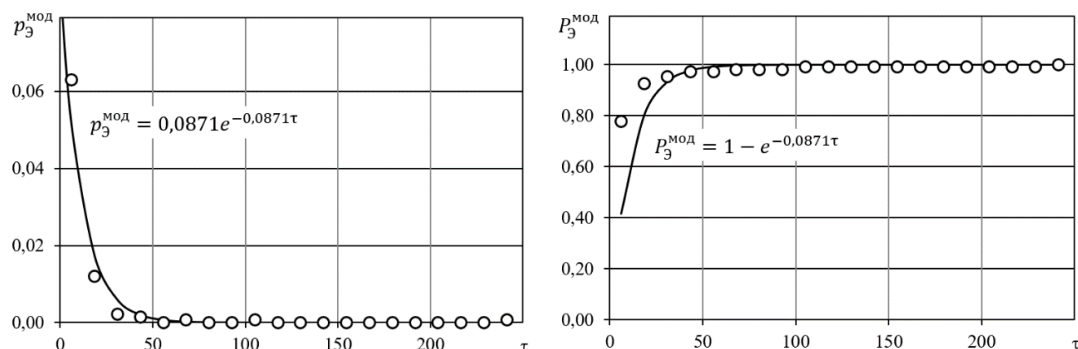


Рисунок 9 – Графики эмпирических (о) и теоретических (—, экспоненциальное) плотностей вероятностей $p_3^{\text{мод}}$ (слева) и функций распределения $P_3^{\text{мод}}$ (справа) интервалов времени τ между заездами автомобилей на парковочную территорию, полученные в результате моделирования в рабочий день
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Graphs of empirical (o) and theoretical (—, exponential) probability densities $p_3^{\text{мод}}$ (on the left) and distribution functions $P_3^{\text{мод}}$ (on the right) of time intervals between vehicle entries into the parking area, obtained as a result of modeling on a weekday
Source: compiled by the authors.

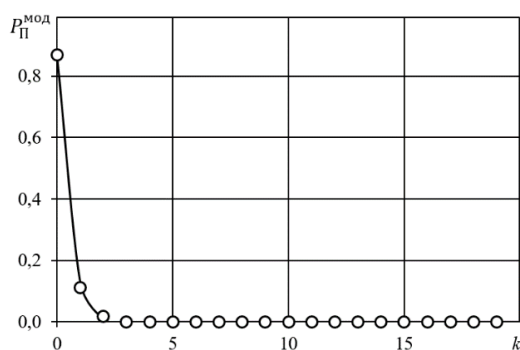


Рисунок 10 – Распределения расчетной (о), полученной при вычислительном моделировании, и теоретической $P_{\Pi}^{\text{мод}}$ (—, пуассоновской) вероятностей въезда k автомобилей на парковку в течение 2 мин
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Distributions of the calculated (o), obtained through computational modeling, and theoretical $P_{\Pi}^{\text{мод}}$ (—, Poisson) probabilities of k vehicles entering the parking lot within 2 minutes
Source: compiled by the authors.

Таблица 2

Сравнение детерминированных характеристик, определённых по результатам натурного наблюдения и вычислительного эксперимента: среднесуточные интенсивности λ заезда, средние значения $\langle N^{\text{in}} \rangle$, $\langle N^{\text{out}} \rangle$; чебышёвские нормы разностей вероятностных кривых
Источник: составлено авторами.

Table 2

Comparison of determined characteristics defined by the results of field observation and a computational experiment: average daily intensities of entries, average values $\langle N^{\text{in}} \rangle$, $\langle N^{\text{out}} \rangle$; Chebyshev norms of differences in probability curves
Source: compiled by the authors.

Показатель	Рабочий день		Нерабочий день	
	Наблюдение	Моделирование	Наблюдение	Моделирование
$\langle N^{\text{in}} \rangle$, мин ⁻¹	4,0274	4,3973	2,0548	1,1918
$\langle N^{\text{out}} \rangle$, мин ⁻¹	4,0685	4,3973	2,0548	1,1918
λ , мин ⁻¹	0,0689	0,0871	0,0354	0,0296
$\ p_3 - p_3^{\text{мод}}\ $	0,0182		0,0058	
$\ P_3 - P_3^{\text{мод}}\ $	0,0798		0,0657	
$\ P_{\Pi} - P_{\Pi}^{\text{мод}}\ $	0,0891		0,0276	

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ движения автомобилей на парковочной территории в центре города позволил оценить степень её загруженности, а также определить показатели частоты заездов и выездов. Результаты показали, что при кратких интервалах времени между заездами возможно моделировать их как пуассоновский процесс. Однако гипотеза о соответствии интервалов времени между заездами экспоненциальному распределению не прошла проверку по критерию Колмогорова.

Использование корреляционного анализа подтвердило наличие функциональной зависимости между интенсивностью автомобильного потока на прилегающей улично-дорожной сети и значениями заездов и выездов на парковочную территорию. На базе этих выводов была сформирована имитационная модель работы парковочной системы, учитывающая взаимосвязь между потоками транспорта на дороге и поведением пользователей транспортных средств на парковке.

Обнаружено, что показатели эффективности функционирования парковочной территории подвержены колебаниям, которые связаны как со временем суток, так и с конкретными днями недели. Эти особенности необходимо учитывать при проектировании, организации и развитии городской парковочной инфраструктуры. Полученные данные рекомендуется использовать при создании имитационных и статистических моделей парковочных территорий, сопоставимых с рассматриваемой, однако методика может быть масштабирована для анализа любых объектов парковочной инфраструктуры в целях более рационального использования городских ресурсов и улучшения транспортной системы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kushchenko L., Kushchenko S., Novikov I., Novikov A. The paid parking space organization as one of the ways to increase the capacity of the road in Belgorod urban agglomeration // *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 63. P. 868-877. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.084>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146522003398> (дата обращения: 10.02.2026).
2. Гущина М.В. Управление современными механизмами организации парковочного пространства в мировой практике // *Научный журнал молодых ученых*. 2018. № 2 (11). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-sovremennymi-mehanizmami-organizatsii-parkovochного-prostranstva-v-mirovoy-praktike> (дата обращения: 10.02.2026).
3. Parmar J., Das P., Dave S. M. Study on demand and characteristics of parking system in urban areas: A review // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2020. Vol. 7, Issue 1.

P. 111-124. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.09.003>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756418305786> (дата обращения: 10.02.2026).

4. Соловьев К.В., Кузьмина Д.В. Сравнительный анализ способов организации парковочного пространства в мегаполисах // *Молодой ученый*. 2016. № 29 (133). С. 155–158. URL: <https://moluch.ru/archive/133/37148>. (дата обращения: 12.03.2026).

5. Shehadeh E.A. Trip Rates and Parking Requirements for Restaurants and Coffee Shops in Amman-Jordan // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019. Vol. 9, N 2. P. 2898–2901. <https://doi.org/10.35940/ijtee.B7484.129219>

6. Еремин И.Р., Никитин П.В. Анализ данных сервиса платной парковки для создания эффективной системы ценообразования (на примере Владивостока) // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024. Т. 12, № 2(45). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.45.2.015>. EDN HZVFHS.

7. Наumenko Е.Ю. Определение вариантов емкости и занятости парковок // *Инженерный вестник Дона*. 2011. № 2. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2011/413> (дата обращения: 04.05.2025).

8. Бояршинов М.Г., Вавилин А.С., Шумков А.Г. Использование комплекса фотовидеофиксации нарушений правил дорожного движения для выделения детерминированной и стохастической составляющих интенсивности транспортного потока // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. 2021. № 3. С. 61–71. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2021-3-6>

9. Бояршинов М.Г., Щукин Ю.А. Особенности функционирования придорожного парковочного пространства // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. 2024. № 6. С. 89–108. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-6-89>

10. Farley A., Ham H., Hendra. Real Time IP Camera Parking Occupancy Detection using Deep Learning // *Procedia Computer Science*. 2021. Vol. 179. P. 606-614. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.046> URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050921000533> (дата обращения: 10.02.2026).

11. Shoup D. Pricing curb parking // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2021. Vol. 154. P. 399-412. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.04.012>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856421001105> (дата обращения: 10.02.2026).

12. Ding X., Yang R. Vehicle and Parking Space Detection Based on Improved YOLO Network Model // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1325. P. 012084. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1325/1/012084>. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1325/1/012084> (дата обращения: 10.02.2026).

13. Nguyen D.-L., Vo X.-T., Priadana A., Jo K.-H. YOLO5PKLot: A Parking Lot Detection Network Based on Improved YOLOv5 for Smart Parking Management System // *Communications in Computer and Information Science*. 2023. Vol. 1857. P. 95-106. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4914-4_8. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-99-4914-4_8 (дата обращения: 10.02.2026).

14. Щукин Ю.А., Бояршинов М.Г., Артеменко Д.В. Закономерности использования парковоч-

ного пространства // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2023. № 3–4 (106–107). С. 44–50. EDN: SLAKFT

15. Бояршинов М.Г., Щукин Ю.А. Анализ продолжительности размещения транспортных средств на территории парковки вблизи торгового центра // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2024. № 3-3(90). С. 260–264.

16. Антипова А.Н., Куманева А.В., Аксенов Д.В. Информационная модель формирования парковочного пространства в крупном городе // Транспорт и машиностроение Западной Сибири. 2019. № 2. С. 48–55.

17. Gao L., Fan W., Hu Z., Jian W. Prediction of Vacant Parking Spaces in Multiple Parking Lots: A DWT-ConvGRU-BRC Model // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, no. 6. P. 3791. <https://doi.org/10.3390/app13063791>. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/6/3791> (дата обращения: 10.02.2026).

18. Зедгенизов А.В., Зедгенизова А.Н. Особенности сбора исходных данных при оценке числа припаркованных автомобилей возле жилых объектов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 10(57). С. 105–108.

19. Kotb A., Shen Y., Zhu X., Huang Y. IParker—A New Smart Car-Parking System Based on Dynamic Resource Allocation and Pricing // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2016. Vol. 17, no. 9. P. 2637–2647. <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2531636>. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7457323> (дата обращения: 10.02.2026).

20. Chauhan V., McCarthy O., Blanco J., Hörcher D., Singh M., Teter J., Yari E., Yuen J. ITF Transport Outlook 2023. Paris: OECD Publishing, 2023. 130 p. <https://doi.org/10.1787/b6cc9ad5-en>. URL: <https://doi.org/10.1787/b6cc9ad5-en> (дата обращения: 10.02.2026).

21. Li Y., Leong W.Y., Zhang H. YOLOv10-Based Real-Time Pedestrian Detection for Autonomous Vehicles. Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Image Processing and Applications (ICSIPA). 2024:1–6. URL: <https://doi.org/10.1109/ICSIPA62061.2024.10686546> (дата обращения: 10.02.2026).

22. Manikandan B.V., Nathan T.R., Naresh R., Prasad P. Traffic Flow Prediction For Intelligent Transportation System Using Machine Learning // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 387. P. 05002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338705002>. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/36/e3sconf_ics2023_05002/e3sconf_ics2023_05002.html (дата обращения: 12.03.2026).

REFERENCES

1. Kushchenko L., Kushchenko S., Novikov I., Novikov A. The paid parking space organization as one of the ways to increase the capacity of the road in Belgorod urban agglomeration. *Transportation Research Procedia*. 2022; Vol. 63. P. 868–877. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.084> URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146522003398> (date of access: 10.02.2026).

2. Gushchina M.V. Management of modern mechanisms of organizing parking space in world practice. *Scientific journal of young scientists*. 2018;

No. 2 (11). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-sovremennymi-mehanizmami-organizatsii-parkovochного-prostranstva-v-mirovoy-praktike> (access date: 10.02.2026). (in Russ.)

3. Parmar J., Das P., Dave S. M. Study on demand and characteristics of parking system in urban areas: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering* (English Edition). 2020; Vol. 7, Issue 1. P. 111–124. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.09.003>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756418305786> (date accessed: 10.02.2026).

4. Soloviev K.V., Kuzmina D.V. Comparative analysis of methods for organizing parking space in megacities. Text: direct. *Young scientist*. 2016; No. 29 (133). P. 155–158. URL: <https://moluch.ru/archive/133/37148>. (access date: 12.03.2026). (in Russ.)

5. Shehadeh E.A. Trip Rates and Parking Requirements for Restaurants and Coffee Shops in Amman-Jordan. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019. Vol. 9, N 2. P. 2898–2901. <https://doi.org/10.35940/ijitee.B7484.129219>

6. Eremin I.R., Nikitin P.V. Analysis of paid parking service data to create an effective pricing system (using Vladivostok as an example). *Modeling, optimization and information technology*. 2024; Vol. 12, No. 2 (45). (in Russ.) <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.45.2.015>. EDN HZVFHS.

7. Naumenko E.Yu. Determination of parking capacity and occupancy options. *Engineering Bulletin of the Don*. 2011; No. 2. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2011/413> (date of access: 04.05.2025). (in Russ.)

8. Boyarshinov M.G., Vavilin A.S., Shumkov A.G. Using a complex of photo and video recording of traffic violations to identify the deterministic and stochastic components of traffic flow intensity. *Intelligence. Innovations. Investments*. 2021. No. 3. pp. 61–71. (in Russ.) <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2021-3-6>

9. Boyarshinov M.G., Shchukin Yu.A. Features of the functioning of roadside parking space. *Intelligence. Innovations. Investments*. 2024; No. 6. pp. 89–108. (in Russ.) <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-6-89>

10. Farley A., Ham H., Hendra. Real Time IP Camera Parking Occupancy Detection using Deep Learning. *Procedia Computer Science*. 2021; Vol. 179. P. 606–614. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.046>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050921000533> (access date: 10.02.2026).

11. Shoup D. Pricing curb parking. Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2021; Vol. 154. P. 399–412. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.04.012> URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856421001105> (access date: 10.02.2026).

12. Ding X., Yang R. Vehicle and Parking Space Detection Based on Improved YOLO Network Model. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; Vol. 1325. P. 012084. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1325/1/012084>. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1325/1/012084> (access date: 10.02.2026).

13. Nguyen D.-L., Vo X.-T., Priadana A., Jo K.-H. YOLO5PKLot: A Parking Lot Detection Network Based on Improved YOLOv5 for Smart Parking Management System. *Communications in Computer and In-*

formation Science. 2023; Vol. 1857. P. 95-106. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4914-4_8. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-99-4914-4_8 (accessed: 10.02.2026).

14. Shchukin Yu. A., Boyarshinov M. G., Artemenko D. V. Patterns of Parking Space Use. *Transport of the Russian Federation. Journal of Science, Practice, and Economics*. 2023; No. 3-4 (106-107). P. 44-50. EDN: SLAKFT. (in Russ.)

15. Boyarshinov M.G., Shchukin Yu.A. Analysis of the Duration of Vehicle Accommodation in a Parking Lot Near a Shopping Center. *Modernization and Scientific Research in the Transport Complex*. 2024; No. 3-3 (90). P. 260-264. (in Russ.)

16. Antipova A.N., Kumaneva A.V., Aksenov D.V. Information model for the formation of parking space in a large city. *Transport and Mechanical Engineering of Western Siberia*. 2019. No. 2. pp. 48–55. (in Russ.)

17. Gao L., Fan W., Hu Z., Jian W. Prediction of Vacant Parking Spaces in Multiple Parking Lots: A DWT-ConvGRU-BRC Model. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, no. 6. P. 3791. <https://doi.org/10.3390/app13063791>. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/6/3791> (accessed: 10.02.2026).

18. Zedgenizov A.V., Zedgenizova A.N. Features of collecting initial data when assessing the number of parked cars near residential properties. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 2011; No. 10 (57). (in Russ.)

19. Kotb A., Shen Y., Zhu X., Huang Y. IParker—A New Smart Car-Parking System Based on Dynamic Resource Allocation and Pricing. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2016; Vol. 17, no. 9. P. 2637-2647. <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2531636>. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7457323> (access date: 10.02.2026).

20. Chauhan V., McCarthy O., Blanco J., Hörcher D., Singh M., Teter J., Yari E., Yuen J. ITF Transport Outlook 2023. Paris: OECD Publishing, 2023. 130 p. <https://doi.org/10.1787/b6cc9ad5-en>. URL: <https://doi.org/10.1787/b6cc9ad5-en> (access date: 10.02.2026).

21. Li Y., Leong W.Y., Zhang H. YOLOv10-Based Real-Time Pedestrian Detection for Autonomous Vehicles. *Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Image Processing and Applications (ICSIPA)*. 2024:1-6. <https://doi.org/10.1109/ICSIPA62061.2024.10686546> (access date: 10.02.2026).

22. Manikandan B.V., Nathan T.R., Naresh R., Prasad P. Traffic Flow Prediction For Intelligent Transportation System Using Machine Learning. *E3S Web of Conferences*. 2023; Vol. 387. P. 05002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338705002>. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/36/e3sconf_icst2023_05002/e3sconf_icst2023_05002.html. (access date: 12.03.2026).

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Бояршинов М.Г. Научное руководство, разработка концепции исследования, постановка задачи, обработка и интерпретация результатов, написание текста.

Шукин Ю.А. Организация и проведение натурного эксперимента, сбор первичных данных, подготовка графического материала.

Сидоров Е.Д. Разработка имитационной модели, выполнение вычислительных экспериментов, статистическая обработка.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Boyarshinov M.G. Scientific supervision, research concept development, problem statement, data processing and interpretation, text writing.

Shchukin Yu. A. Field experiment organizing and conducting, primary data collection, preparation of visual materials.

Sidorov E.D. Simulation model development, execution of computational experiments, statistical processing.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бояршинов Михаил Геннадьевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Автомобили и технологические машины» Пермского национального исследовательского университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4473-6776>,

Researcher ID: ACE-0166-2022,

SPIN-код: 5958-2345,

e-mail: mgboyarshinov@pstu.ru

Шукин Юрий Александрович – аспирант кафедры «Автомобили и технологические машины» Пермского национального исследовательского университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9861-7134>,

SPIN-код: 3239-3212,

e-mail: cshukin-yura@mail.ru

Сидоров Евгений Дмитриевич – магистр кафедры «Автомобили и технологические машины» Пермского национального исследовательского университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29).

e-mail: evgehasmit@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boyarshinov Mikhail Gennadievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automobiles and Technological Machines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolskiy Prospekt, Perm, 614990).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4473-6776>,

Researcher ID: ACE-0166-2022,

SPIN-code: 5958-2345,

e-mail: mgboyarshinov@pstu.ru

Shchukin Yuriy Aleksandrovich – Postgraduate Student, Department of Automobiles and Technological Machines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolskiy Prospekt, Perm, 614990).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9861-7134>,

SPIN-code: 3239-3212,

e-mail: cshukin-yura@mail.ru

Sidorov Evgeniy Dmitrievich – Master of Science, Department of Automobiles and Technological Machines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolskiy Prospekt, Perm, 614990).

e-mail: evgehasmit@yandex.ru

Научная статья
УДК: 629.373.3
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-458-473>
EDN: SXUNOC



МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ ТРЕХОСНОГО МОТОВЕЗДЕХОДА С МОНТИРУЕМОЙ ЗАДНЕЙ ОСЬЮ, ОСНАЩЕННОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

М.М. Журкин

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
г. Москва, Россия
mimizhur@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Значительно увеличить грузоподъемность двухосного мотовездехода с сохранением его подвижности и без внесения значительных изменений в серийную конструкцию позволяет предложенный Г.О. Котиевым в патенте RU218304U1 монтируемый модуль третьей оси, оснащенный электроприводом. Применение комбинированных трансмиссий в транспортных средствах дает возможность использовать энергию более эффективным способом, но их задействование в составе средств малой механизации, таких как мотовездеход, недостаточно исследовано, так как не учитывают конструктивные особенности и условия движения средств малой механизации, в том числе новой конструкции. В данной работе производится исследование подходов к управлению гибридной силовой установкой мотовездехода с электроприводом третьей оси.

Материалы и методы. В данной работе проводится исследование методом имитационного моделирования с целью определения наиболее эффективного подхода к управлению приводом при движении по твердым опорным основаниям с различными характеристиками неровностей.

Для суммирования, анализа затрат энергии и сопоставления эффективности тепловой и электрической машины был предложен новый критерий, связывающий плотность энергии в батарее и массовый расход бензина. В итоге позволяет через массу израсходованного топлива и условной массы израсходованной батареи производить оценку. Такой критерий актуален для мотовездеходов ввиду ограниченной грузоподъемности.

Для снижения потерь на буксование был предложен алгоритм, основанный на методе косвенной оценки вертикальной реакции. Данный метод дает возможность производить оценку вертикальной реакции и корректировать подводимый к колесам крутящий момент без применения в конструкции датчиков сил.

Результаты. Проведен анализ научной литературы в области рационального управления гибридными силовыми установками и индивидуальным приводом.

Создана математическая модель движения мотовездехода по неровностям, которая учитывает массовый расход топлива и разряд батареи.

Предложены алгоритмы формирования уставок и повышения эффективности, в том числе с использованием нового критерия оценки.

Обсуждение и заключение. Проведенное исследование установило границы характеристик неровностей опорного основания при использовании двух подходов к применению уставок и показало эффективность разработанных алгоритмов повышения эффективности, что позволяет создать комплексный закон управления мотовездеходом с гибридной силовой установкой.

Практическое значение. Практическая значимость заключается в результатах программной реализации предложенных подходов к эффективному управлению гибридной силовой установкой мотовездехода новой конструкции в условиях движения по дорогам с неровностями различного типа для предприятий транспортного машиностроения.

Оригинальность. Рассматриваемое транспортное средство представляет собой пересечение нескольких направлений исследований. Первое направление включает в себя исследования движения автомобилей с параллельной гибридной схемой трансмиссии в городских условиях, где не учитываются неровности дороги. Второе направление посвящено движению транспортных средств с индивидуальным

© Журкин М.М., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

приводом вне дорог. Полученные результаты позволяют обратить данный дуализм в закон эффективного с точки зрения средства малой механизации управления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гибридный мотовездеход, электропривод третьей оси, модульная ось, гибридный привод, энергоэффективность

БЛАГОДАРНОСТИ: автор выражает благодарность научному руководителю М.М. Жилейкину за наставления в работе, а также руководству и сотрудникам кафедр СМ-10, СМ-9 и ЛТ-7 МГТУ им. Н.Э. Баумана за материальную поддержку в создании прототипа мотовездехода с гибридной силовой установкой.

Статья поступила в редакцию 16.02.2026; одобрена после рецензирования 09.04.2026; принята к публикации 15.06.2026.

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: Журкин М.М. Метод повышения энергоэффективности управления гибридным тяговым приводом трехосного мотовездехода с монтируемой задней осью, оснащенной электроприводом // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 3. С. 458–473. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-458-473>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-458-473>

EDN: SXUNOC

IMPROVING ENERGY EFFICIENCY OF HYBRID TRACTION DRIVE CONTROL FOR THREE-AXLE ALL-TERRAIN VEHICLES WITH MOUNTABLE ELECTRIC REAR AXLE DRIVE

Mikhail M. Zhurkin

Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, Russia
mimizhur@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. The mountable third-axle module equipped with an electric drive, proposed by G.O. Kotiev in RU218304U1 patent, allows for a significant increase in the load capacity of a two-axle all-terrain vehicle (ATV) while preserving its mobility and requiring no major changes to the standard design. While the integration of hybrid transmissions in vehicles has enabled more efficient energy consumption, their use in vehicles for small-scale mechanization, such as all-terrain vehicles, has not been sufficiently investigated. Current approaches do not take into account the design features and operating conditions of vehicles for small-scale mechanization. This paper examines methods to control a hybrid powertrain of an ATV with electric third-axle drive.

Materials and methods. This paper uses simulation modeling to determine the most efficient approach to drive control when driving on hard surfaces with varying unevenness characteristics. To summarize, analyze energy costs, and compare the efficiency of a thermal and electric engine, a new criterion was proposed. This criterion links the energy density of the battery and the mass fuel consumption. As a result, it allows for an evaluation based on the mass of fuel consumed and the conventional mass of the battery discharged. This criterion is relevant for ATVs due to their limited load capacity. To reduce wheel slippage losses, an algorithm based on an indirect method for estimating vertical reaction was proposed. This method allows for estimating vertical reaction and adjusting the torque applied to the wheels without the use of force sensors.

Results. An analysis of scientific literature on the rational management of hybrid powertrains and individual drives was conducted. A mathematical model of ATV movement over uneven surfaces was created, taking into account fuel consumption and battery discharge. Algorithms for setting parameters and improving efficiency were proposed, including the use of a new evaluation criterion.

Discussions and Conclusion. The study established the limits of the supporting base roughness characteristics for two approaches to settings application and demonstrated the effectiveness of the developed algorithms for

© Zhurkin Mikhail M., 2026



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

improving efficiency, which makes it possible to develop a comprehensive control mechanism for ATVs with hybrid power plant.

Practical significance. The practical value of this research stems from the implementation of the proposed efficient control strategies for a newly designed hybrid ATV driving on roads with various roughness types for transport manufacturing enterprises.

Originality. The study of the vehicle under consideration lies at the intersection of several research fields. The first area involves studying the movement of vehicles with parallel hybrid transmission in urban conditions, where road irregularities are not taken into account. The second field focuses on the off-road movement of self-propelled vehicles. The results obtained make it possible to transform this duality into efficient control mechanism to design vehicles for small-scale mechanization.

KEYWORDS: hybrid ATV, third-axle electric drive, module axle, hybrid drive, efficient energy use

ACKNOWLEDGEMENT: the author expresses gratitude to the research supervisor Dr. M.M. Zhileikin for his guidance on the work, as well as to the management and staff of SM-10, SM-9, and LT-7 departments of Bauman Moscow State Technical University for financial support in developing the ATV prototype with a hybrid power train.

The article was submitted: February 16, 2026; approved after reviewing: April 09, 2026; accepted for publication: June 15, 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: Zhurkin M.M. Improving energy efficiency of hybrid traction drive control for three-axle all-terrain vehicles with mountable electric rear axle drive. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (3): 458-473. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-458-473>

ВВЕДЕНИЕ

В данной статье речь идет об исследовании подходов к управлению трехосным мотовездеходом с гибридной силовой установкой (ГСУ), у которого привод первых двух осей осуществляется от ДВС, а привод третьей оси от электродвигателя¹.

В качестве объекта исследования (рисунок 1) выступает прототип мотовездехода [1].

Предложенная конструкция учитывает особенности утилитарного мотовездехода. Силовая установка такого транспортного средства представляет собой единый блок с ДВС, клиноременным вариатором и раздаточной коробкой. Установленный интегрирован-

ный генератор мотоциклетного типа способен вырабатывать ток мощностью 100 Вт, этого недостаточно для подзарядки тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ) электропривода. Ввиду данной особенности конструкции основным способом зарядки ТАБ электропривода следует принять внешнюю электросеть, а не генератор.

Для обеспечения колесной формулы 6х6 возможно использовать проходной редуктор среднего моста. Такая конструкция отличается относительной простотой. Однако в ней отсутствует дифференциальная связь между осями, что негативно сказывается на поворотливости.

¹ Котиев Г.О., Захаров А.Ю., Голубчик Т.В.. Транспортное средство: патент на полезную модель № RU218304 U1, Российская Федерация; опубликовано 22.05.2023., <https://patents.google.com/patent/RU218304U1/ru>



а



б

Рисунок 1 – Фото прототипа трехосного мотовездехода с гибридной силовой установкой:
а – электропривод третьей оси; б – мотовездеход в движении
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Photo of a three-axle ATV prototype with a hybrid powertrain:
a — third-axis electric drive; b — ATV in motion
Source: compiled by the author.

В литературе встречается немало примеров применения гибридных силовых установок в полноприводных транспортных средствах с параллельной схемой трансмиссии, в том числе и в мотовездеходах [2, 3, 4, 5]. Однако в них применение ГСУ исследуется в городских условиях движения, например, по циклу New European Driving Cycle (NEDC). Также не учитывается движение по неровностям, потери на буксование и особенности конструкции средства малой механизации.

Но ввиду многообразия возможных условий движения в качестве первого подхода можно принять формирование уставок по эффективности силовой установки в текущих условиях движения.

При рассмотрении подходов [6, 7] к управлению индивидуальным приводом в условиях движения по неровностям² можно выделить несколько основных вариантов. Но реализуемым на рассматриваемом объекте исследований является управление по крутящему моменту.

Таким образом, второй вариант подразумевает, что отношение подводимого к двигателям крутящего момента поддерживается равным отношению вертикальных реакций. Данный подход потенциально должен привести к уменьшению значений буксования колес.

Перед проводимым исследованием ставится задача о выборе критерия оценки эффективности энергоустановок, определении границ использования двух подходов и методе определения вертикальных реакций без внесения значительных изменений в конструкцию.

Целью данного исследования является определение наиболее эффективного подхода к формированию уставок для управления ГСУ мотовездехода в условиях движения по неровностям, в том числе с учетом работы созданных противобуксовочных систем для формирования комплексного подхода к рациональному управлению установкой.

² Шелмоков С.А., Купреянов А.А. Способ управления многоприводной электрической трансмиссией многоосной колесной машины: патент RU2426660C2, Российская Федерация; опубликовано 20.08.2011. <https://patents.google.com/patent/RU2426660C2/ru>

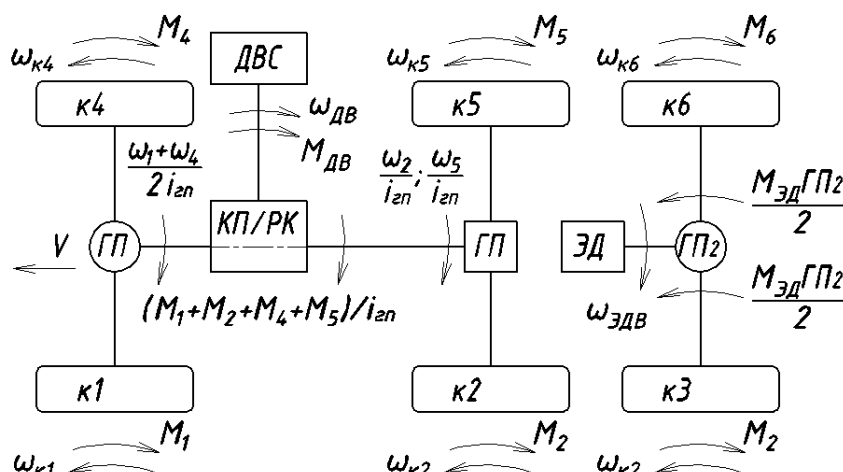


Рисунок 2 – Схема трансмиссии
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Transmission diagram
Source: compiled by the author.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Модель движения

Исходные данные были получены путем лабораторных исследований построенного прототипа и сторонних работ, посвященных мотовездеходам [1, 8].

Для проведения исследований применялась верифицированная пространственная модель движения по неровному твердому опорному основанию [9].

На рисунке 2 представлена схема трансмиссии, при которой дифференциал средней оси заблокирован. Привод на первую и вторую оси осуществляется от ДВС, привод третьей оси осуществляется от электродвигателя.

Оценка эффективности

Определим критерий, по которому и будет определяться эффективность. В некоторых работах [10,11] встречается использование альтернативных способов сопоставления расходов топлива и электроэнергии при возможности генерирования.

В контексте средства малой механизации снижение массы перевозимого топлива и ТАБ приводит к ощутимому росту грузоподъемности. Таким образом, автором статьи был предложен коэффициент K размерностью кг/(час Нм).

Для ДВС он выражается в отношении потребной массы топлива к подводимому на колеса крутящему моменту в течение единицы времени.

Для ЭД он выражается в отношении по-

требной электрической мощности к производству плотности энергии в ТАБ и подводимому на колеса крутящему моменту.

Для ДВС коэффициент K определяется как

$$K = B_{\text{ч}} / M_{\text{кДВС}}.$$

Для электропривода K определяется как

$$K = P / \omega M_{\text{кЭД}},$$

где $B_{\text{ч}}$ – расход массы топлива в час; M – крутящий момент на оси (суммарный на осях для ДВС); P – потребляемая электрическая мощность; ω – плотность энергии в единице массы батареи.

Таким образом, возможно сопоставить расход механической и электрической энергии через массу, в кг.

На рисунке 3 представлены полученные аналитическим методом графики изменения показателя эффективности для ДВС и ЭД при разных скоростях движения и величине запрашиваемой мощности. Аналитический метод дополнен экспериментальными данными по расходу топлива и КПД установок на разных режимах работы. В данном случае использована литиевая батарея, плотность энергии в которой 250 Вт ч/кг [12]. Из графиков видно, что применение ЭД наиболее эффективно на скоростях до 3,5 м/с, после чего эффективность ДВС резко возрастает по предложенному критерию.

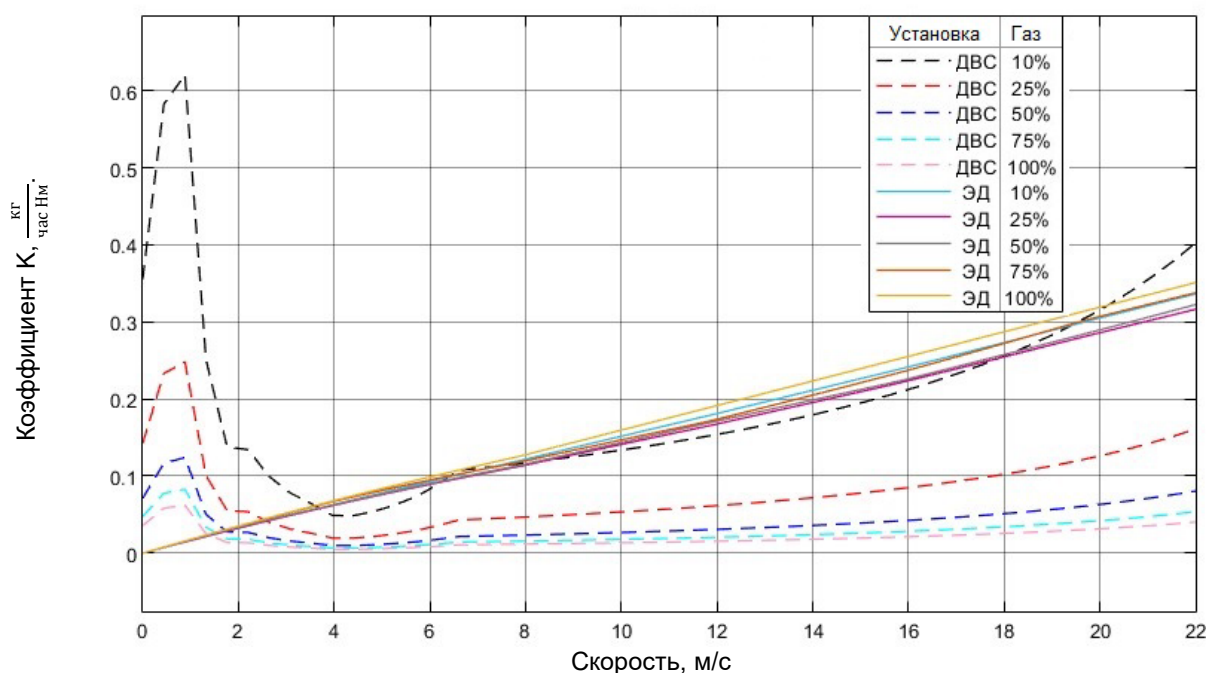


Рисунок 3 – Графики зависимости коэффициента эффективности для электропривода с литиевой батареей и ДВС
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Dependencies of efficiency coefficient for electric drive with Li-ion battery and internal combustion engine
Source: compiled by the author.

Уставка по эффективности

Установленные степени задействования той или иной силовой установки:

$$M_{ДВС} = M_{ДВС\max}(\omega_{ДВС})h_{ДВС\text{уст}}(V, h_{газ}),$$

$$M_{ЭД} = M_{ЭД\max}(\omega_{ЭД})h_{ЭД\text{уст}}(V, h_{газ}),$$

где $h_{ДВС\text{уст}}$ и $h_{ЭД\text{уст}}$ – установленные степени задействования крутящих моментов от ДВС и ЭД в зависимости от текущего положения рычага газа $h_{газ}$ и скорости движения V , $M_{ДВС\max}$ и $M_{ЭД\max}$ – крутящие моменты по внешней характеристике для ДВС и ЭД.

Сформируем уставки для ДВС и ЭД по условию минимизации суммарного коэффициента K .

Примем условие, что при формировании уставок, суммарный крутящий момент будет изменяться по заранее определенному правилу, в зависимости от скорости и степени нажатия на рычаг газа.

На рисунке 4 представлена схема работы алгоритма формирования уставок по данному подходу.

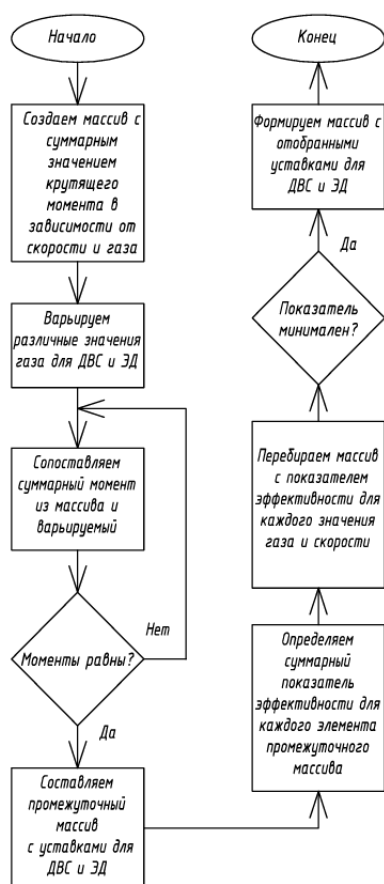


Рисунок 4 – Схема работы алгоритма для получения уставок
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Constraint settings scheme
Source: compiled by the author.

На рисунке 5 представлены значения полученных уставок для ДВС и ЭД мотовездехода с литиевой батареей.

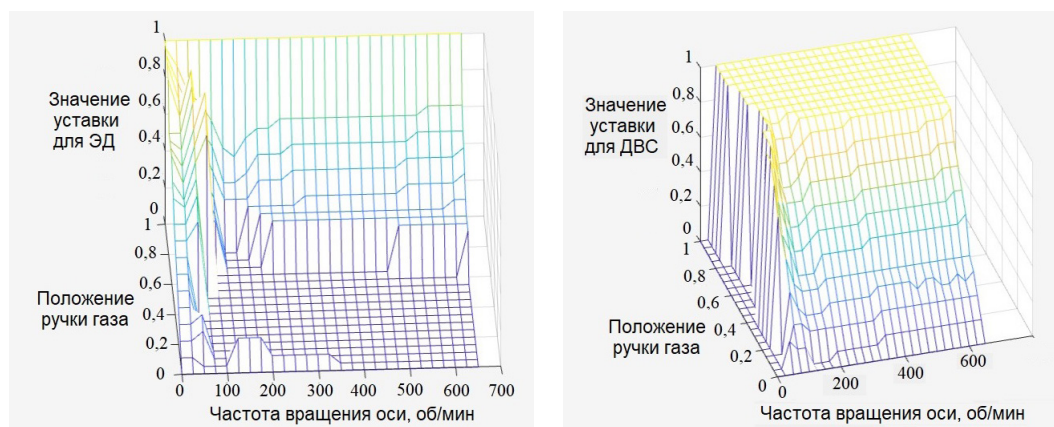


Рисунок 5 – Значения уставок
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Settings values
Source: compiled by the author.

Уставка по отношению вертикальных реакций

Для формирования уставок по отношению вертикальных реакций в статике примем условие, что ось с электроприводом будет вспомогательной к осям с приводом от ДВС. Соответственно, электропривод будет подстраиваться под характеристики ДВС.

Уставку для ДВС примем линейной, прямо

зависящей от положения рычага газа.

Из контрольного взвешивания мотовездехода в экспериментальной части данной работы было получено соотношение веса на первых двух осях к третьей, которое равняется 1,8.

На рисунке 6 представлена схема работы алгоритма формирования уставок по данному подходу.

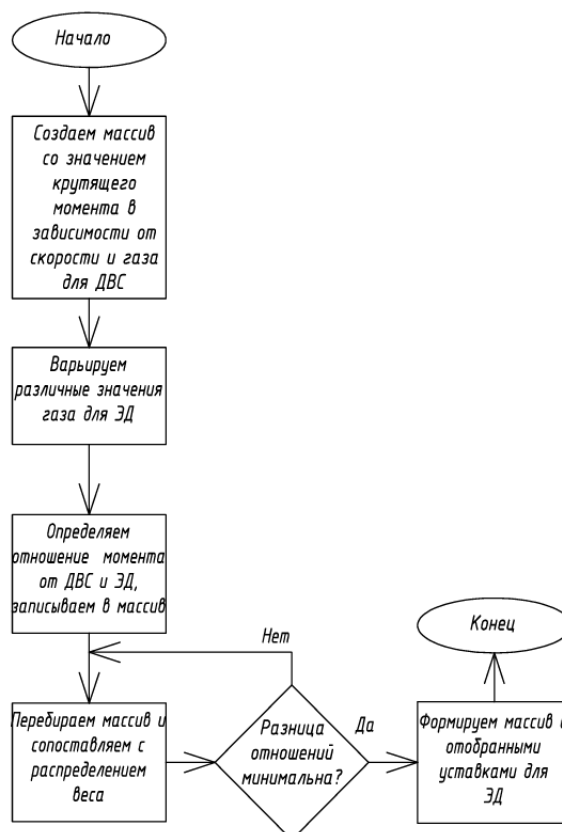


Рисунок 6 – Схема работы алгоритма для получения уставок
Источник: составлено автором.

Figure 6 – Constraint settings scheme
Source: compiled by the author.

На рисунке 7 представлены полученные значения уставок.

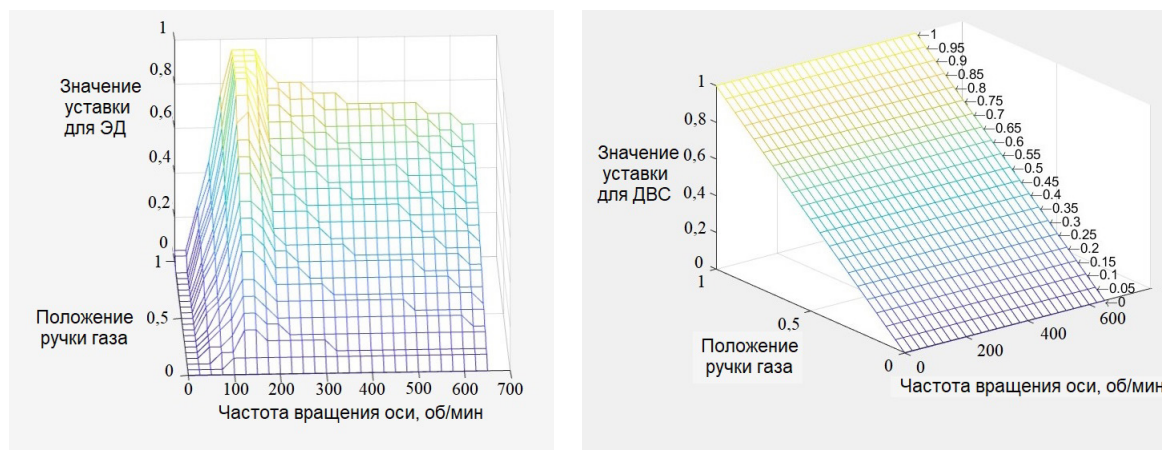


Рисунок 7 – Значения уставок
Источник: составлено автором.

Figure 7 – Settings values
Source: compiled by the author.

Коррекция крутящего момента на основании косвенной оценки вертикальной реакции

С учетом особенностей трансмиссии (см. рисунок 2) нет необходимости определять вертикальную реакцию у всех движителей. Наиболее актуальным этот вопрос становится для третьей оси с электроприводом, что было решено путем использования метода косвенной оценки [13].

Ограничение крутящего момента может быть определено как

$$M_{кр} \leq \left(r_{св} - \frac{R_z}{c_{ш}}\right) R_{zq3} (f + \mu_{x \max}) \text{ Нм},$$

где R_z – вертикальная динамическая нагрузка на колесе третьей оси, Н; $M_{кр}$ – определяемый уставкой крутящий момент на колесе третьей оси, Нм; $r_{св}$ – свободный радиус колеса, м; $c_{ш}$ – коэффициент жесткости шины, Н/м; $\mu_{x \max}$ – коэффициент трения полного скольжения; f – коэффициент сопротивления качению.

Для ограничения крутящего момента необходимо оценить величину коэффициента сцепления при полном скольжении. Данный параметр меняется в процессе движения, что требует периодической оценки.

Исследование данного коэффициента, как правило, производится в тормозном режиме [14]. В ведущем режиме возможно определить реализованный коэффициент сцепления, зная величину подведенного крутящего момента и вертикальной реакции.

Продольную силу колеса P_x на третьей оси мотовездехода возможно определить по формуле

$$P_x = \frac{M_{эд} i_{ГПЗ}}{2 \left(r_{св} - \frac{R_z}{c_{ш}}\right)} - \frac{\dot{\omega} J_k}{\left(r_{св} - \frac{R_z}{c_{ш}}\right)} - R_z f,$$

где $M_{эд}$ – крутящий момент электродвигателя, Нм; $i_{ГПЗ}$ – передаточное число редуктора; R_z – оценка вертикальной реакции на колесе, Н; $r_{св}$ – свободный радиус колеса, м; $c_{ш}$ – жесткость шины, Н/м.

По полученным данным становится возможным сделать выводы и о максимальном значении коэффициента сцепления, но при резком изменении сцепных свойств становится необходимой следующая система.

Противобуксовочная система

Для предотвращения буксования колес приводной момент может дополнительно уменьшаться путем формирования воздействия на базе измеренного значения буксования. Алгоритм распознает факт буксования колес третьей оси и ограничивает крутящий момент. Обратный алгоритм описан в [15].

Ведущий момент на колесе третьей оси $M_{к3}$ с учетом работы системы может быть определен так:

$$M_{к3} = M_{кр} h_S,$$

где $h_S = [0...1]$ – степень снижения действующего момента на третьей оси за счет работы алгоритма системы; $M_{кр}$ – подводимый крутящий момент с коррекцией по косвенной оценке вертикальной реакции, Нм.

Вектор скорости $\vec{V}_3$ центра третьей оси определяется как сумма скорости $\vec{V}_C$ центра масс и относительной скорости $\omega_z l_3$ центра третьей оси вокруг полюса..

$$\begin{aligned} \vec{V}_3 &= \vec{V}_C + \omega_z l_3, \\ \left| \vec{V}_{30} \right| &\approx \frac{\omega_{3лев} + \omega_{3прав}}{2} r_{cm}, \end{aligned}$$

где $\omega_{3лев}, \omega_{3прав}$ – угловые скорости вращения левого и правого колес третьей оси;

$\vec{V}_{30}$ – вектор скорости $\vec{V}_3$ центра третьей оси; l_3 – расстояние от центра масс мотовездехода до центра колеса третьей оси, м.

Определим скорости движения центров колес третьей оси:

$$\begin{aligned} V_{X3лев} &= V_{CX} + \omega_z \sqrt{l_3^2 + \frac{B^2}{4} \arctg \frac{B}{2l_3}}, \\ V_{X3прав} &= V_{CX} - \omega_z \sqrt{l_3^2 + \frac{B^2}{4} \arctg \frac{B}{2l_3}}, \end{aligned}$$

где B – ширина колеи, м; V_{CX} – скорость центра масс.

Далее определяется скольжение забегающего колеса $S_{3заб}$ по известной формуле [9]

$$S_{3заб} = \frac{V_{X3ом} - \omega_{3ом} r_{cm}}{V_{X3ом}}.$$

Для поддержания величины скольжения в оптимальном диапазоне 0,1...0,3 может быть предложен следующий алгоритм работы противобуксовочной системы. При превышении оптимального значения величины буксования задействуется ПИД-регулятор:

$$\begin{aligned} \text{если } S_{3заб} &\geq 0,3 \text{ то } h_S(PID), \\ \text{если } S_{3заб} &< 0,3 \text{ то } h_S = 1. \end{aligned}$$

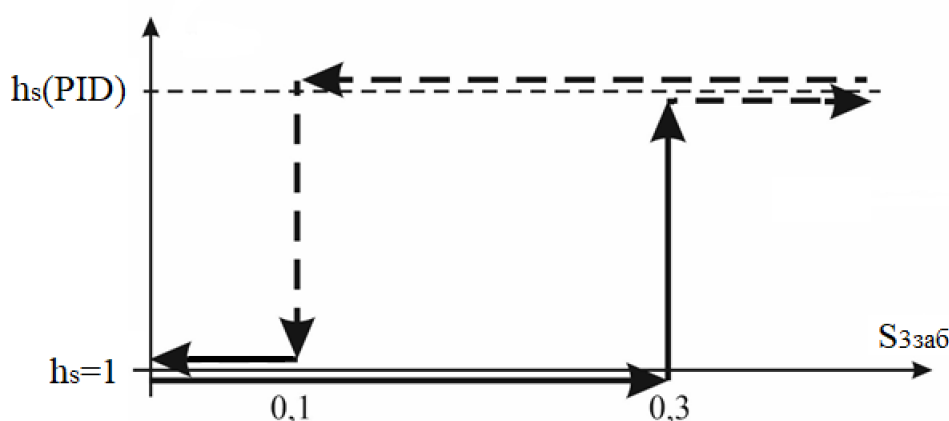


Рисунок 8 – Вид релейной функции
Источник: составлено автором.

Figure 8 – Relay function
Source: compiled by the author.

Для снижения вероятности возникновения автоколебательного процесса в контуре управления введем релейную функцию (рисунок 8).

Модель тяговой батареи

Для моделирования работы литиевой батареи была использована модель в среде Matlab Simulink. Блок «Аккумулятор» реализует универсальную динамическую модель, представляющую наиболее распространенные типы аккумуляторов.

Параметры схемы можно изменять для отображения конкретного типа аккумулятора и его разрядных характеристик. Типичная разрядная кривая состоит из трёх участков. Выбранные токи соответствуют величинам, равным 1С=104А, 2С=208А и 3С=312А, что характерно для применяемых ячеек.

Для литий-ионных аккумуляторов модель использует следующие уравнения [16, 17]:

$$\begin{aligned} f_1(it, i^*, i) &= E_0 - K \frac{Q}{Q - it} i^* - \\ &- K \frac{Q}{Q - it} it + A e^{-Bit}, \\ f_2(it, i^*, i) &= E_0 - K \frac{Q}{it + 0,1Q} i^* - \\ &- K \frac{Q}{Q - it} it + A e^{-Bit}, \end{aligned}$$

где f_1 применяется при разрядке, f_2 при зарядке батареи, E_0 – постоянное напряжение, в В; K – сопротивление поляризации, Ом;

Q – полная емкость аккумулятора, Ач; i – ток батареи, А; i^* – динамика тока, А; B – экспоненциальная емкость, Ач⁻¹; it – извлеченная емкость батареи, Ач.

Режимы движения

Определим возможные типы дорог и их характеристики.

Неровности дорожной поверхности можно описать величиной дисперсии неровностей и коэффициентов, характеризующих степень нерегулярности профиля [18].

Неровности могут быть образованы как дефектами дорожного полотна, так и препятствиями в виде крупных камней, пней или упавших деревьев.

В литературе встречаются усредненные значения диаметров поваленных ветром стволов деревьев. Данные величины варьируются в диапазоне от 110 до 550 мм [19, 20].

Для описания профиля дороги, одинакового под движителем левого и правого борта машины, достаточно знать корреляционную функцию высот неровностей. Наиболее распространенный тип аппроксимации корреляционных функций профиля дорожной поверхности $R(l)$ имеет вид:

$$R(l) = D_q e^{-\alpha_l |l|} \cos(\beta_l l),$$

где D_q – дисперсия неровностей дорожной поверхности; l – длина пути; α_l , β_l – коэффициенты, характеризующие степень нерегулярности профиля.

Таблица 1

Распределение скорости движения для дорог с различными покрытиями
Источник: составлено автором.

Table 1

Traffic speeds distribution for roads with different surfaces
Source: compiled by the author.

№	Скорость, км/ч	5	10	15	20	25	35	45	55	65
1	Путь, м	34	-	170	-	204	357	510	238	187
	Время, с	25	-	41	-	30	37	41	16	10
2	Путь, м	207	-	414	-	644	575	322	138	-
	Время, с	149	-	100	-	93	60	26	9	-
3	Путь, м	285	-	361	-	570	418	266	-	-
	Время, с	205	-	87	-	82	43	22	-	-
4	Путь, м	506	-	621	-	736	437	-	-	-
	Время, с	364	-	149	-	106	45	-	-	-
5	Путь, м	207	234	315	144	-	-	-	-	-
	Время, с	149	84	76	26	-	-	-	-	-
6	Путь, м	288	360	252	-	-	-	-	-	-
	Время, с	208	130	61	-	-	-	-	-	-

Для каждого из типов дороги необходимо задать распределение вероятности скорости движения. Примем общую длину пути равной 10000 м.

Возьмём характеристики неровностей для шести типов дорог из [9, 21].

В работе [22] описан ездовой цикл мотовездехода. Для данного цикла характерно движение со скоростью 60 км/ч на протяжении 150 с, общее время движения 18 мин.

В работе [23] отражены характерные максимальные для вездеходов скорости движения 40, 50, 60 км/ч.

Определим время и длину пути для каждого типа дороги с учетом распределения по скоростям движения.

В таблице 1 представлено соответствие длины пути и скорости движения для дорог с различными типами покрытия.

Процесс исследования

Для каждого режима движения производилось моделирование движения с применением

пяти подходов к управлению приводом:

1. Без применения специальных подходов, уставка для ДВС и ЭД прямо и линейно соответствовали положению педали газа.

2. Метод на основе постоянного соотношения тяги.

3. Метод на основе постоянного соотношения тяги с использованием систем повышения эффективности.

4. Метод на основе выбора наиболее эффективной энергоустановки.

5. Метод на основе выбора наиболее эффективной энергоустановки с использованием систем повышения эффективности.

Результаты

В таблице 2 представлены результаты для наиболее эффективных подходов к управлению. Сравнение проводится с вариантом без применения специальных подходов, где уставка для ДВС и ЭД прямо и линейно соответствовали положению педали газа.

Таблица 2
Полученные наилучшие результаты для каждого режима движения
Источник: составлено автором.

Table 2
The best results for each driving mode
Source: compiled by the author.

№	№ наиболее эффективного подхода к управлению	Расход бензина, г	Расход батареи, г	Расход батареи, г/расход бензина, г	Снижение массового расхода	Удельный расход топлива, г/км	Удельный расход батареи, г/км
1	5	106	162	1,52	53%	62	95
2	3,5	207	382	1,84	26%	90	166
3	3	214	333	1,55	22%	112	175
4	3	311	389	1,25	32%	135	169
5	3	273	155	0,56	30%	303	172
6	3	200	125	0,63	50%	222	138

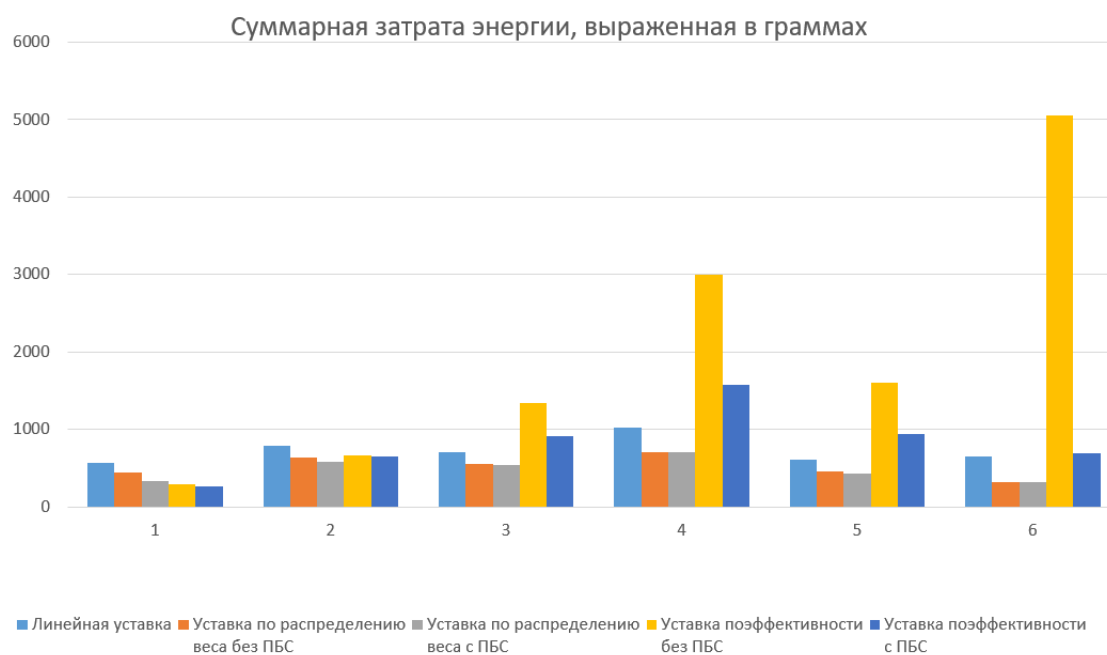


Рисунок 9 – График суммарного расхода энергии для каждого варианта режима движения
Источник: составлено автором.

Figure 9 – Total energy consumption for each driving mode option
Source: compiled by the author.

На рисунке 9 представлен рисунок с графической иллюстрацией всех результатов.

Из полученных данных следует, что при $D_q 10^{-4}$, $m^2 < 5,33 m^2$ наиболее эффективен подход к управлению, при котором уставка выбирается исходя из задействования наиболее эффективной энергетической установки.

При $D_q 10^{-4}$, $m^2 > 5,33 m^2$ наиболее эффективен подход к управлению, при котором уставка способствует поддержанию постоянства соотношения крутящих моментов на осях.

При $D_q 10^{-4}$, $m^2 \approx 5,33 m^2$ необходимо реализовать переходный процесс между уставками.

Алгоритм переключения между двумя способами управления в дальнейшем предполагается осуществить посредством применения нечеткой логики.

Выводы

1. Разработан новый комплексный закон управления ГСУ, снижающий массовый расход на 22–53%. Метод управления ГСУ включает в себя два подхода к формированию уставок. Для дорог со значением дисперсии $D_q < 5,33$ реализуется метод на основе выбора наиболее эффективной энергоустановки, при $D_q > 5,33$ реализуется метод на основе постоянного соотношения тяги.

2. Предложены новые алгоритмы повышения энергоэффективности, направленные на снижение величины буксования колес третьей оси с учетом вертикальной нагрузки. Полученное снижение массового расхода достигает 8%.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большие значения по экономии вызваны тем, что сравнение осуществляется с самым простым подходом к управлению. Так как рассматриваемая конструкция является новой и отсутствуют подходящие для сравнения решения.

Новым решением является сравнение эффективности через массовый расход. Если для ДВС это вполне каноничное решение, то для электропривода в литературе встречаются только примеры с достаточно отдаленным сходством. Самого массового расхода электроэнергии не происходит, а вычисляется условная трата. Такой подход примечателен тем, что при изменении типа накопителя энергии уставки также будут изменяться. Для выбранной батареи интервал режимов работы, когда электропривод эффективнее, достаточно невелик. Ожидаемо, что он располагается в зоне низких скоростей движения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Журкин М.М., Захаров А.Ю., Голубчик Т.В. Результаты практической реализации модульной конструкции электропривода третьей оси гибридного мотовездехода // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2024. № 1. С. 98–106. <https://www.elibrary.ru/oncjqm>
2. Селифонов В.В., Карпунин К.Е., Филонов А.И., Баулина Е.Е., Авруцкий Е.В. Гибридные автомобили – решение экологической проблемы автомобильного транспорта // Известия МГТУ «МАМИ». 2007. Т. 1, № 2. С. 30–44. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-69519>
3. Лин З.Н., Попов А.А., Сидоров В.Н., Голубина С.А. Оптимизация алгоритма управления автомобилем с гибридной силовой установкой // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24, № 1. С. 50–56. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-50-56>
4. Ahmad Zaki Abdillah, Zainab Asus, and Zul Hilmi Che Daud Dynamic simulation model of a hybrid electric atv. Journal of Transport System Engineering 8:2 (2021) 1–7, <https://doi.org/10.11113/jtse.v8.168>
5. Dragan Simic Modeling, Simulation and Evaluation of a Powertrain of a Hybrid Electric All Terrain Vehicle (ATV) International Advanced Mobility Forum Geneva, Switzerland, March 09 - 10, 2010. <https://doi.org/10.13140/2.1.3791.8405>
6. Плиев И.А., Сайкин А.М., Коршунова Г.В., Архипов А.В. Алгоритмы управления мощностями, подводимыми к колёсам полноприводных автомобилей // Журнал автомобильных инженеров. 2012. № 3(74). С. 16–18. <https://elibrary.ru/puwqix>
7. Jackson A., Crolla D., Woodhouse A., Parsons M. Improving Performance of a 6x6 Off-Road Vehicle through Individual Wheel Control. SAE Technical Paper, 2002, 2002-01-0968, <https://doi.org/10.4271/2002-01-0968>
8. Lyashenko M., Potapov P., Dolotov A., A. Diakov, Evseev K., Zverev A. Analysis of ATV transmission operation according to the results of tests on a dynamometer test bench. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 820(1):012018 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/820/1/012018>
9. Антонян А.В. Алгоритм распределения крутящего момента в автомобиле с колесной формулой 4x4 для обеспечения устойчивости движения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 9 (690). С. 31–37. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2017-9-31-37>
10. Paganelli G. Delprat S., Guerra T.M., Rimaux J., Santin J.J. Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains / // Proceedings of the 55th Vehicular Technology Conference, Vancouver, Canada. 2002. P. 2076-2081. <https://doi.org/10.1109/VTC.2002.1002989>
11. Zhang Q., Tian S. Energy Consumption Prediction and Control Algorithm for Hybrid Electric Vehicles Based on an Equivalent Minimum Fuel Consumption Model. Sustainability 2023, 15, 9394. <https://doi.org/10.3390/su15129394>

12. Кочеров А.В., Курмакаев Д.Р., Сизов А.Ю., Туманов А.А., Федосова Л.О. Выбор типа электрохимической системы аккумулятора электромобиля LCV-сегмента // НГТУ, Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2018. 2(121), с: 156–161. https://doi.org/10.46960/1816-210x_2018_2_156

13. Журкин М.М., Жилейкин М.М. Применение нейронной сети для оценки вертикальной реакции в пятне контакта с целью повышения энергоэффективности // Известия МГТУ «МАМИ». 2025. Т. 19, № 3. С. 146–155. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-688533>

14. Александров А.С., Семенова Т.В. Метод расчета предельной глубины колеи для безопасного движения // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 104–116. https://doi.org/10.52170/1815-9265_2022_60_104

15. Жилейкин М.М., Журкин М.М. Алгоритм работы антиблокировочной системы тормозов с функцией противодействия заносу для двухосных автомобилей с одной ведущей осью // Известия МГТУ «МАМИ». 2020. № 1(43) С. 51–56. <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2020-43-1-51-56>

16. Omar N., Monem M.A., Firouz Y., Salminen J., Smekens J., Hegazy O., Gaulous H., Mulder G., Van den Bossche P., Coosemans T., Van Mierlo J. "Lithium iron phosphate based battery Assessment of the aging parameters and development of cycle life model." *Applied Energy*, Vol. 113, January 2014, pp. 1575–1585. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.003>

17. Tremblay O., Dessaint L.A. "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications." *World Electric Vehicle Journal*. Vol. 3, May 13–16, 2009. <https://doi.org/10.3390/wevj3020289>

18. Левин А.И., Винокуров Г.Г. Влияние статистических характеристик профиля дороги на колебания подвески автомобильной техники Севера // Вестник Северо-Восточного федерального университета. 2018. № 5(67). С. 54–64. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2018.67.18657>

19. Hilimire K., Nesmith J., Caprio A., Milne. R. Field Note: Attributes of Windthrown Trees in a Sierra Nevada Mixed-conifer Forest. *Western Journal of Applied Forestry* 2013. 28(2): 85-88. <https://doi.org/10.5849/wjaf.12-027>

20. Bakalov Z., Belilov S., Georgieva M., Georgiev G. Natural disturbances in the forests and bark beetle outbreaks over the period 2015-2024 in the Rhodope Mountains, Bulgaria. *Silva Balcanica*. 2026. 27(1): 1-8. <https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.27.e183431>

21. Левин А.И., Буслаева И.И., Винокуров Г.Г., Гаврильева А.А. Влияние сезонного состояния дороги в криолитозоне на колебания подвески автомобильной техники // Физико-математические науки. 2019. № 4 (72) <https://www.elibrary.ru/jpvvgjt>

22. Ramírez-Ceja, Axel Iván, Manríquez-Padilla, Carlos Gustavo, Pérez-Cruz, Ángel and Torrez-Rico, Luis Armando. Design of a three-speed automatic transmission system with reverse for all-terrain vehicles (ATV). *Journal of Mechanical Engineering*.

2024; 8[21]-1-12: e20821112. <https://doi.org/10.35429/JME.2024.8.21.2.12>

23. Манянин С.Е., Черевастов М.Г. К вопросу об управляемости транспортного средства, снабженного шинами сверхнизкого давления // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 3 (130) https://doi.org/10.46960/1816-210X_2020_3_103

REFERENCES

1. Zhurkin M.M., Zaharov A.Yu., Golubchik T.V. Rezul'taty prakticheskoy realizacii modul'noj konstrukcii elektroprivoda tret'ej osi gibridnogo motovezdekhoda. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2024; № 1. S. 98-106. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/oncjgm>

2. Selifonov V.V., Karpuhin K.E., Filonov A.I., Baulina E.E., Avruckij E.V. Gibridnye avtomobili - reshenie ekologicheskoy problemy avtomobil'nogo transporta. *Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2007; T. 1. №2. С. 30-44. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/2074-0530-69519>

3. Lin Z.N., Popov A.A., Sidorov V.N., Golubina S.A. Optimizaciya algoritma upravleniya avtomobilem s gibridnoj silovoj ustanovkoj. *Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya*. 2023; T. 24. № 1. S. 50–56. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-50-56>

4. Ahmad Zaki Abdillah, Zainab Asus, and Zul Hilmi Che Daud Dynamic simulation model of a hybrid electric atv. *Journal of Transport System Engineering* 8:2 .2021; 1–7, <https://doi.org/10.11113/jtse.v8.168>

5. Dragan Simic Modeling, Simulation and Evaluation of a Powertrain of a Hybrid Electric All Terrain Vehicle (ATV) International Advanced Mobility Forum Geneva, Switzerland, March 09 - 10, 2010; <https://doi.org/10.13140/2.1.3791.8405>

6. Pliev I.A, Sajkin A.M., Korshunova G.V., Arhipov A.V. Algoritmy upravleniya moshchnostyami, podvodimymi k kolyosam polnoprivodnyh avtomobilej. «Zhurnal avtomobil'nyh inzhenerov», 2012; № 3(74), С. 16–18. (In Russ.) <https://elibrary.ru/puwqix>

7. Jackson A., Crolla D., Woodhouse A., Parsons M. Improving Performance of a 6×6 Off-Road Vehicle through Individual Wheel Control. *SAE Technical Paper*, 2002; 2002-01-0968, <https://doi.org/10.4271/2002-01-0968>

8. Lyashenko M., Potapov P., Dolotov A., Diakov A., Evseev K., Zverev A. Analysis of ATV transmission operation according to the results of tests on a dynamometer test bench. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 820(1):012018 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/820/1/012018>

9. Antonyan A.V. Algoritm raspredeleniya krutyashchego momenta v avtomobile s kolesnoj formuloj 4h4 dlya obespecheniya ustojchivosti dvizheniya. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie*. 2017; № 9 (690). S. 31-37. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2017-9-31-37>

10. Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains / Paganelli G., Delpirat S., Guerra T.M., Rimaux J., Santin J.J. // *Proceedings of the 55th Vehicular Technology Conference*, Vancouver, Canada. 2002. P. 2076-2081. <https://doi.org/10.1109/VTc.2002.1002989>

11. Zhang Q., Tian S. Energy Consumption Prediction and Control Algorithm for Hybrid Electric Vehicles Based on an Equivalent Minimum Fuel Consumption Model. *Sustainability* 2023; 15, 9394. <https://doi.org/10.3390/su15129394>
12. Kocherov A.V., Kurmakaev D.R., Sizov A.Yu., Tumanov A.A., Fedosova L.O. Vybór tipa elektromobil'noy sistemy akkumulyatora elektromobilya LCV-segmenta. *NGTU, Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2018; 2(121), 156-161. (In Russ.) https://doi.org/10.46960/1816-210x_2018_2_156
13. Zhurkin M.M., Zhilejkin M.M. Primenenie nerjonnogo seti dlya ocenki vertikal'noj reakcii v pyatne kontakta s cel'yu povysheniya energoeffektivnosti. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2025; T. 19, No 3. S. 146–155. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/2074-0530-688533>. EDN: OVIKAJ.
14. Aleksandrov A.S., Semenova T.V. Metod rascheta predel'noj glubiny kolei dlya bezopasnogo dvizheniya. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2022; № 1 (60). S. 104–116. (In Russ.) https://doi.org/10.52170/1815-9265_2022_60_104
15. Zhilejkin M.M., Zhurkin M.M. Algoritmy raboty antiblokirovochnoj sistemy tormozov s funkciej protivodejstviya zanosu dlya dvuhosnyh avtomobilej s odnoj vedushchej os'yu. *Izvestiya MGTU MAMI* 2020; № 1(43) S. 51-56. (In Russ.) <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2020-43-1-51-56>
16. Omar N., Monem M.A., Firouz Y., Salminen J., Smekens J., Hegazy O., Gaulous H., Mulder G., Van den Bossche P., Coosemans T., Van Mierlo J. "Lithium iron phosphate based battery — Assessment of the aging parameters and development of cycle life model." *Applied Energy*, Vol. 113, January 2014, pp. 1575–1585. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.003>
17. Tremblay O., Dessaint L.A., "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications." *World Electric Vehicle Journal*. Vol. 3, May 13–16, 2009. <https://doi.org/10.3390/wevj3020289>
18. Levin A.I., Vinokurov G.G. Vliyanie statisticheskikh harakteristik profilya dorogi na kolebaniya podveski avtomobil'noj tekhniki Severa. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta*. 2018; №5(67). S. 54-64. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2018.67.18657>
19. Hilimire, K., Nesmith J., Caprio A., Milne. R., Field Note: Attributes of Windthrown Trees in a Sierra Nevada Mixed-conifer Forest. *Western Journal of Applied Forestry*. 2013; 28(2): 85-88. <https://doi.org/10.5849/wjaf.12-027>
20. Bakalov Z., Belilov S., Georgieva M., Georgiev G. Natural disturbances in the forests and bark beetle outbreaks over the period 2015-2024 in the Rhodope Mountains, Bulgaria. *Silva Balcanica*, 2026; 27(1): 1-8. <https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.27.e183431>
21. Levin A.I., Buslaeva I.I., Vinokurov G.G., Gavril'eva A.A. Vliyanie sezonnoy sostoyaniya dorogi v kriolitozone na kolebaniya podveski avtomobil'noj tekhniki Fiziko-matematicheskie nauki 2019; №4 (72) (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/jpvgjt>
22. Ramírez-Ceja, Axel Iván, Manríquez-Padilla, Carlos Gustavo, Pérez-Cruz, Ángel and Torrez-Rico, Luis Armando. Design of a three-speed automatic transmission system with reverse for all-terrain vehicles (ATV). *Journal of Mechanical Engineering*. 2024. 8[21]-1-12: e20821112. <https://doi.org/10.35429/JME.2024.8.21.2.12>
23. Manyanin S.E., Cherevastov M.G. K voprosu ob upravlyaemosti transportnogo sredstva, snabzhenogo shinami sverhnizkogo davleniya *Trudy NGTU im. R. E. Alekseeva*. 2020. № 3 (130) (In Russ.) https://doi.org/10.46960/1816-210x_2020_3_103

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Журкин Михаил Михайлович – аспирант кафедры СМ10 «Колёсные машины» Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5).

ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-6254-8954>,

SPIN-код: 9228-4183,

e-mail: mimizhur@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Zhurkin Mikhail M. – postgraduate student of the SM10 Wheeled Vehicles Department, Bauman Moscow State Technical University (5, 2nd Baumanskaya st, Moscow, 105005).

ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-6254-8954>,

SPIN-code: 9228-4183,

e-mail: mimizhur@gmail.com

Научная статья
УДК 656.1.08
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-474-483>
EDN: XZCIJD



МЕТОД ТЕМПЕРАТУРНОГО РАНЖИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ КЛАСТЕРОВ ДТП ДЛЯ ПРИОРИТЕЗАЦИИ ГОРОДСКИХ ОЧАГОВ АВАРИЙНОСТИ

Н.А. Никитин¹ ✉, П.И. Роговой², И.В. Данилов², И.В. Абросимов³

¹Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта,
г. Калининград, Россия

²ООО «Мобилитика»,
г. Калининград, Россия

³Колледж НОЧУ ВО «Московский финансово-промышленный университет «Синергия»,
г. Москва, Россия

✉ ответственный автор
ninikitin@kantiana.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность исследования обусловлена необходимостью перехода от кумулятивного учёта дорожно-транспортных происшествий (ДТП) к динамическим методам оценки, позволяющим выделять точки с наиболее актуальным риском для целевого распределения ресурсов. Целью работы является создание и апробация метода температурного ранжирования для интеллектуального выявления и ранжирования локальных очагов аварийности.

Материалы и методы. В основе метода лежит расчёт интегрального показателя «температуры» для точки дорожной сети как суммы взвешенных вкладов всех ДТП, произошедших в её окрестности, с экспоненциальным затуханием вклада по времени. Используемые подходы включают пространственно-временную кластеризацию, параметрическое взвешивание видов ДТП по критериям частоты и управляемости и математическое моделирование с параметром памяти (τ). Методологический аппарат реализован в виде программного модуля на PHP, интегрируемого в системы анализа данных.

Результаты. 1. Формализован алгоритм, количественно дифференцирующий риск в точках с одинаковым числом ДТП, но разной структурой и свежестью событий. 2. Предложена и обоснована трёхуровневая система весов видов ДТП. 3. На реальных данных трёх перекрёстков г. Калининграда (2022–2024 гг.) проведена сравнительная апробация, показавшая корректное ранжирование локаций по уровню актуального риска.

Обсуждение и заключение. Научная новизна заключается в синтезе пространственной близости, временной релевантности и типологической значимости событий в едином адаптируемом показателе. Практическая значимость метода состоит в предоставлении органам управления дорожным хозяйством и ГАИ инструмента для обоснованного формирования планов по снижению аварийности на улично-дорожных сетях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорожно-транспортные происшествия, пространственно-временной анализ, кластеризация, температурная модель, показатель риска, ранжирование, безопасность дорожного движения, управление инфраструктурой

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность коллективу проекта «Мобилитика» за предоставление данных для анализа.

Статья поступила в редакцию 17.03.2026; одобрена после рецензирования 13.04.2026; принята к публикации 15.06.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Никитин Н.А., Роговой П.И., Данилов И.В., Абросимов И.В., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Никитин Н.А., Роговой П.И., Данилов И.В., Абросимов И.В. Метод температурного ранжирования пространственно-временных кластеров ДТП для приоритизации городских очагов аварийности // Вестник СиБАДИ. 2026. Т. 23, № 3. С. 474-483. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-474-483>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-474-483>

EDN: XZCIJD

TEMPERATURE RANKING METHOD FOR SPATIO-TEMPORAL ROAD ACCIDENT CLUSTERS TO PRIORITIZE URBAN BLACK SPOTS

Nikolai A. Nikitin¹ ✉, Pavel I. Rogovoy², Ilya V. Abrosimov³, Ilya V. Danilov²

¹Immanuel Kant Baltic Federal University,
Kaliningrad, Russia

²Mobilitika LLC,
Kaliningrad, Russia

³Moscow Financial and Industrial University Synergy College,
Kaliningrad, Russia

✉ corresponding author
ninikitin@kantiana.ru

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the study is due to the need to shift from the cumulative road traffic accidents (RTAs) tracking to dynamic assessment methods that can identify points with the highest risk for targeted resource allocation. The aim of the work is to develop and test a temperature ranking method for the intelligent identification and ranking of local accident clusters.

Materials and Methods. The research is based on calculating an integral temperature indicator for a road network location as the weighted sum of all RTAs in its vicinity, with an exponential decay of the contribution over time. The approaches used include spatio-temporal clustering, parametric weighting of RTA types based on frequency and controllability criteria, and mathematical modeling with a memory parameter (τ). The methodological apparatus is implemented as a PHP software module integrated into data analysis systems.

Results. The research findings include: 1) an algorithm is formalized which quantitatively differentiates the risk at locations with the same number of RTAs but different event structures and recency; 2) a three-level system of weights for RTA types is proposed and justified; 3) a comparative pilot test on real data from three intersections in Kaliningrad (2022-2024) is carried out showing correct ranking of locations by current risk level.

Discussion and Conclusions. The scientific novelty lies in integrating spatial proximity, temporal relevance, and typological significance of events into a single adaptable indicator. The practical value of the method is related to providing road management authorities and traffic police with a tool for well-founded planning accident reduction on road networks.

KEYWORDS: road traffic accidents, spatio-temporal analysis, clustering, temperature model, risk indicator, ranking, road safety, infrastructure management

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors thank the team of Mobilitika project for providing data.

The article was submitted: March 17, 2026; approved after reviewing: April 13, 2026; accepted for publication: June 15, 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: Nikitin N.A., Rogovoy P.I., Abrosimov I.V., Danilov I.V. Temperature ranking method for spatio-temporal road accident clusters to prioritize urban black spots. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (3): 474-483. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-474-483>

© Nikitin Nikolai A., Rogovoy Pavel I., Abrosimov Ilya V., Danilov Ilya V., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Повышение безопасности дорожного движения остаётся одной из ключевых задач устойчивого развития городов. Традиционные методы анализа аварийности, основанные на статистике ДТП за длительный период по административным районам или магистралям, имеют определённый недостаток: они не позволяют дифференцировать историческую концентрацию событий от текущей, актуальной опасности конкретного места [1, 2, 3, 4]. В результате ресурсы на улучшение инфраструктуры могут распределяться неэффективно – на участки, где пик аварийности уже прошёл, в ущерб точкам, где риск является максимальным «здесь и сейчас» [5].

Существующие подходы к выявлению очагов аварийности, такие как анализ плотности (Kernel Density Estimation), методы сеточного учёта или пространственно-временной кластеризации (например, ST-DBSCAN), решают задачу локализации скоплений событий, но, как правило, не предоставляют непрерывной количественной меры для их сравнительного ранжирования с учётом временной динамики [6, 7, 8]. Возникает потребность в методе, который не просто констатирует наличие кластера, но и оценивает его «температуру» – комплексный показатель, отражающий интенсивность, «свежесть» и качественный состав происшествий.

Целью данного исследования является разработка и практическая апробация метода температурного ранжирования пространственно-временных кластеров ДТП. Метод призван стать инструментом для интеллектуальной приоритизации городских очагов аварийности путём расчёта для каждого потенциально опасного места интегрального показателя, синтезирующего пространственную близость, временную релевантность и типологическую значимость происшедших ДТП.

Обзор литературы

Проблема анализа и ранжирования очагов аварийности широко освещена в научной литературе. Рассматриваемые работы [9, 10, 11, 12, 13] посвящены методам пространственной кластеризации и анализа «горячих точек» (hot spots). Однако эти методы часто ограничиваются двумерным пространственным анализом, слабо интегрируя временную компоненту [14].

Подходы, учитывающие время, такие как пространственно-временная кластеризация, (ST-DBSCAN) [15] и методы пространствен-

но-временной оценки плотности (STKDE) [16, 17], позволяют выявлять кластеры в определённом временном окне, но их результат часто носит бинарный характер (кластер/не кластер) и зависит от субъективного выбора ширины окна, что затрудняет сравнительное ранжирование множества мест [18].

Концепция «затухания» значимости события со временем, аналогичная используемой в финансовых и социальных моделях (например, экспоненциальное сглаживание), применяется в анализе аварийности фрагментарно, в основном для прогнозирования [19, 20, 21]. Работы, синтезирующие пространственную близость, экспоненциальное временное затухание и взвешивание по типу события в едином показателе для целей оперативного ранжирования, в доступных авторам источниках не обнаружены, что подтверждает научную новизну предлагаемого подхода.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Метод температурного ранжирования реализуется в виде алгоритма, состоящего из последовательных шагов. Его ядром является расчёт показателя температуры $T(y_0)$ для заданной точки дорожной сети на определённый момент времени (год y_0).

1. Пространственно-временная фильтрация. Для целевой точки с координатами (x_0, y_0) формируется исходный кластер C_0 , включающий все ДТП из базы данных, произошедшие в радиусе R (в данном исследовании $R=50$ м). Затем применяется временной фильтр, исключающий из рассмотрения события, произошедшие позднее анализируемого года y_0 (будущие события) и ранее установленной нижней границы периода $y_{\min}$ (в данном исследовании $y_{\min}=2022$). Формально в расчёт попадают события, для которых выполняется условие: $y_{\min} \leq y_i \leq y_0$.

2. Система весов типов ДТП. Каждому i -му ДТП в кластере присваивается вес $w_{type(i)}$ на основе его типа. Система весов разработана эвристически с учётом двух критериев: частоты типа в общем массиве данных и его управляемости (таблица 1). Схожие подходы к формированию интегрального индекса тяжести для ранжирования очагов (Crash Severity Index) рассматриваются в аналогичных исследованиях аварийности [22]. Управляемость понимается как степень, в которой на частоту данного типа ДТП можно повлиять мерами по изменению инфраструктуры или организации движения.

Таблица 1

Система весовых коэффициентов для видов ДТП

Источник: составлено авторами.

Table 1

System of weighting factors for road accident types

Source: compiled by the authors.

Вес (w)	Категория	Критерий назначения	Виды ДТП ¹
1,0	Высокий вес	Высокая частота и/или высокая управляемость. Прямые индикаторы системных проблем места	1 – Столкновение. 5 – Наезд на пешехода. 6 – Наезд на велосипедиста. 91 – Съезд с дороги. б/н – Наезд на лицо, использующее для передвижения СИМ (новый вид ДТП в официальной статистике ГАИ)
0,5	Средний вес	Средняя частота или ограниченная управляемость. Связь с постоянным дефектом места менее очевидна	2 – Опрокидывание. 3 – Наезд на стоящее ТС. 4 – Наезд на препятствие. 8 – Падение пассажира
0,2	Низкий вес	Низкая частота и/или низкая управляемость. Высокая концентрация в точке – редкое исключение	0 – Наезд на животное. 7 – Наезд на гужевой транспорт. 9 – Иной вид ДТП. 92 – Наезд на внезапно возникшее препятствие. 93 – Падение груза. 94 – Отбрасывание предмета. 95-97 – Наезд на лицо, не являющееся участником дорожного движения. б/н – Возгорание вследствие технической неисправности движущегося или остановившегося ТС, участвующего в дорожном движении (новый вид ДТП в официальной статистике ГАИ)

3. Расчёт вклада события и итоговой температуры. Вклад каждого *i*-го ДТП в температуру точки зависит от его веса и времени, прошедшего с момента его возникновения, и вычисляется по формуле экспоненциального затухания

$$\text{вклад}_i = w_{type(i)} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta y_i}{\tau}\right),$$

где $\Delta y_i = y_0 - y_i$ – разница в годах между анализируемым годом и годом *i*-го ДТП;

τ – параметр временной памяти системы, определяющий скорость «забывания» старых событий (в данной работе $\tau=1,45$).

Итоговая температура точки рассчитывается как сумма вкладов всех *n* ДТП в отфильтрованном кластере:

$$T(y_0) = \sum_{i=1}^n \text{вклад}_i.$$

Чем выше значение $T(y_0)$, тем «горячее» будет считаться точка, то есть будет выше актуальный риск возникновения нового ДТП.

4. Программная реализация. Алгоритм реализован в виде объектно-ориентированного модуля на языке PHP. Класс Temperature наследует базовый класс StatManager, отвечающий за фильтрацию данных, и содержит метод compute(), выполняющий расчёт по приведённой формуле. Система весов типов загружается из связанной таблицы базы данных, что обеспечивает гибкость настройки.

¹ ОДМ 218.6.015–2015 «Рекомендации по учету и анализу дорожно-транспортных происшествий на автомобильных дорогах Российской Федерации»: дата введения 18-05-2015 / ФГБУ «РОСДОРНИИ» Изд. официальное. М.: Федеральное дорожное агентство. 2015. 81 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для апробации метода были выбраны три локации (кластера) на улично-дорожной сети в г. Калининграде, на которых за 2022–2024 гг. имеются сведения о ДТП (таблица 2). Во всех трёх кластерах общее количество ДТП одинаково ($N=7$), что позволяет наглядно продемонстрировать способность метода дифференци-

ровать риск на основе структуры и свежести событий.

Расчёт температуры для каждой локации был выполнен на дату 31.12.2024 ($y_0=2024$) с параметром $\tau=1,45$. Детализированные результаты, включая вклад каждого события, представлены в таблице 3.

Таблица 2
Характеристики исследуемых локаций (кластеров)
Источник: составлено авторами.

Table 2
Characteristics of locations (clusters) under study
Source: compiled by the authors.

Условное обозначение кластера	Адресная привязка кластера	Качественное описание паттерна кластера
Loc_A	Пересечение улиц Черняховского и Горького	Смешанный тип: наезды на пешеходов, столкновения, падения пассажиров
Loc_B	Ленинский пр-кт, район остановки ОТ «Гостиница «Калининград»	Концентрация ДТП с уязвимыми участниками: наезды на пешеходов/велосипедистов, столкновения
Loc_C	Пересечение Советского проспекта и улицы Озерова	Преобладание ДТП с тяжёлыми последствиями: частые столкновения и наезды на пешеходов (включая летальный случай в 2024 г.)

Таблица 3
Результаты анализа и ранжирования кластеров
Источник: составлено авторами.

Table 3
Results of cluster analysis and ranking
Source: compiled by the authors.

Локация	Состав кластера (год, тип, вес)	Σ Вкладов (Температура, T)
Loc_A	2022, Наезд на пешехода, 1,0. 2022, Наезд на пешехода, 1,0. 2023, Падение пассажира, 0,5. 2023, Падение пассажира, 0,5. 2024, Столкновение, 1,0. 2024, Столкновение, 1,0. 2024, Падение пассажира, 0,5	2,95
Loc_B	2022, Наезд на пешехода, 1,0. 2023, Наезд на пешехода, 1,0. 2023, Столкновение, 1,0. 2024, Наезд на велосипедиста, 1,0. 2024, Наезд на пешехода, 1,0. 2024, Столкновение, 1,0. 2024, Падение пассажира, 0,5	3,88
Loc_C	2022, Наезд на пешехода, 1,0. 2022, Столкновение, 1,0. 2023, Наезд на пешехода, 1,0. 2023, Столкновение, 1,0. 2024, Столкновение, 1,0. 2024, Столкновение, 1,0. 2024, Наезд на пешехода (лет), 1,0	4,57

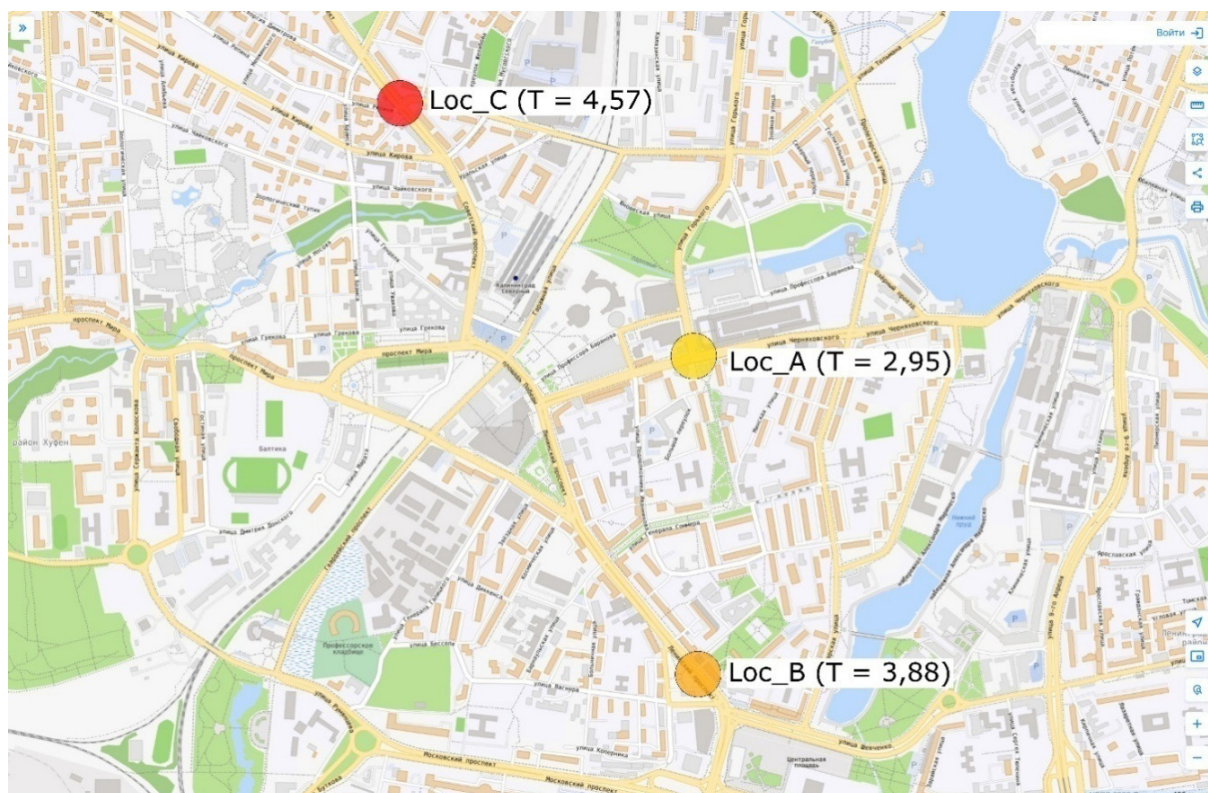


Рисунок – Ранжирование трёх локаций по показателю температуры (T)
Источник: составлено авторами.

Figure – Ranking of three locations by temperature indicator (T)
Source: compiled by the authors.

Анализ результатов показывает, что, несмотря на одинаковое количество событий, метод корректно присвоил наибольшую температуру кластеру **Loc_C** (см. рисунок). Это обусловлено максимальной концентрацией ДТП с большим весом (w) и их временной «свежестью» (три события, включая летальный наезд, произошли в 2024 г.). Кластер **Loc_B**, также обладающий свежими событиями с большим весом, но с менее плотной исторической группой, занял второе место. Кластер

Loc_A получил наименьшую температуру из-за наличия трёх событий со средним весом ($w=0,5$) и более ранних сроков наездов на пешеходов. Похожие по смыслу карты приоритизации городских очагов на основе статистики Getis–Ord G_i^* и визуализация различий между кластерами с помощью KDE и ГИС демонстрируются в других исследованиях аварийности, что косвенно говорит о перспективности данного направления анализа ДТП [23, 24, 25].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования разработан и апробирован метод температурного ранжирования пространственно-временных кластеров ДТП. Метод решает актуальную задачу перехода от учёта кумулятивной статистики к оценке актуального риска, предоставляя количественный показатель $T(y_0)$, интегрирующий пространственную близость, временную релевантность (через параметр памяти τ) и типологическую значимость (через систему весов w) дорожных происшествий.

Практическая апробация на данных г. Калининграда подтвердила работоспособность и диагностическую ценность метода: алгоритм успешно дифференцировал три перекрёстка с одинаковым числом ДТП, но разной структурой, присвоив наибольший приоритет точке с наиболее тяжёлыми и свежими инцидентами.

Научная ценность работы заключается в формализации подхода к синтезу пространственных и временных характеристик аварийности в едином адаптируемом показателе для задач сравнительного ранжирования. Практическая значимость состоит в создании инструментария (включая программный модуль) для органов управления, позволяющего обоснованно формировать планы превентивных мероприятий и оптимально распределять бюджет на повышение безопасности дорожной инфраструктуры.

Основным направлением дальнейших исследований является разработка процедур автоматической калибровки ключевых параметров модели (радиуса R , параметра памяти τ , системы весов w) на основе исторических данных и их региональной специфики, а также интеграция метода в системы прогнозного анализа и поддержки принятия решений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гантимурова Ю.О. Применение топографического анализа для выявления участков концентрации дорожно-транспортных происшествий // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2024. № 21. С. 189–192. EDN PQJDUM.
2. Горяев Н.К., Любецкий С.П. Сбор, обработка и анализ открытых данных по дорожно-транспортным происшествиям // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 5(93). С. 574–585. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-574-585>. EDN SGIFUS.
3. Kamh H., Alyami S.H., Khattak A., Alyami M., Almujibah H. «Exploring Road Traffic Accidents Hotspots Using Clustering Algorithms and GIS-Based Spatial Analysis» in IEEE Access, vol. 13, pp. 60944–60954, 2025, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3443245>
4. Soltani A., Roohani Qadikolaei M. Space-time analysis of accident frequency and the role of built environment in mitigation // Transport Policy. 2024. Vol. 150. P. 189–205. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2024.02.006>
5. Singh N., Kumar M. A novel analytical framework to identify and classify accident hotspots integrating gradient classifier and spatial clustering. *Earth Sci Inform* 18, 168, 2025. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01540-y>
6. Израилев Л.А., Гордиенко Л.В. Геоинформационный метод выявления и анализа участков концентрации дорожно-транспортных происшествий // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2024. Т. 30, № 2. С. 445–455. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2024-2-30-445-455>. EDN CSPQNX.
7. Syed Saqib Ali Kazmi, Mehreen Ahmed, Rafia Mumtaz, Zahid Anwar, Spatiotemporal Clustering and Analysis of Road Accident Hotspots by Exploiting GIS Technology and Kernel Density Estimation, *The Computer Journal*, Volume 65, Issue 2, February 2022, Pages 155–176, <https://doi.org/10.1093/comjnl/bxz158>
8. Al Hamami M, Matisziw TC. Measuring the spatiotemporal evolution of accident hot spots. *Accid Anal Prev*. 2021 Jul;157:106133. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106133>. Epub 2021 May 11. PMID: 33989871.
9. Alsahfi T. Spatial and Temporal Analysis of Road Traffic Accidents in Major Californian Cities Using a Geographic Information System. *ISPRS Int. J. Geo-Inf*. 2024, 13, 157. <https://doi.org/10.3390/ijgi13050157>
10. Khosravi Y., Hosseinali F., Adresi M. Identifying accident prone areas and factors influencing the severity of crashes using machine learning and spatial analyses. *Sci Rep* 14, 29836 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81121-7>
11. H.Thi Le Vu, T.Phuong Thi Do, T.Phuong Thi. «A study on identifying and analyzing road traffic incident hotspots on National Highway 1A, Thanh Hoa province, Vietnam, employing Statistical and GIS Techniques». *Journal of Mining and Earth Sciences*, 65(6), pp.22-33. [https://doi.org/10.46326/JMES.2024.65\(6\).03](https://doi.org/10.46326/JMES.2024.65(6).03)
12. Abdrhman H., Qiu, Y., Shams, H., Damos, M. GIS-Based Identification of Traffic Incident Hot Spots and Severity Index in Khartoum, Sudan. *TuijinJishu/ Journal of Propulsion Technology*, Volume 45, Issue 4, 2024, ISSN 1001-4055, <https://propulsiontechjournal.com/index.php/journal/article/view/8436/5289>
13. Berhanu Y., Schroeder D., Teklu B., Alemayehu E. Spatial analysis of road traffic accidents: Identifying hotspots for improved road safety in Addis Ababa, Ethiopia. *Cogent Engineering*, Volume 10, Issue 2, 2023. <https://doi.org/10.1080/23311916.2023.2269655>
14. Truong Long T., Somenahalli, Sekhar V. 2011. Using GIS to Identify Pedestrian-Vehicle Crash Hot Spots and Unsafe Bus Stops. *Journal of Public Transportation*, 14 (1): 99-114. <http://doi.org/10.5038/2375-0901.14.1.6>

15. Derya Birant, Alp Kut, ST-DBSCAN: An algorithm for clustering spatial-temporal data, *Data & Knowledge Engineering*, Volume 60, Issue 1, 2007, Pages 208-221, ISSN 0169-023X. <https://doi.org/10.1016/j.datak.2006.01.013>

16. Yunxuan L., Shuo W., Xin G., Meng L., Yanyan C. A Spatial-Temporal Kernel Density Estimate Method for Traffic Violation Hotspot Identification, 23rd COTA International Conference of Transportation Professionals, 2023, Pages 1626-1636. <https://doi.org/10.1061/9780784484869.155>

17. Han Y., Hu Y., Zhu H., Wang F. A cyclically adjusted spatio-temporal kernel density estimation method for predictive crime hotspot analysis, *Annals of GIS*, Volume 29, Issue 1, 2023, Pages 177-191. <https://doi.org/10.1080/19475683.2023.2166584>

18. Rico Krueger, Prateek Bansal, Prasad Budhavarapu, A new spatial count data model with Bayesian additive regression trees for accident hotspot identification, *Accident Analysis & Prevention*, Volume 144, 2020, 105623, ISSN 0001-4575, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105623>

19. Полетайкин А.Н., Тузова А.А. Разработка Иад-системы для процесса идентификации аварийно-опасных участков в разрезе возрастного состава участников ДТП // *Научные записки НГУЭУ*. 2025. № 2. С. 49–61. EDN LRRWCC.

20. Behboudi Noushin, Sobhan Moosavi, Rajiv Ramnath. Recent advances in traffic accident analysis and prediction: A comprehensive review of machine learning techniques. *arXiv preprint arXiv:2406.13968* (2024). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.13968>

21. Gao P., Shuai B., Zhang R., Wang B. ST-CAGNN-RNKDE: a traffic accident prediction model for spatiotemporal combinatorial attention graph neural networks using Ripley's K and network kernel density estimation. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 265, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.res.2025.111593>

22. Muduli K., Sahu D., Ghosh I. An Adaptable Framework for Identifying and Prioritising Road Traffic Accident Hotspots. *Traffic & Transportation*, Volume 37, Issue 2, 2025, Pages 321-337. <https://doi.org/10.7307/ptt.v37i2.751>

23. Abid Dr. Rana Ibrahim. Identifying Spatial Patterns of Road Accidents in Madaba City by Applying Getis-Ord Gi* Spatial Statistic. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, Volume 13, Issue 4, 2024, Pages 1-8. <https://doi.org/10.35940/ijeat.C4387.13040424>

24. Köfteci S., Yalçın M.A., QGIS-based Analysis of Traffic Accident Regions in Muratpasa District in Antalya City. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, Volume 11, Issue 4, 2024, Pages 771-779. <https://doi.org/10.54287/guj-sa.1581268>

25. Siregar A.Z., Awaluddin M., Wahyuddin Y. Identification of Traffic Accidents Vulnerability Level Using Kernel Density And K-Medoids Methods (Case Study: Depok and Kalasan Districts, Sleman Regency). *Jurnal Ilmiah Geomatika*, Volume 3, Issue 1, 2023. <https://doi.org/10.31315/imagi.v3i1.9241>

REFERENCES

1. Gantimurova Yu.O. Application of topographic analysis to identify areas of concentration of road accidents. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2024; № 21: 189-192. (In Russ.).

2. Goryaev N.K. Collection, processing and analysis of open data on road accidents. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta*. 2023; Vol. 20, № 5(93): 574-585. (In Russ.)

3. Kamh H., Alyami S.H., Khattak A., Alyami M., Almujiab H. «Exploring Road Traffic Accidents Hotspots Using Clustering Algorithms and GIS-Based Spatial Analysis» in *IEEE Access*, vol. 13, pp. 60944-60954, 2025, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3443245>

4. Soltani A., Roohani Qadikolaei M. Space-time analysis of accident frequency and the role of built environment in mitigation. *Transport Policy*. 2024. Vol. 150. P. 189–205. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2024.02.006>

5. Singh N., Kumar M. A novel analytical framework to identify and classify accident hotspots integrating gradient classifier and spatial clustering. *Earth Sci Inform* 18, 168 (2025). <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01540-y>

6. Israelev L.A. Geoinformation method for identifying and analyzing areas of concentration of road accidents. *InterKarto. InterGIS*. 2024. Vol. 30, № 2: 445-455. (In Russ.)

7. Syed Saqib Ali Kazmi, Mehreen Ahmed, Rafia Mumtaz, Zahid Anwar, Spatiotemporal Clustering and Analysis of Road Accident Hotspots by Exploiting GIS Technology and Kernel Density Estimation, *The Computer Journal*, Volume 65, Issue 2, February 2022, Pages 155–176, <https://doi.org/10.1093/comjnl/bx2158>

8. Al Hamami M, Matisziw TC. Measuring the spatiotemporal evolution of accident hot spots. *Accid Anal Prev*. 2021 Jul;157:106133. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106133>. Epub 2021 May 11. PMID: 33989871.

9. Alsahfi, T. Spatial and Temporal Analysis of Road Traffic Accidents in Major Californian Cities Using a Geographic Information System. *ISPRS Int. J. Geo-Inf*. 2024, 13, 157. <https://doi.org/10.3390/ijgi13050157>

10. Khosravi Y., Hosseinali F., Adresi, M. Identifying accident prone areas and factors influencing the severity of crashes using machine learning and spatial analyses. *Sci Rep* 14, 29836 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81121-7>

11. H.Thi Le, Vu, T.Phuong Thi and Do, T.Phuong Thi. «A study on identifying and analyzing road traffic incident hotspots on National Highway 1A, Thanh Hoa province, Vietnam, employing Statistical and GIS Techniques». *Journal of Mining and Earth Sciences*, 65(6), pp.22-33. [https://doi.org/10.46326/JMES.2024.65\(6\).03](https://doi.org/10.46326/JMES.2024.65(6).03)

12. Abdrhman H., Qiu, Y., Shams, H., Damos, M. GIS-Based Identification of Traffic Incident Hot Spots and Severity Index in Khartoum, Sudan. *TuijinJishu/ Journal of Propulsion Technology*, Volume 45, Issue 4,

2024, ISSN 1001-4055, <https://propulsionejournal.com/index.php/journal/article/view/8436/5289>.

13. Berhanu Y., Schroeder D., Teklu B., Ale-mayehu E. Spatial analysis of road traffic accidents: Identifying hotspots for improved road safety in Addis Ababa, Ethiopia. *Cogent Engineering*, Volume 10, Issue 2, 2023. <https://doi.org/10.1080/23311916.2023.2269655>

14. Truong, Long T & Somenahalli, Sekhar V. 2011. Using GIS to Identify Pedestrian-Vehicle Crash Hot Spots and Unsafe Bus Stops. *Journal of Public Transportation*, 14 (1): 99-114. <http://doi.org/10.5038/2375-0901.14.1.6>

15. Derya Birant, Alp Kut, ST-DBSCAN: An algorithm for clustering spatial-temporal data, *Data & Knowledge Engineering*, Volume 60, Issue 1, 2007, Pages 208-221, ISSN 0169-023X. <https://doi.org/10.1016/j.datak.2006.01.013>

16. Yunxuan L., Shuo, W., Xin, G., Meng, L., Yanyan, C. A Spatial-Temporal Kernel Density Estimate Method for Traffic Violation Hotspot Identification, 23rd COTA International Conference of Transportation Professionals, 2023, Pages 1626-1636. <https://doi.org/10.1061/9780784484869.155>

17. Han Y., Hu Y., Zhu H., Wang F. A cyclically adjusted spatio-temporal kernel density estimation method for predictive crime hotspot analysis, *Annals of GIS*, Volume 29, Issue 1, 2023, Pages 177-191. <https://doi.org/10.1080/19475683.2023.2166584>

18. Rico Krueger, Prateek Bansal, Prasad Budhavarapu, A new spatial count data model with Bayesian additive regression trees for accident hot spot identification, *Accident Analysis & Prevention*, Volume 144, 2020, 105623, ISSN 0001-4575, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105623>

19. Poletaikin A.N. Development of data mining system for the identification of accident blackspots in the context of the age composition of road accident participants. *Nauchnye zapiski NGUEU*. 2025; № 2: 49-61. (In Russ.)

20. Behboudi Noushin, Sobhan Moosavi, Rajiv Ramnath. Recent advances in traffic accident analysis and prediction: A comprehensive review of machine learning techniques. *arXiv preprint arXiv:2406.13968* (2024). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.13968>

21. Gao P., Shuai B., Zhang R., Wang B. ST-CAGNN-RNKDE: a traffic accident prediction model for spatiotemporal combinatorial attention graph neural networks using Ripley's K and network kernel density estimation. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 265, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.res.2025.111593>

22. Muduli K., Sahu D., Ghosh I. An Adaptable Framework for Identifying and Prioritising Road Traffic Accident Hotspots. *Traffic & Transportation*, Volume 37, Issue 2, 2025, Pages 321-337. <https://doi.org/10.7307/ptt.v37i2.751>

23. Abid, Dr. Rana Ibrahim. Identifying Spatial Patterns of Road Accidents in Madaba City by Applying Getis-Ord Gi* Spatial Statistic. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, Volume 13, Issue 4, 2024, Pages 1-8. <https://doi.org/10.35940/ijeat.C4387.13040424>

24. Köfteci S., Yalçın M.A., QGIS-based Analysis of Traffic Accident Regions in Muratpasa District in Antalya City. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, Volume 11, Issue 4, 2024, Pages 771-779. <https://doi.org/10.54287/guj-sa.1581268>

25. Siregar A.Z., Awaluddin M, Wahyuddin Y. Identification of Traffic Accidents Vulnerability Level Using Kernel Density And K-Medoids Methods (Case Study: Depok and Kalasan Districts, Sleman Regency). *Jurnal Ilmiah Geomatika*, Volume 3, Issue 1, 2023. <https://doi.org/10.31315/imagi.v3i1.9241>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Никитин Н.А. Анализ литературы, интерпретация результатов, подготовка и оформление рукописи.

Роговой П.И. Концепция и дизайн исследования. Данилов И.В. Сбор и первичная обработка данных.

Абросимов И.В. Разработка алгоритма, программирование, редактирование текста.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Nikitin N.A. Literature analysis, interpretation of results, writing the manuscript.

Rogovoy P.I. Design of the research concept. Danilov I.V. Data collection and primary processing. Abrosimov I.V. Algorithm development, programming, manuscript editing.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Никитин Николай Андреевич – старший преподаватель Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта (236041, г. Калининград, ул. Александра Невского, 14).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8512-7662>,

SPIN-код: 7386-1111,

Scopus ID: 57193746390,

e-mail: ninikitin@kantiana.ru

Роговой Павел Игоревич – генеральный директор ООО «Мобилитика» (236040, г. Калининград, пл. Победы, д. 10, офис 505 г, д).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7881-2792>,

SPIN-код: 7109-1764,

e-mail: rogovoy@mobilitika.ru

Данилов Илья Владимирович – веб-разработчик ООО «Мобилитика» (236040, г. Калининград, пл. Победы, д. 10, офис 505 г, д).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5370-4499>,

SPIN-код: 7109-1764,

e-mail: danilov@mobilitika.ru

Абросимов Илья Владимирович – студент 4-го курса специальности «Информационные системы и программирование» Колледжа НОЧУ ВО «Московский финансово-промышленный университет «Синергия» (129090, г. Москва, ул. Мещанская, д. 9/14, стр. 1).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8318-5672>,

SPIN-код: 8351-0761,

e-mail: eli.abrosimov@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikitin Nikolai A. – senior lecturer at the Immanuel Kant Baltic Federal University (Alexander Nevsky St., 14, Kaliningrad, 236041).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8512-7662>,

SPIN-code: 7386-1111,

Scopus ID: 57193746390,

e-mail: ninikitin@kantiana.ru

Rogovoy Pavel I. – general director, Mobilitika LLC (Pobedy Square, 10, office 505 g,d Kaliningrad, 236040).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7881-2792>,

SPIN-code: 7109-1764,

e-mail: rogovoy@mobilitika.ru

Danilov Ilya V. – web developer, Mobilitika LLC, (Pobedy Square, 10, office 505 g,d Kaliningrad, 236040).

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-5370-4499>,

SPIN-code: 7109-1764,

e-mail: danilov@mobilitika.ru

Abrosimov Ilya V. – undergraduate student, specializes in Information Systems and Programming at the Moscow Financial and Industrial University Synergy College (Meshchanskaya St., 9/14, building 1, Moscow, 129090).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8318-5672>,

SPIN-code: 8351-0761,

e-mail: eli.abrosimov@yandex.ru

Научная статья
УДК 656.025.2
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-484-495>
EDN: SAGVAY



МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ МЕЖМУНИЦИПАЛЬНЫХ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ В АГЛОМЕРАЦИИ КРУПНОГО ГОРОДА

А.В. Мартыненко

Уральский государственный университет путей сообщения,
г. Екатеринбург, Россия
amartynenko@rambler.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях крупных городских агломераций моделирование матрицы межмуниципальных корреспонденций необходимо для обоснования решений транспортного планирования. Наиболее распространённым инструментом является гравитационная модель, учитывающая пространственную удалённость между зонами, однако в агломерациях потенциально перспективен радиационный подход, опирающийся на механизм «промежуточных возможностей». При этом для агломераций крупных российских городов вопрос применимости радиационной модели до настоящего времени изучен недостаточно.

Цель работы. Оценить матрицу межмуниципальных корреспонденций в пределах городской агломерации по данным сотовых операторов о поездках населения и сопоставить точность гравитационной и радиационной моделей как инструментов, необходимых для решения задач транспортного планирования.

Материалы и методы. Использованы агрегированные данные сотовых операторов о межмуниципальных поездках населения в Екатеринбургской агломерации. В качестве обобщённой стоимости поездки использовались расстояния по сети автомобильных дорог, рассчитанные на основе данных OpenStreetMap. Для калибровки гравитационной и радиационной моделей с двойным ограничением использовались метод моментов и метод бипропорциональной балансировки.

Результаты. Выполнена калибровка моделей, построены прогнозные матрицы корреспонденций, и проведена валидация по наблюдаемым потокам. Показано, что оба подхода адекватно воспроизводят основные направления типа «ядро–спутники», однако на потоках средней величины и на связях между городами-спутниками проявляются различия, обусловленные разными механизмами формирования перемещений в моделях. По абсолютным метрикам точности небольшое преимущество демонстрирует гравитационная модель, тогда как по относительным ошибкам более устойчивые результаты показывает радиационная. При этом показатели тесноты связи между наблюдаемыми и модельными потоками высокие для обеих моделей.

Заключение. Результаты подтверждают сопоставимую объясняющую способность гравитационного и радиационного подходов при моделировании матрицы межмуниципальных корреспонденций. При этом радиационная модель является более предпочтительной с точки зрения практического использования в силу своей простоты и отсутствия калибруемых параметров.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: матрица корреспонденций, транспортное планирование, транспортное моделирование, поездки населения, городская агломерация, гравитационная модель, радиационная модель, метод Фёрнесса, данные сотовых операторов о поездках населения

БЛАГОДАРНОСТИ: работа выполнена в соответствии с планом НИР УрГУПС.

Статья поступила в редакцию 13.02.2026; одобрена после рецензирования 18.03.2026; принята к публикации 15.06.2026.

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: Мартыненко А.В. Моделирование матрицы межмуниципальных корреспонденций в агломерации крупного города // Вестник СиБАДИ. 2026. Т. 23, № 3. С. 484-495. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-484-495>

© Мартыненко А.В., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-484-495>
EDN: SAGVAY

MODELING OF INTER-MUNICIPAL ORIGIN–DESTINATION MATRIX FOR LARGE URBAN AGGLOMERATION

Alexander V. Martynenko

Ural State University of Railway Transport,
Yekaterinburg, Russia
amartynenko@rambler.ru

ABSTRACT

Introduction. In large urban agglomerations, modeling an inter-municipal origin–destination (OD) matrix is necessary to substantiate transport planning decisions. The most widely used tool is the gravity model, which accounts for spatial separation between zones; however, in agglomerations a radiation approach based on the “intervening opportunities” mechanism may be promising. At the same time, the applicability of the radiation model to agglomerations of major Russian cities remains insufficiently studied.

The objective is to estimate an inter-municipal OD matrix within an urban agglomeration based on mobile network operator data on population movements and to compare the accuracy of the gravity and radiation models as tools required for solving transport planning tasks.

Materials and methods. Aggregated mobile network operator data on inter-municipal population trips in the Yekaterinburg agglomeration were used. Road-network distances derived from OpenStreetMap data were used as the generalized travel cost. For calibrating the doubly constrained gravity and radiation models, the method of moments and the biproportional balancing (Furness) method were applied.

Results. The models were calibrated, predictive OD matrices were constructed, and validation against observed flows was performed. Both approaches were shown to reproduce adequately the main “core–satellite” directions; however, for medium-sized flows and for links between satellite towns, differences appear due to different trip generation mechanisms in the models. In terms of absolute accuracy metrics, the gravity model demonstrates a slight advantage, whereas the radiation model shows more stable performance in terms of relative errors. At the same time, the strength of association between observed and modeled flows is high for both models.

Conclusion. The results confirm a comparable explanatory power of the gravity and radiation approaches in modeling an inter-municipal OD matrix. The radiation model is more preferable from a practical perspective due to its simplicity and the absence of calibratable parameters.

KEYWORDS: origin–destination (OD) matrix; transport planning; transport modeling; population trips; urban agglomeration; gravity model; radiation model; Furness method; mobile network operator data on population trips

ACKNOWLEDGEMENTS: this work was carried out in accordance with the research plan of the Ural State University of Railway Transport.

The article was submitted: February 13, 2026; **approved after reviewing:** March 18, 2026; **accepted for publication:** June 15, 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: Martynenko A.V. Modeling of inter-municipal origin–destination matrix for large urban agglomeration. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (3): 484–495. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-484-495>

© Martynenko Alexander V., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Точная количественная оценка и прогнозирование транспортного спроса являются ключевым элементом современного транспортного планирования. Достоверные модели позволяют обоснованно принимать решения по развитию и организации перевозок: определять рациональные маршруты и расписания, оценивать требуемую провозную способность, планировать обновление подвижного состава и приоритеты инфраструктурных инвестиций. Кроме того, результаты моделирования необходимы для анализа последствий принимаемых управленческих решений (изменений тарифов, схем движения, ограничений личного транспорта), обеспечения доступности рабочих мест и социальных услуг, а также для согласования транспортных решений с документами территориального и градостроительного планирования. В условиях агломераций, где ежедневная мобильность населения тесно связана с распределением мест проживания и занятости, моделирование транспортного спроса становится одним из основных инструментов оценки пространственных эффектов и поддержки решений в области устойчивого развития территорий.

Наиболее широко распространенным инструментом моделирования пространственного распределения поездок населения является гравитационная модель (ГМ), в основе которой лежит предположение, что интенсивность поездок определяется «масштабом» пункта отправления и пункта назначения (например, численностью населения, уровнем занятости, объемом деловой активности и т.п.), а также пространственной удаленностью между ними. При прочих равных ожидается, что потоки между крупными и географически близкими центрами оказываются выше, чем между небольшими и расположенными далеко друг от друга. Конкретная математическая форма зависимости выбирается исходя из особенностей моделируемой транспортной системы

и набора дополнительных ограничений, которые накладываются при постановке задачи.

Применение ГМ для количественного описания пространственных потоков восходит по меньшей мере к работам 1930-х годов [1]. Однако широко такие модели стали использоваться с середины XX в. [2] в применении не только к транспортным потокам, но также торговому, финансовому, миграционному и т.п. [3].

Наиболее интенсивное развитие теоретической базы ГМ приходится на 1960–1970-е годы, когда были подробно изучены математические свойства модели и разработаны процедуры оценки параметров по наблюдаемым данным. В ряде классических работ^{1,2,3,4} были предложены методы калибровки и приведены строгие обоснования их корректности, а также дано системное изложение^{5,6} теоретических аспектов применения этих результатов. Наряду с теоретическими исследованиями в этот период начинается практическое применение данных моделей для планирования транспортного развития конкретных территорий⁷. Однако возможность использования таких подходов в то время была ограничена, поскольку необходимые для калибровки эмпирические данные получались в основном из обследований, опросов и натурных наблюдений, что было ненадежным и требовало значительных затрат.

Сдвиг произошёл в конце 1990-х годов вследствие цифровизации и распространения технологий, генерирующих следы мобильности. Дорожные комплексы видеонаблюдения, безличные расчёты, повсеместное использование устройств с геопозиционированием и иные решения существенно расширили возможности получения детализированной информации о транспортных потоках.

Увеличение доступности данных привело к заметному росту числа исследований, посвященных моделированию пространственного распределения поездок населения. Среди последних работ в этом направлении мож-

¹ Hyman G.M. The calibration of trip distribution models. *Environment and Planning*. 1969. 1: 105–112.

² Evans A.W. Some properties of trip distribution methods. *Transportation Research*. 1970. 4: 19–36.

³ Evans A.W. The calibration of trip distribution models with exponential or similar cost functions. 1971.

⁴ Kirby H.R. Theoretical requirements for calibrating gravity models. *Transportation Research*. 1974.

⁵ Hua C., Porell F. A critical review of the development of the gravity model. *International Regional Science Review*. 1979. 4(2): 97–126.

⁶ Erlander S., Stewart N.F. The gravity model in transportation analysis: theory and extensions. VSP, 1990.

⁷ Wells G. *Traffic engineering: an introduction*. London: Charles Griffin, 1979.

но отметить [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13] и множество других публикаций. В частности, в [4] на основе гравитационных спецификаций моделируется распределение поездок между станциями региональной железной дороги. Работа [5] посвящена изучению возможностей применения ГМ для описания пространственного распределения внутрирегиональных карпулинговых поездок. Аналогично в [6] изучается адекватность ГМ для железнодорожных пассажиропотоков в масштабах страны: используя данные об объемах продаж билетов на поезда дальнего следования для более чем 36 000 направлений, авторы детально исследовали возможность точного количественного моделирования матрицы корреспонденций. В [8] ГМ используется для оценки спроса на регулярных междугородних автобусных линиях, а в [9] рассматривается задача оценивания матриц корреспонденций больших размерностей для мультимодальных поездок на транспорте общего пользования. Применение ГМ в условиях неполных данных анализируется в работе [10], а вопросам, связанным с повышением точности моделирования матриц грузовых корреспонденций за счет учета социально-экономического расстояния, посвящена работа [12]. Также необходимо отметить обзорную статью [11], в которой систематизируются современные подходы к оцениванию матриц корреспонденций транспорта общего пользования по данным автоматизированных систем оплаты проезда.

Сравнительно недавно в качестве альтернативы ГМ была предложена радиационная модель (РМ), ориентированная на объяснение транспортных перемещений через механизм «промежуточных возможностей» без учета каких-либо затрат на перемещение (расстояние, время, стоимость и т.п.). В уже ставшей классической работе [14] РМ выводится как безпараметрическая зависимость объемов корреспонденций от «размера» пункта отправления (например, количества потенциальных отправителей), «привлекательности» пункта назначения (количества возможностей в нем) и суммарной «привлекательности» всех пунктов, расположенных между ними. РМ формирует потоки, которые зависят только от среды вокруг каждой пары пунктов отправления и прибытия. Это напоминает физический процесс излучения радиоактивного вещества в пространстве, что и послужило основанием для названия модели. Преимуществами такого подхода являются простота применения, отсутствие калибруемых параметров и прозрач-

ная интерпретация в терминах конкуренции возможностей. Хотя точность воспроизведения потоков чувствительна к тому, насколько адекватно выбран показатель «возможностей», в качестве которого может выступать численность населения, количество рабочих мест и т.п.

Дальнейшие исследования были сосредоточены на двух практических вопросах: насколько точно РМ описывает потоки для территорий разного уровня (страна – регион – город) и какие характеристики лучше всего использовать в качестве меры возможностей пунктов отправления и прибытия. Так, в [15] было показано, что поездки в городах действительно обладают высокой регулярностью, однако «универсальная» безпараметрическая форма не всегда корректно воспроизводит наблюдаемое распределение поездок по дальности и направлениям. Для уровня города РМ не является гарантированно применимой: её нужно проверять на конкретных данных и при необходимости дополнять. Например, к исходной модели могут быть добавлены дополнительные сведения о фактической мобильности, извлечённые из цифровых следов в социальных сетях [16]. Привлечение подобной внешней информации позволяет заметно повысить точность прогнозов и сделать модель более устойчивой к особенностям конкретной территории.

РМ применяют не только для прямого расчёта потоков, но и в задачах, где потоки выступают исходными данными для других показателей и моделей. Так, в [17] сопоставляют гравитационный и радиационный подходы при расчёте транспортной доступности и показывают, что выбор модели распределения поездок заметно влияет на итоговые оценки: одни и те же зоны могут выглядеть более или менее «доступными» в зависимости от того, как модель учитывает конкуренцию между близлежащими возможностями. Похожий подход используется и в работе [18]. Здесь РМ рассматривается наряду с другими моделями как механизм, объясняющий формирование транспортной сети на основе моделируемой интенсивности взаимодействия между территориями.

Также отметим, что весьма перспективным направлением является разработка нейросетевых моделей на основе радиационного подхода. В недавней работе [19] была предложена РМ глубокого обучения для прогнозирования объемов междугородних корреспонденций. На основе ключевой идеи «промежуточных

возможностей» (влияние окружения между пунктами отправления и прибытия) создана нейросеть, обученная на расширенном наборе характеристик городов. Этот подход позволил сохранить интерпретируемую структуру РМ и одновременно повысить точность за счёт использования дополнительных данных и машинного обучения.

Отсутствие явного учета расстояний в РМ (в отличие от ГМ) на первый взгляд выглядит спорным, поскольку транспортные издержки обычно считаются ключевым фактором взаимодействия территорий. Однако радиационный подход опирается на другую логику: направление поездки определяется, прежде всего, распределением возможностей (рабочих мест, образовательных возможностей, наличия товаров и услуг) и их конкуренцией в окружающем пространстве. Во многих ситуациях расстояние не слишком важно: если в ближайшем окружении нужных возможностей нет, то поездка будет осуществлена в пункт, обладающий этими возможностями, независимо от того, расположен он в 20 или 40 км.

Такие соображения особенно характерны для агломерации большого города из-за концентрации занятости и сервисов в ядре и ограниченного набора альтернатив на периферии. В силу этого РМ представляется перспективным инструментом для моделирования матрицы межмуниципальных корреспонденций в агломерации большого города. Однако до настоящего момента не проводились какие-либо исследования, направленные на проверку адекватности радиационного подхода для агломераций крупных российских городов. Поэтому цель настоящей работы – оценить матрицу межмуниципальных корреспонденций в пределах городской агломерации по данным сотовых операторов о поездках населения и сопоставить точность гравитационной и радиационной моделей как инструментов, необходимых для решения задач транспортного планирования.

Практическая значимость настоящей работы определяется тем, что оцененная матрица межмуниципальных корреспонденций может использоваться как входная информация в задачах транспортного планирования агломерации: при оценке транспортного спроса, для сравнительного анализа сценариев развития улично-дорожной сети и организации движения, а также при расчетах показателей транспортной доступности.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В настоящем исследовании для моделирования матрицы межмуниципальных корреспонденций использовались ГМ и РМ с двойным ограничением по отправлениям и прибытиям.

ГМ с двойным ограничением имеет вид [1]:

$$T_{ij} = a_i b_j f(c_{ij}), \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^J T_{ij} = O_i \quad \forall i = 1, \dots, I, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I T_{ij} = D_j \quad \forall j = 1, \dots, J. \quad (3)$$

Здесь T_{ij} – среднесуточное количество поездок на всех видах транспорта из пункта отправления i в пункт прибытия j ; I – количество пунктов отправления; J – количество пунктов прибытия; O_i – среднесуточное количество поездок из пункта i (во все пункты прибытия); D_j – среднесуточное количество поездок в пункт j (из всех пунктов отправления); c_{ij} – обобщенная стоимость поездки из пункта i в пункт j (может учитывать расстояние, время, стоимость и т.п.; измеряется в условных единицах или может быть выражена в единицах длины, времени, стоимости); a_i и b_j – балансирующие коэффициенты и в качестве функции тяготения $f(c)$ была выбрана показательно-степенная функция

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^\gamma \exp(-\mu c_{ij}) \text{ при } i \neq j, \quad f(c_{ii}) = 0,$$

где γ, μ – параметры, которые калибруются по эмпирическим данным. Отметим, что нулевые значения функции f на главной диагонали обусловлены тем, что моделирование выполнялось только для межмуниципальных поездок, поэтому все наблюдаемые и модельные объемы внутримunicipальных поездок полагаются равными нулю.

Для калибровки модели (1)–(3) по наблюдаемым значениям применяется метод максимального правдоподобия (подробное изложение можно найти, например, в [6]). Этот метод сводит отыскание параметров γ, μ и балансирующих коэффициентов a_i, b_j к численному решению системы уравнений:

$$\sum_{j=1}^J T_{ij} = O_i^{\text{набл}} \quad \forall i = 1, \dots, I, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I T_{ij} = D_j^{\text{набл}} \quad \forall j = 1, \dots, J, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J T_{ij} c_{ij} = C_{\text{ср}}^{\text{набл}}, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J T_{ij} \ln c_{ij} = (\ln C)_{\text{ср}}^{\text{набл}}, \quad (7)$$

где $O_i^{\text{набл}}$ и $D_j^{\text{набл}}$ – наблюдаемые (фактические) объемы отправок и прибытий; $C_{\text{ср}}^{\text{набл}}$ и $(\ln C)_{\text{ср}}^{\text{набл}}$ – наблюдаемые средние стоимости поездки (обычная и логарифмированная).

РМ, введенная в [14], имеет вид:

$$T_{ij} = O_i \cdot \omega_{ij}, \quad i \neq j, \quad \omega_{ij} = \frac{m_i n_j}{(m_i + s_{ij})(m_i + n_j + s_{ij})}, \quad (8)$$

где m_i и n_j характеризуют «масштаб» пунктов i и j в терминах доступных возможностей (opportunities), которые потенциально могут быть целью перемещения. В качестве меры возможностей обычно берут численность населения, количество рабочих мест, объем услуг и торговли, количество мест в образовательных организациях и т.п. В настоящей работе для этих целей будет использоваться наиболее универсальная величина – численность населения муниципального образования. Величина s_{ij} определяется как суммарное число возможностей, расположенных в пространстве между i и j , то есть внутри окружности, центром которой является пункт i , а радиус равен c_{ij} :

$$s_{ij} = \sum_{k \neq i, j; c_{ik} < c_{ij}} n_k.$$

Тем самым выбор пункта назначения j при поездке из пункта i зависит не от самой величины расстояния как таковой, а от количества возможностей, расположенных между i и j . Принципиальной особенностью модели (8) является отсутствие параметров, нуждающихся в калибровке, что с практической точки зрения представляет собой огромное преимущество, поскольку использование этой модели не требует затрат на сбор данных для калибровки.

Отметим, что матрица корреспонденций, вычисленная по формуле (8), не удовлетворяет балансовым условиям по строкам и столбцам, т.е. в общем случае для РМ не будут выполнены равенства (2) и (3). Дело в том, что при выводе модели (8) в [14] используется идеализированная транспортно-территориальная система с бесконечным количеством пунктов отправления/прибытия (соответственно, с бесконечным количеством возможностей) и ненулевыми диагональными корреспонденциями. В такой идеализированной системе ω_{ij} имеют смысл вероятностей, для которых справедлива нормировка $\sum_i \omega_{ij} = \sum_j \omega_{ij} = 1$. А это, в свою очередь, обеспечивает выполнение условий (2) и (3). Однако для реальной территории с конечным числом пунктов отправления/прибытия эта нормировка нарушается.

Таким образом, ω_{ij} задаёт пространственную структуру распределения потоков (относительные предпочтения направлений), но не обеспечивает автоматического выполнения балансовых ограничений (2) и (3). Поэтому на практике при заданных $O_i^{\text{набл}}$ и $D_j^{\text{набл}}$ в РМ вводят балансирующие коэффициенты a_i , b_j и рассматривают ее как модель с двойным ограничением по отправлениям и прибытиям:

$$T_{ij} = a_i b_j \omega_{ij}, \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^J T_{ij} = O_i^{\text{набл}} \quad \forall i = 1, \dots, I, \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^I T_{ij} = D_j^{\text{набл}} \quad \forall j = 1, \dots, J. \quad (11)$$

Коэффициенты a_i , b_j могут быть найдены численно из системы уравнений (10)–(11) с помощью классического метода бипропорциональной балансировки (метод Фёрнесса) [1].

Для валидации и сравнительного анализа точности ГМ и РМ в настоящем исследовании были использованы данные сотовых операторов о междумуниципальных поездках населения в пределах Екатеринбургской агломерации, содержащиеся в региональной геоинформационной системе Свердловской области. Эти данные представляют собой среднее количество поездок в сутки (по данным 2024 г.) для каждой пары из 13 муниципальных образований, входящих в агломерацию Екатеринбурга (рисунки 1).

Симметризованный вариант полученной из системы матрицы корреспонденций $T^{\text{набл}} = \{T_{ij}^{\text{набл}}\}$ представлен на рисунке 2 (внутримуниципальные поездки не рассматриваются, т.е. $T_{ii}^{\text{набл}} = 0$). В качестве наблюдаемых значений объемов отправок и прибытий для калибровки моделей использовались значения

$$O_i^{\text{набл}} = \sum_{j=1}^N T_{ij}^{\text{набл}},$$

$$D_j^{\text{набл}} = \sum_{i=1}^N T_{ij}^{\text{набл}},$$

где $N = 13$ – количество муниципальных образований.

МО агломерации Екатеринбурга с автомобильными дорогами и населёнными пунктами

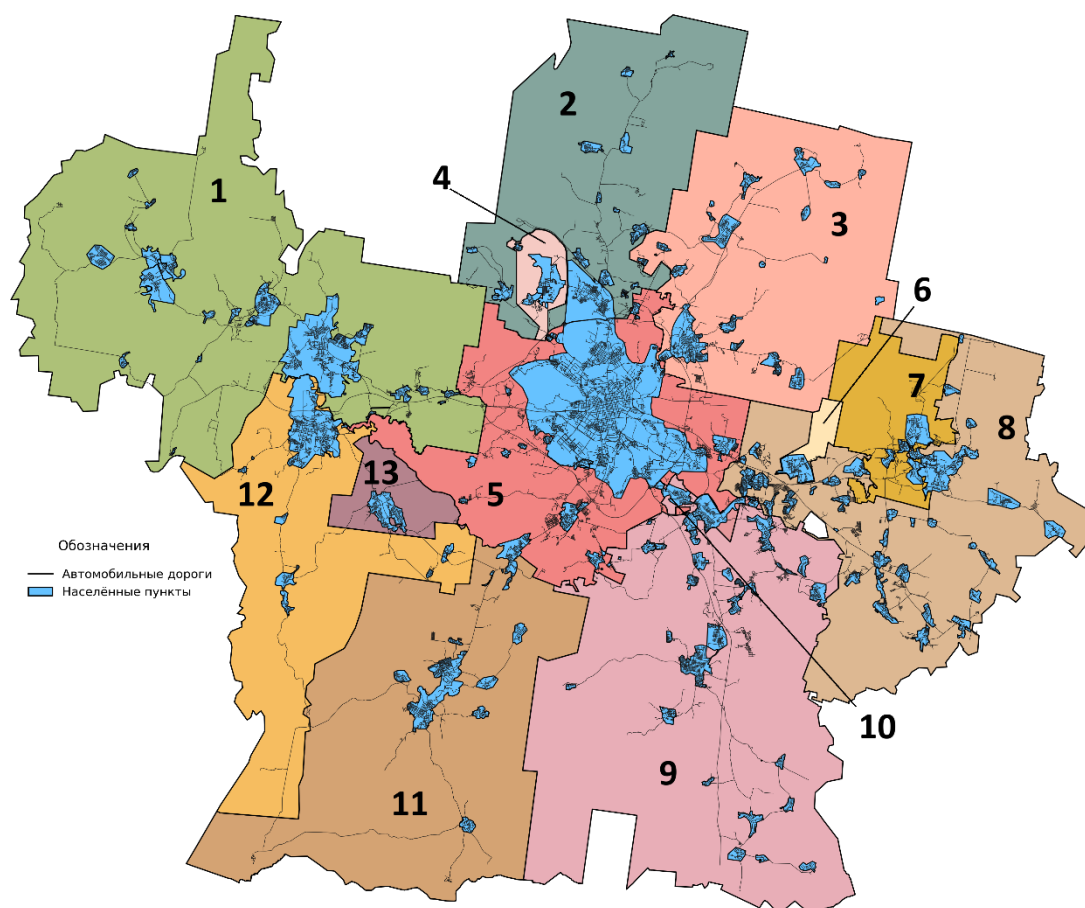


Рисунок 1 – Агломерация Екатеринбурга: 1 – МО Первоуральск, 2 – ГО Верхняя Пышма, 3 – Березовский МО, 4 – МО Среднеуральск, 5 – ГО Екатеринбург, 6 – ГО Верхнее Дуброво, 7 – МО Заречный, 8 – Белоярский МО, 9 – Сысертский МО, 10 – Арамилский ГО, 11 – Полевской МО, 12 – МО Ревда, 13 – МО Дегтярск
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Yekaterinburg agglomeration: 1 – Pervouralsk MD, 2 – Verkhnyaya Pyshma UD, 3 – Berezovsky MD, 4 – Sredneural'sk MD, 5 – Yekaterinburg UD, 6 – Verkhneye Dubrovo UD, 7 – Zarechny Municipal District, 8 – Beloyarsky Municipal District, 9 – Sysert MD, 10 – Aramil UD, 11 – Polevskoy MD, 12 – Revda MD, 13 – Degtyarsk MD
Source: compiled by the author.

В качестве обобщенной стоимости использовались кратчайшие расстояния (в км) по автомобильным дорогам между центрами самых крупных населенных пунктов, входящих в МО. Расстояния были рассчитаны на основе гео-данных из OpenStreetMap (OSM).

Обработка данных, калибровка моделей и визуализация результатов были выполнены средствами языка Python.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате численного решения системы уравнений (4)–(7) были найдены баланси-ровочные коэффициенты и параметры функции тяготения для ГМ. В частности, было получе-но $\gamma = -1,44$, $\mu = 0,0197$. Аналогично из системы уравнений (10)–(11) были определены балан-сировочные коэффициенты для РМ. Рассчи-танные на основе ГМ и РМ матрицы корре-спонденций приведены на рисунке 2.

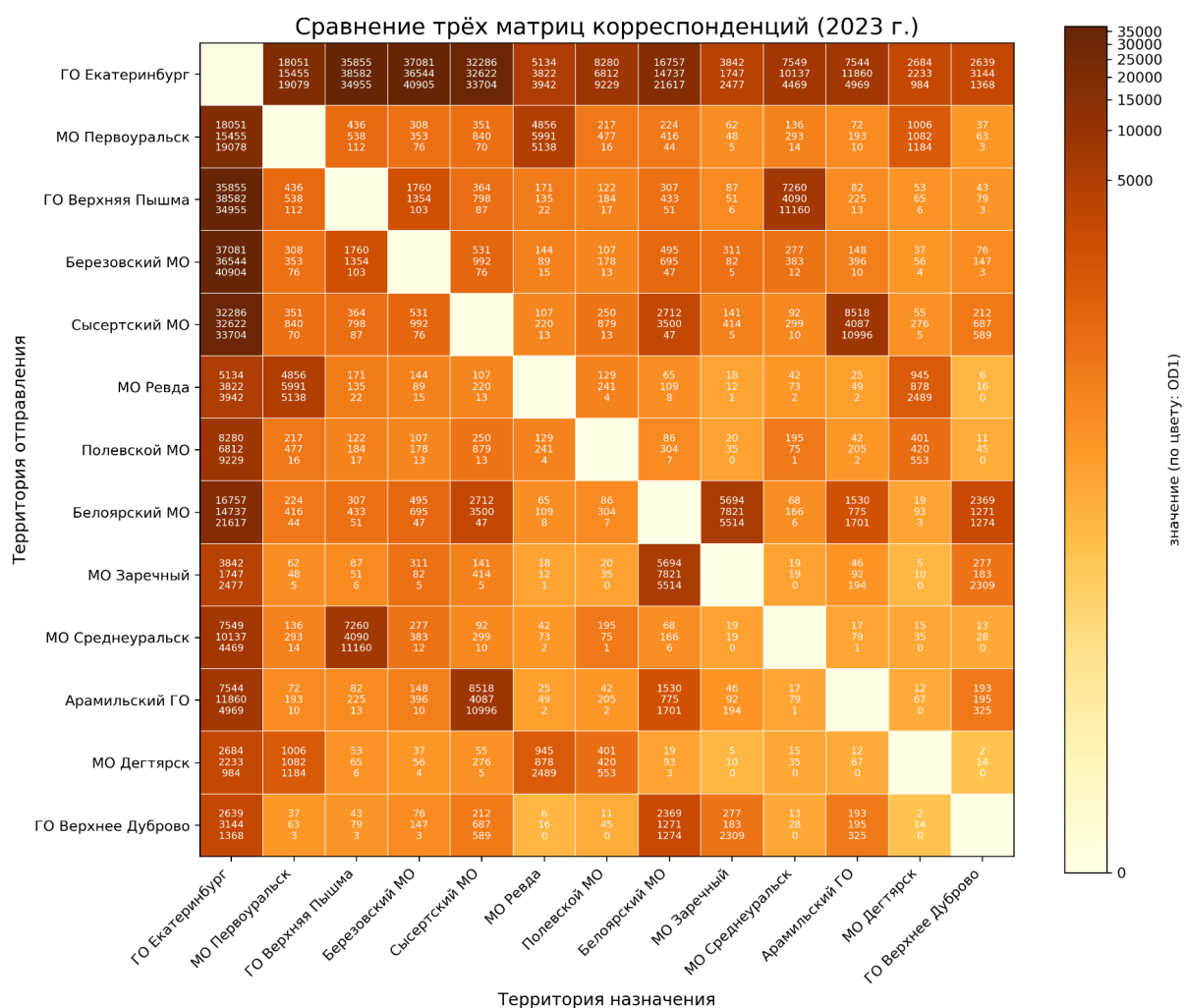


Рисунок 2 – Наблюдаемая и модельные матрицы корреспонденций в агломерации г. Екатеринбурга (среднее количество поездок в сутки). Верхнее число в ячейке – фактическое значение, среднее и нижнее получены на основе ГМ и РМ соответственно
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Observed and modeled origin-destination matrices in the Yekaterinburg agglomeration (average number of trips per day). The top number in each cell is the observed value; the middle and bottom numbers are obtained from the gravity model (GM) and the radiation model (RM), respectively
Source: compiled by the author.

Таблица
Сравнение результатов моделирования для ГМ и РМ
Источник: составлено автором.

Table
Comparison of modelling results for the gravity model and the radiation model
Source: compiled by the author.

Метрика качества	ГМ	РМ
Средняя абсолютная ошибка	496,5	555,9
Среднеквадратическая ошибка	1047,6	1128,0
Средняя относительная ошибка	1,027	0,876
Коэффициент корреляции	0,990	0,990
Коэффициент детерминации	0,978	0,974

Отметим, что фактические значения корреспонденций демонстрируют высокую степень неоднородности: наряду с направлениями, где объемы достигают десятков тысяч поездок в сутки, присутствует большое число пар МО с малыми значениями (единицы-десятки и сотни поездок в сутки). Наиболее крупные корреспонденции формируются между ядром агломерации (ГО Екатеринбург) и городами-спутниками из ближайшего пояса агломерации. В частности, для направлений Екатеринбург – Верхняя Пышма и Екатеринбург – Берёзовский наблюдаемые значения составляют 35 855 и 37 081 поездок в сутки соответственно. При этом обе модели воспроизводят эти потоки близко к наблюдаемым (для Екатеринбург – Верхняя Пышма: ГМ 35852, РМ 34955; для Екатеринбург – Берёзовский: ГМ 36544, РМ 40904).

Одновременно с этим для ряда направлений заметны существенные различия в поведении ГМ и РМ при воспроизведении потоков средней величины (порядка нескольких тысяч поездок/сутки) и потоков между городами-спутниками. Например, для пары Екатеринбург – Среднеуральск фактическое значение равно 7 549, при этом ГМ дает 10 137, а РМ – 4 469. Для пары Верхняя Пышма – Среднеуральск наблюдаемое значение равно 7 260, тогда как ГМ дает 4 090, а РМ – 11 160. Аналогичный характер расхождений имеет место и для пары Сысерть – Арамиль: при фактическом значении 8 518 ГМ дает 4 087, а РМ – 10 996. Таким образом, для части направлений ГМ и РМ дают отклонения разного знака относительно

фактических значений, что отражает значительные различия между гравитационным и радиационным механизмами формирования пространственной структуры потоков.

Значения различных метрик качества ГМ и РМ, сравнивающих фактические значения корреспонденций с модельными, приведены в таблице. Формально по значениям абсолютных метрик преимущество имеет ГМ: MAE составляет 496,5 против 555,9 у РМ, RMSE – 1047,6 против 1128,0. При этом по относительной метрике (MAPE) меньшая ошибка наблюдается у РМ: 0,876 против 1,027 у ГМ. Это означает, что при усреднении по всем направлениям ГМ точнее воспроизводит потоки в абсолютных значениях, тогда как РМ в среднем дает меньшую относительную ошибку. Значения коэффициентов корреляции (и, соответственно, коэффициентов детерминации) для обеих моделей практически совпадают.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты валидации на данных межмуниципальных поездок в пределах Екатеринбургской агломерации показывают, что РМ обеспечивает качество, сопоставимое с ГМ. Высокие значения коэффициента детерминации для обеих моделей ($R^2 = 0,978$ для ГМ и $R^2 = 0,974$ для РМ) свидетельствуют о том, что обе постановки достаточно точно воспроизводят наблюдаемую структуру корреспонденций и могут использоваться как инструменты количественного описания пространственного распределения поездок населения на муниципальном уровне.

С прикладной точки зрения важным выводом является то, что РМ можно применять для моделирования матриц корреспонденций вместо ГМ при сценарных расчетах загруженности транспортной инфраструктуры. Причем в отличие от гравитационного подхода, где требуется калибровка параметров функции тяготения, РМ является безпараметрической моделью и поэтому не требует сбора дополнительных эмпирических данных для калибровки, что является принципиальным преимуществом для прикладных задач.

При этом применение радиационной модели для агломерации крупного города связано с рядом условий. Ее использование представляется наиболее обоснованным для моноцентрической агломерации, где основная часть поездок осуществляется между ядром и городами-спутниками, а пространственная структура поездок в значительной степени определяется распределением мест приложения труда, услуг и иных возможностей в центре агломерации. В этих условиях радиационная модель может рассматриваться как полноценная альтернатива гравитационной модели, особенно в задачах предварительной оценки и сценарного анализа. Вместе с тем ее применение в каждом конкретном случае должно подтверждаться эмпирической валидацией, поскольку степень адекватности модели зависит от особенностей пространственной организации конкретной территории и характера ее транспортных связей.

Также необходимо отметить, что возможность использования РМ для моделирования матриц корреспонденций территориально-транспортных систем другого масштаба (внутригородской уровень, межмуниципальные связи региона, межрегиональные потоки в пределах страны) требует дальнейших исследований. Результаты, полученные для агломерации, не могут быть автоматически перенесены на другие системы, поскольку изменение масштаба сопровождается иной структурой расселения и центров притяжения, различиями в роли транспортной сети, неоднородностью качества сообщения, а также различиями в целях поездок и используемых видов транспорта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ortuzar J.D., Willumsen L.G. *Modelling transport*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2011. 606 p.
2. Трофименко Ю.В., Якимов М.Р. *Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов: монография. 2-е изд., перераб. и доп.* Пермь: Агентство РА-ДАР, 2022. 536 с.
3. Мартыненко А.В. Модификация гравитационной модели Андерсона и ван Винкоопа для анализа торговли между Россией и Беларусью // *AlterEconomics*. 2022. № 2(19). С. 326–350. <https://doi.org/10.31063/AlterEconomics/2022.19-2.7>
4. Cordera R., Sañudo R., dell'Olio L., Ibeas Á. Trip distribution model for regional railway services considering spatial effects between stations. *Transport Policy*. 2018. 67: 77–84.
5. Мартыненко А.В., Филиппова Е.Г. Моделирование пространственного распределения междугородных автомобильных поездок на основе данных сервисов карпулинга // *Транспорт Урала*. 2021. № 3(70). С. 33–38. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2021-3-33-38>
6. Мартыненко А.В., Сайфутдинов Д.Ж. Адекватность гравитационной модели для железнодорожных пассажиропотоков // *Мир транспорта*. 2023. № 1(104). С. 75–86. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-1-9>
7. Капский Д.В. Пример построения матрицы межрайонных корреспонденций // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2022. № 1(74). С. 5–16.
8. Фадеев А.И., Ильянков А.М. Управление транспортным предложением на регулярных междугородных автобусных линиях // *Вестник СибАДИ*. 2023. № 5(93). С. 632–648. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-632-648>
9. Zhao D., Mihăiță A.-S., Ou Y., Grzybowska H., Li M. Origin–destination matrix estimation for public transport: a multi-modal weighted graph approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2024. 165: 104694. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104694>
10. He B.Y., Chow J.Y.J. Gravity model of passenger and mobility fleet origin-destination patterns with partially observed service data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2021. 2675(6): 235–253.
11. Hussain E., Bhaskar A., Chung E. Transit OD matrix estimation using smartcard data: recent developments and future research challenges. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2021. 125: 103044. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103044>
12. Zhao Y., Cheng S., Gao S., Lu F. A gravity-inspired model integrating geospatial and socioeconomic distances for truck origin–destination flows prediction. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2025. 136: 104328. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104328>
13. Timofeeva G., le O. Evaluation of origin-destination matrices based on analysis of data on transport passenger flows. In: *Applications of Mathematics in Engineering and Economics (AMEE 2020): Proceedings of the 46th International Conference; 2020 June 07–13; Sofia*. Sofia: American Institute of Physics Inc., 2020. P. 100002. <https://doi.org/10.1063/5.0041801>

14. Simini F., González M.C., Maritan A., Barabási A.-L. A universal model for mobility and migration patterns. *Nature*. 2012. 484: 96–100. <https://doi.org/10.1038/nature10856>
 15. Yan X.-Y., Zhao C., Fan Y., Di Z., Wang W.-X. Universal predictability of mobility patterns in cities. *Journal of The Royal Society Interface*. 2014. 11: 20140834. <https://doi.org/10.1098/rsif.2014.0834>
 16. Beiró M.G., Panisson A., Tizzoni M., Cattuto C. Predicting human mobility through the assimilation of social media traces into mobility models. *EPJ Data Science*. 2016. 5: 30. <https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-016-0092-2>
 17. Piovani D., Arcaute E., Uchoa G., Wilson A., Batty M. Measuring accessibility using gravity and radiation models. *Royal Society Open Science*. 2018. 5: 171668. <https://doi.org/10.1098/rsos.171668>
 18. Дохов Р.А., Топников М.А., Волошок А.С. Методы моделирования связей в сетях городов: расстояние, гравитация, радиация (на примере США) // Известия РАН. Серия географическая. 2025. № 5 (89). С. 685–698. <https://doi.org/10.7868/S2658697525050017>
 19. Liu J., Xu L., Ma L., Wang C., Chen N. Modeling inter-city population flows: a Deep Radiation model with multisource geographic features. *International Journal of Digital Earth*. 2025. 18(1): 2506497. <https://doi.org/10.1080/17538947.2025.2506497>
- ## REFERENCES
1. Ortuzar J.D., Willumsen L.G. *Modelling Transport*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd; 2011. 606 p.
 2. Trofimenko Yu.V., Yakimov M.R. *Transport planning: Formation of efficient transport systems of large cities* (2nd ed., rev. and expanded). Perm: RADAR Agency; 2022. 536 p. (In Russ.)
 3. Martynenko A.V. [Modification of the Anderson–van Wincoop gravity model for the analysis of trade between Russia and Belarus]. *AlterEconomics*. 2022;2(19):326–350. (In Russ.) <https://doi.org/10.31063/AlterEconomics/2022.19-2.7>
 4. Cordera R., Sañudo R., dell’Olio L., Ibeas Á. Trip distribution model for regional railway services considering spatial effects between stations. *Transport Policy*. 2018;67:77–84. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.01.016>
 5. Martynenko A.V., Filippova E.G. [Modeling the spatial distribution of intercity automobile trips based on carpooling service data]. *Transport Urala*. 2021;3(70):33–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2021-3-33-38>
 6. Martynenko A.V., Saifutdinov D.Zh. [Adequacy of the gravity model for railway passenger flows]. *Mir transporta*. 2023;1(104):75–86. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-1-9> (In Russ.)
 7. Kapskiy D.V. [An example of constructing an interdistrict origin–destination matrix]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*. 2022;1(74):5–16. (In Russ.)
 8. Fadeev A.I., Il’yankov A.M. [Management of transport supply on regular intercity bus routes]. *Vestnik SibADI*. 2023;5(93):632–648. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-632-648>
 9. Zhao D., Mihăiță A.-S., Ou Y., Grzybowska H., Li M. Origin–destination matrix estimation for public transport: a multi-modal weighted graph approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2024;165:104694. (In Russ.) <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104694>
 10. He B.Y., Chow J.Y.J. Gravity model of passenger and mobility fleet origin–destination patterns with partially observed service data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2021;2675(6):235–253. <https://doi.org/10.1177/0361198121992074>
 11. Hussain E., Bhaskar A., Chung E. Transit OD matrix estimation using smartcard data: recent developments and future research challenges. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2021;125:103044. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103044>
 12. Zhao Y., Cheng S., Gao S., Lu F. A gravity-inspired model integrating geospatial and socioeconomic distances for truck origin–destination flows prediction. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2025;136:104328. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104328>
 13. Timofeeva G., Ie O. Evaluation of origin–destination matrices based on analysis of data on transport passenger flows. In: *Applications of Mathematics in Engineering and Economics (AMEE 2020): Proceedings of the 46th International Conference*; 2020 June 07–13; Sofia. Sofia: American Institute of Physics Inc.; 2020. P. 100002. <https://doi.org/10.1063/5.0041801>
 14. Simini F., González M.C., Maritan A., Barabási A.-L. A universal model for mobility and migration patterns. *Nature*. 2012;484:96–100. <https://doi.org/10.1038/nature10856>
 15. Yan X.-Y., Zhao C., Fan Y., Di Z., Wang W.-X. Universal predictability of mobility patterns in cities. *Journal of The Royal Society Interface*. 2014; 11: 20140834. <https://doi.org/10.1098/rsif.2014.0834>
 16. Beiró M.G., Panisson A., Tizzoni M., Cattuto C. Predicting human mobility through the assimilation of social media traces into mobility models. *EPJ Data Science*. 2016;5:30. <https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-016-0092-2>
 17. Piovani D., Arcaute E., Uchoa G., Wilson A., Batty M. Measuring accessibility using gravity and radiation models. *Royal Society Open Science*. 2018; 5:171668. <https://doi.org/10.1098/rsos.171668>
 18. Dokhov R.A., Topnikov M.A., Voloshok A.S. [Methods for modeling links in networks of cities: distance, gravity, radiation (a case study of the USA)]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. 2025;89(5):685–698. <https://doi.org/10.7868/S2658697525050017> (In Russ.)
 19. Liu J., Xu L., Ma L., Wang C., Chen N. Modeling inter-city population flows: a Deep Radiation model with multisource geographic features. *International Journal of Digital Earth*. 2025;18(1):2506497. <https://doi.org/10.1080/17538947.2025.2506497>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Мартыненко Александр Валериевич – канд. физ.-мат. наук, доц., доц. кафедры «Естественно-научные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения (620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4701-6398>,

Scopus ID: 16039651100,

Researcher ID: AAE-9576-2021,

Author ID: 779563,

SPIN-код: 8871-4804,

e-mail: amartynenko@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Martynenko Alexander V. – Cand. of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Natural Sciences, Ural State University of Railway Transport (66 Kolmogorova St., Yekaterinburg, 620034).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4701-6398>,

Scopus ID: 16039651100,

Researcher ID: AAE-9576-2021,

Author ID: 779563,

SPIN-code: 8871-4804,

e-mail: amartynenko@rambler.ru

Научная статья
УДК 656.1
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-496-510>
EDN: ZCIXCG



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИОРИТИЗАЦИИ ВНЕДРЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ИННОВАЦИЙ В ГОРОДСКУЮ СРЕДУ

Е.А. Бородулина¹, Л.С. Трофимова² ✉

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
г. Москва, Россия

²Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия

✉ ответственный автор
trofimova_ls@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена исследованию особенностей внедрения транспортных инноваций в городскую среду современных мегаполисов. Описаны особенности городского транспорта современного мегаполиса и обозначены требования к транспортному обслуживанию населения городов с учетом роста урбанизации, необходимости обеспечения устойчивого развития территорий. Сформулированы особенности и приведена типология транспортных инноваций. Представлены результаты исследования зарубежного опыта внедрения инноваций в городской транспорт крупных городов. Определены особенности государственной политики в сфере развития транспортной системы городов на примере Санкт-Петербурга. На основе изучения экспертных мнений и стратегических документов развития города отражены приоритеты и ключевые задачи развития системы городского транспорта мегаполиса. На основе изучения материалов практического использования транспортных инноваций в городской среде систематизированы по сегментам рынка характеристики ключевых участников и предложения рынка инноваций для объекта исследования. Выполнено исследование оценок и реакций жителей города на качество транспортного обслуживания в городской среде и потребности внедрения инноваций в транспортную систему города на основе имеющихся проблем. Выделены концепт-факторы как наиболее важные в оценке качества транспортного обслуживания и способов его совершенствования, а именно: развитие цифровых сервисов, инфраструктурных решений, интеллектуальных транспортных систем, их интеграции в цифровое пространство крупного города, подвижного состава общественного транспорта. На основе когнитивного моделирования выявлена сила прямого и косвенного взаимосвязанного воздействия факторов на управление качеством транспортного обслуживания мегаполиса.

Материалы и методы. Для формирования сводных материалов об использовании транспортных инноваций в городской среде с учетом ее особенностей использован метод систематизации данных. Выполнена идентификация приоритетов развития городского транспорта на основе метода обобщения. Идентификация проблемы транспортной системы Санкт-Петербурга, оценка реакций населения на качество транспортного обслуживания и описание перспективных инструментов и средств инновационной трансформации городского транспорта выполнены на основе анкетирования жителей города и опросов экспертов по транспорту городской среды мегаполиса. Используются инструменты когнитивного моделирования влияния факторов на качество транспортного обслуживания в городской среде.

Результаты и выводы. На основе систематизации документов стратегического развития системы городского транспорта Санкт-Петербурга выполнена приоритизация задач инновационной трансформации транспортной системы путем внедрения инноваций. Выявлены оценки и реакции жителей города на целесообразность внедрения транспортных инноваций в городской среде для решения текущих и перспективных проблем транспортной системы мегаполиса. Определены основные концепты-факторы, определяющие возможности улучшения качества транспортного обслуживания жителей мегаполиса на основе когнитивной карты процесса. Направление дальнейших исследований в рамках данного предмета связано с определением величины влияния условий (к примеру, реакции населения разного возраста и социального статуса) и параметров модели, набора факторов и вариантов инновационных решений на возможности улучшения качества транспортного обслуживания населения на основе теории нечетких множеств.

© Бородулина Е.А., Трофимова Л.С., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: городской транспорт, инновации, развитие, управление городской средой, когнитивная карта качества транспортного обслуживания

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

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы благодарят редакционную коллегию и редакционный совет научного рецензируемого журнала «Вестник СибАДИ», анонимных рецензентов статьи.

Статья поступила в редакцию 03.05.2026; одобрена после рецензирования 05.06.2026; принята к публикации 15.06.2026.

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: Бородулина Е.А., Трофимова Л.С. Исследование приоритизации внедрения транспортных инноваций в городскую среду // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 3. С. 496-510. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-496-510>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-496-510>

EDN: ZCIXCG

PRIORITIZATION OF TRANSPORT INNOVATIONS INTEGRATION IN URBAN ENVIRONMENT

Elizaveta A. Borodulina¹, Liudmila S. Trofimova² ✉

¹National Research University Higher School of Economics,
Moscow, Russia

²Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia

✉ corresponding author
trofimova_ls@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The article is devoted to the study of the peculiarities of introducing transport innovations into the urban environment of modern megacities. The features of urban transport in a modern megalopolis are described and the requirements for urban passenger transport services are outlined, taking into account the growth of urbanization and the need to ensure sustainable development of territories. The features and the typology of transport innovations are given. The results of investigating foreign experience on introducing innovations in urban transport in large cities are presented. The features of the state policy in the field of urban transport system development are determined based on the case of St. Petersburg. Through the study of expert opinions and strategic documents of the city's development, the priorities and key tasks of the development of the megalopolis urban transport system are reflected. Based on the study of materials on the practical use of transport innovations in the urban environment, the characteristics of key participants and innovation market proposals for the research object are systematized by market segments. A study was conducted on evaluations and reactions of city residents regarding the quality of transport services in the urban environment and the need to introduce innovations into the city's transport system in light of current problems. The article highlights the concept factors that are most important in assessing the quality of transport services and ways to improve them, namely, the development of digital services, infrastructure solutions, intelligent transport systems, and their integration into the digital space of a large city, as well as the rolling stock of public transport. Based on cognitive modeling, the impact of direct and indirect interrelated effects of factors on the quality management of transport services in a megalopolis has been revealed.

Materials and methods. The data systematization method was applied to aggregate materials on the use of transport innovations in the urban environment, taking into account its features. The priorities of urban transport development were identified based on the generalization method. The identification of the problem of the St. Pe-

© Borodulina Elizaveta A., Trofimova Liudmila S., 2026



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

tersburg transport system, the assessment of the population's reactions to the quality of transport services and the description of promising tools and means of innovative transformation of urban transport were provided through urban resident questionnaires and expert surveys. The tools of cognitive modeling of the factor-to-quality relationships for transport services in the urban environment were used.

Results and conclusions. Based on the systematization of documents for the strategic development of the urban transport system in St. Petersburg, the tasks of innovative transformation of the transport system through the introduction of innovations have been prioritized. The opinion and reactions of city residents as to the expediency of introducing transport innovations in the urban environment to solve current and future problems of the megalopolis transport system have been revealed. The main concepts-factors determining the possibilities of improving the quality of transport services for residents of a megalopolis based on a cognitive process map have been identified. The further research is related to quantifying the impact of conditions (for example, the reaction of the population of different ages and social status) and the parameters of the model, a set of factors and options for innovative solutions on the possibilities of improving the quality of public transport services based on the theory of fuzzy sets.

KEYWORDS: urban transport, innovation, development, urban environment management, cognitive map of transport service quality

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

The article was submitted: May 03, 2026; **approved after reviewing:** June 05, 2026; **accepted for publication:** June 15, 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: Borodulina E.A., Trofimova L.S., Prioritization of transport innovations integration in urban environment. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (3): 496-510. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-496-510>

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В статье отражена приоритизация задач трансформации транспортной системы путем внедрения инноваций. Исследования связаны с изучением современного состояния городской транспортной системы Санкт-Петербурга, документов ее стратегического планирования и управления. Выявлена оценка жителями города состояния транспортной системы мегаполиса, а также целесообразности внедрения транспортных инноваций в городскую среду для решения текущих и перспективных проблем. Выполненные исследования позволят в дальнейшем описать влияние транспортных инноваций по выделенным в исследовании сегментам городской транспортной системы на качество жизни населения мегаполиса.

Практическая реализация – выявленные приоритеты, перспективные виды транспортных инноваций в описанных сегментах городской транспортной системе могут быть положены в основу разработки когнитивных моделей управления качеством жизни населения мегаполиса.

Направление дальнейших исследований для практической реализации результатов исследований – разработка модели влияния транспортных инноваций на развитие транс-

портной системы крупного города, а также на качество жизни населения, и определение параметров модели на основе инструментов когнитивного моделирования.

ВВЕДЕНИЕ

Для крупных мегаполисов, в которых транспортная система испытывает повышенную нагрузку, проблемы улучшения качества обслуживания населения, роста транспортной доступности приобретают особую актуальность. Санкт-Петербург, являющийся вторым по численности населения городом РФ, сталкивается с необходимостью одновременного решения вопросов модернизации инфраструктуры, повышения качества транспортных услуг, снижения негативного воздействия экологии и обеспечения устойчивого развития городской среды. Инновационные решения становятся цельным инструментом достижения стратегических целей социально-экономического развития города.

Согласно подходу, который был закреплён в Руководстве Осло в 2018 г., инновация определяется как внедрение нового или существенно улучшенного продукта, процесса, метода организации или маркетинга. Определение подчеркивает, что инновации охватывают не только технологические изменения,

но также организационные и управленческие трансформации.

Особое место в управлении городской средой принадлежит продвижению и внедрению транспортных инноваций, представляющих собой процесс взаимодействия государства, бизнеса и общества.

Сегодня инновации в транспортной среде выходят за рамки точечных технологических улучшений и составляют комплексные изменения, затрагивая и принципы организации перевозок, и цифровые сервисы, и экологические стандарты, и модели взаимодействия государства, бизнеса и общества.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В современных условиях развития городской среды транспортная система выступает одним из ключевых элементов, определяющих уровень социально-экономического развития территорий, качество жизни населения и устойчивость городской среды. Растущая урбанизация представляет собой серьезную многофакторную глобальную проблему, требующую развития системы управления различными сферами, в том числе транспортной [1].

В научной литературе транспортные инновации рассматриваются как комплексное явление, включающее в себя технологические, организационные и управленческие преобразования. Так, Г.В. Савин [2] рассматривает развитие транспортных систем в контексте цифровизации и формирования интеллектуальных транспортно-логистических систем, направленных на повышение эффективности управления потоковыми процессами и качества городской среды. В свою очередь, авторы [3] отмечают, что транспортные инновации охватывают не только внедрение новых технологий, но и трансформацию бизнес-моделей, сервисов и механизмов управления, ориентированных на повышение эффективности транспортной системы и снижение её экологического воздействия. Инновации в транспортной сфере не могут рассматриваться исключительно как технологические изменения, поскольку их эффективность во многом определяется институциональной средой, особенностями государственной политики, а также поведением пользователей транспортных услуг [4]. С точки зрения государственного управления особое значение имеет то, что транспортные инновации выступают инструментом достижения стратегических целей развития городской среды, повышения качества жизни

населения [5]. В частности, они способствуют повышению транспортной доступности, снижению экологической нагрузки, а также формированию устойчивых моделей мобильности [6]. Внедрение транспортных инноваций, элементов ИИ способствует развитию транспортной системы региона, оптимизации деятельности транспортных предприятий и взаимодействия грузоотправителей и получателей грузов в логистике [7, 8, 9, 10, 11].

Государственная политика в сфере развития транспортной системы Санкт-Петербурга реализуется на основе программных и стратегических документов, ключевым из которых является государственная программа «Развитие транспортной системы Санкт-Петербурга», утвержденная постановлением Правительства Санкт-Петербурга от 30 июня 2014 года № 552. В рамках этой программы предусмотрена комплексная модернизация транспортной системы, включающая развитие инфраструктуры, повышение качества транспортных услуг и внедрение современных технологий. Существующие приоритеты отражают как технологические, так и организационные аспекты трансформации городской мобильности и реализуются через конкретные управленческие и инфраструктурные решения. Их характеристики, ключевые направления и нормативная основа описаны в таблице 1.

Рассмотренные в таблице 1 направления во многом формируются в рамках общей федеральной повестки, которая в последние годы получила развитие в новых национальных транспортных проектах.

Анализ материалов Комитета по транспорту Санкт-Петербурга показывает, что в числе приоритетных направлений развития выделяются цифровая трансформация транспортной отрасли, повышение безопасности, экологизация транспортной системы, развитие общественного транспорта и регулирование новых форм мобильности. Одним из ключевых направлений является внедрение ИТС. В Санкт-Петербурге реализуются проекты, направленные на развитие автоматизированных систем управления дорожным движением, внедрение интеллектуальных светофорных объектов, а также использование систем мониторинга и анализа транспортных потоков. Данные решения применяются на ключевых транспортных магистралях и в центральных районах города, обеспечивая оптимизацию движения, снижение перегруженности улично-дорожной сети и повышение безопасности дорожного движения.

Таблица 1

Приоритеты развития системы городского транспорта Санкт-Петербурга
Источник: составлено авторами.

Table 1

Priorities for the urban transport system development in St. Petersburg
Source: compiled by the authors.

Приоритет	Содержание направления	Реализация в Санкт-Петербурге	Нормативная база
Цифровизация транспортной системы	Внедрение ИТС, систем мониторинга, управления трафиком	Интеллектуальные светофоры, системы управления дорожным движением, анализ транспортных потоков	Госпрограмма СПб № 552
Развитие общественного транспорта	Обновление подвижного состава, повышение качества услуг, развитие маршрутной сети	Закупка новых автобусов, электробусов, модернизация маршрутов	Госпрограмма СПб № 552, нацпроект «Эффективная транспортная система»
Экологизация транспорта	Снижение выбросов, переход на электрический транспорт	Внедрение электробусов, обновление экологичного транспорта	Стратегия СПб до 2035 г.
Мультимодальность	Интеграция видов транспорта, развитие пересадок	Развитие ТПУ, цифровые сервисы планирования маршрутов	Госпрограмма СПб № 552
Регулирование новых форм мобильности	Управление кикшерингом, каршерингом, СИМ	Введение правил использования СИМ, ограничение зон, регулирование операторов	Региональные акты СПб, решения Комитета по транспорту
Комплексное развитие городской среды	Интеграция транспорта, жилья и инфраструктуры	Развитие агломераций, транспортная доступность	Нацпроект «Инфраструктура для жизни»

Экологизация общественного транспорта является на данный момент одним из наиболее актуальных вопросов и реализуется через внедрение электрического подвижного состава.

Как отмечают исследователи [12, 13, 14, 15], транспортные инновации генерируют эффекты у участников транспортного процесса, создают прирост стоимости в разных отраслях экономики, обеспечивают устойчивость развития транспортной отрасли.

Для комплексной характеристики трендов развития транспорта в городской среде Санкт-Петербурга проведен также анализ предложений участников рынка, включая промышленные предприятия, технологические компании и операторов транспортных сервисов, формирующих рынок предложения и предлагающих инновационные решения, которые внедряются в городскую транспортную систему. На основе этих материалов выполнена систематизация ключевых участников рынка транспортных инноваций и реализуемых ими технологических решений в Санкт-Петербурге, которая представлена в таблице 2.

Помимо уже реализуемых решений, рынок транспортных инноваций Санкт-Петербурга

формируется также за счет проектов, находящихся на стадии планирования или пилотного внедрения. В последние годы в СМИ и экспертных оценках активно обсуждаются перспективы развития беспилотного транспорта, интеллектуальных систем управления движением и новых инфраструктурных решений. Российские технологические компании, например, такие как НПО «СтарЛайн» или SberAutoTech (в н.в. Navio) рассматривают возможность вывода беспилотных транспортных средств на дороги общего пользования, проводятся их испытания на отдельных участках дорожной сети. В 2022 г. компания SberAutoTech, входящая в экосистему Сбера, провела серию пилотных испытаний беспилотных автомобилей в период проведения Петербургского международного экономического форума. Тестирование носило открытый характер и было направлено на получение обратной связи от пользователей, протяженность маршрута составляла около 4,5 км, а длительность поездки порядка 10–12 мин. Технологически система автономного управления включала использование сенсоров, навигационных систем и алгоритмов обработки данных, обеспечивающих движение транспортного средства в городских условиях.

Таблица 2

Характеристика ключевых участников и предложений рынка инноваций для транспорта городской среды Санкт-Петербурга в выделенных сегментах
Источник: составлено авторами.

Table 2

Characteristics of key participants and innovative market solutions for urban transport in St. Petersburg, for the identified segments
Source: compiled by the authors.

Сегмент рынка	Компания / участник	Технологическое решение	Реализация в Санкт-Петербурге	Эффект / результат
Общественный транспорт (ОТ)	- МАЗ - АО «Транс-Альфа»	- Электробусы МАЗ 303Е23 (с ночной зарядкой) - Электробусы «Сириус»	- Поставки электробусов (2024–2026) - Пилотная эксплуатация	- Снижение выбросов - Экологизация транспорта - Формирование конкурентной среды
Цифровые сервисы (ЦС) и каршеринг (К)	- Яндекс (Яндекс Go, Яндекс.Карты, Яндекс.Драйв) - Делимобиль, Ситидрайв	- Навигационные сервисы, прогноз маршрутов - Каршеринг	- Массовое использование - 50 авто (2018) → 7000+ (2024)	- Повышение удобства передвижения - Рост доступности транспорта
Микромобильность (М)	- Whoosh - Urent - Яндекс Go	- Кикшеринг (электросамокаты) -AI- алгоритмы, контроль поездок	- Массовая эксплуатация - Изъято 5500 самокатов в 2024 г.	- Решение «первой и последней мили» - До 85% поездок транспортные - Наличие институциональных ограничений
Интеллектуальные транспортные системы (ИТС)	- Комитет по транспорту СПб - ДОДД	- АСУДД, умные светофоры, мониторинг потоков	- Подключение +54 светофоров в 2026 г.	- Оптимизация трафика - Снижение заторов
Интеграция ИТС и цифровых сервисов (Исс)	- Комитет по транспорту СПб + Яндекс	- Передача сигналов светофоров в навигаторы	- Запуск в 2026 г.	- Повышение информированности - Повышение безопасности движения
Социальные транспортные инновации (СТИ)	- «Говорящий город»	- Радиоинформирование и навигация для МГН	- 1800 ТС, 900 автобусов, 4000 светофоров	- Повышение доступности среды
Инфраструктурные решения (ИР)	- ООО «Магистраль Северной столицы»	- ЗСД (ГЧП)	- Санкт-Петербург	- Перераспределение транспортных потоков

Сегодня компания Navio активно внедряет сервисную модель автономной мобильности, основанную на принципах «по запросу», или on-demand, что предусматривает использование беспилотных транспортных средств, которые прибывают к пользователю и осуществляют перевозку по заданному маршруту. С 2023 г. беспилотные грузовые транспортные средства используются на магистрали М-11 «Москва – Санкт-Петербург» для выполнения коммерческих перевозок грузов по модели «хаб-хаб», включая обслуживание ритейлеров и логистических компаний. Аналогичные разработки ведутся и другими российскими технологическими участниками рынка. Так, НПО «СтарЛайн», базирующееся в Санкт-Петербурге, занимается разработкой беспилотных

транспортных средств и проводит их испытания, включая проекты по автономным грузоперевозкам, ориентированные на использование магистральной дорожной сети, в том числе трассы М-11.

Значимую роль в формировании предложения инновационных решений играют предприятия транспортного машиностроения. Компания «ПК Транспортные системы» реализует проекты по разработке подвижного состава, адаптированного к условиям городской среды Санкт-Петербурга. Так, скоростной трамвай «Невский» увеличенной пассажиреместимостью ориентирован на использование в крупных агломерациях с высоким пассажиропотоком, разработан с учетом особенностей городской инфраструктуры и требований к

современному общественному транспорту. Важным элементом также является система активной помощи водителю, основанная на технологиях ИИ, которая анализирует дорожную ситуацию, контролирует скорость движения, прогнозирует потенциальные риски и при необходимости осуществляет автоматическое торможение. Тестируется система мониторинга внимания водителя.

В целом анализ приоритетов развития транспортной системы Санкт-Петербурга показывает, что государственная политика в этой сфере носит комплексный характер и направлена на внедрение инновационных решений, охватывающих цифровизацию, экологизацию, развитие общественного транспорта и интеграцию различных видов мобильности. При этом данные направления получают не только нормативное, но и финансовое обеспечение, что свидетельствует о системном характере проводимой транспортной политики.

Таким образом, возникает необходимость анализа возможностей и преимуществ инновационной трансформации городского транспорта для повышения качества жизни населения города как элемента стратегического управления транспортом городской среды. Особое внимание следует уделить мнению жителей [16].

Анализ реакций жителей Санкт-Петербурга на внедрение инноваций для улучшения транспортного обслуживания проводится на основе их анкетирования. Объем генеральной совокупности определится исходя из численности жителей города в возрасте от 15 лет, зарегистрированных на территории города, включая трудоспособное население города, пенсионеров, а также учащихся школ, студентов, осуществляющих самостоятельные поездки на общественном транспорте. По данным Петростата, население в возрасте 15–64 лет составляет примерно 65,5–67,2% от общего числа жителей. Таким образом, при официальных данных о численности населения Санкт-Петербурга в 2025 г. в объеме 5,65 млн чел., объем генеральной совокупности составит $5,65 \cdot 0,66 = 3,73$ млн чел. Для расчета выборки используем формулу расчета на основе следующих показателей: уровень доверия, ожидаемая пропорция, допустимая

погрешность. При следующих заданных параметрах – допустимая погрешность 10% (величина, на которую результат выборки может отличаться от реального значения генеральной совокупности); доверительная вероятность 95% (вероятность того, что результаты выборки попадают в заданные границы ошибки), с использованием онлайн-калькулятора¹ определена необходимая численность выборки в объеме 97 чел. Онлайн-анкетирование проводилось в 2023, 2025 и 2026 годах при помощи яндекс-форм, рассылки на адреса вузов Санкт-Петербурга, а также в виде живого общения с жителями города, в т.ч. на основе открытых вопросов. Общий объем выборки составил 193 чел.

Оценку влияния внедренных с 2023 по 2026 г. транспортных инноваций на качество транспортного обслуживания целесообразно выполнять при помощи метода когнитивного моделирования, детально описанного в т.ч. и для транспортной отрасли авторами [17, 18, 19, 20]. Для когнитивного моделирования наиболее часто применяется следующая трактовка – оно рассматривается как способ анализа силы и направленности влияния факторов на трансформацию объекта управления (городского пассажирского транспорта) в целевое состояние (высокий уровень качественного обслуживания населения мегаполиса) с учетом сходства и различия влияний разных факторов на объект управления [18]. Когнитивное моделирование позволяет понять проблему на основе качественного анализа исследуемой системы путем идентификации узких мест и противоречий, возникающих в ней [21].

Разработка когнитивной модели исследования проводилась следующим образом. Сначала выполнялась оценка взаимосвязей факторов, влияющих на качество транспортного обслуживания, выделялись наиболее существенные связи. Затем уточнялось влияние факторов на целевой параметр (концепт) путем оценки их прямого воздействия, а также косвенного, которое происходит путем влияния на другие факторы в системе². Построенная предварительная когнитивная модель на основе результатов анкетирования впоследствии уточнялась на основе экспертных мнений.

¹ Калькулятор размера выборки для исследований и тестов [Электронный ресурс]. URL: <https://productlab.ru/calculator/sample-size-calculate> (дата обращения: 20.04.2026).

² Этапы когнитивного анализа [Электронный ресурс]. URL: https://studbooks.net/2039785/informatika/etapy_kognitivnogo_analiza (дата обращения: 20.04.2026).

В исследовании использован список факторов, которые были выделены жителями Санкт-Петербурга на основании анкетирования и опросов, представленных далее. Для описания списка факторов в ходе анкетирования использовался в числе прочих открытый вопрос. Данные респондентами ответы и анализ качественных данных ответов были систематизированы, идентифицировано 8 укрупненных значимых групп факторов (групп сегментов рынка транспортных инноваций, приведенных в таблице 2), влияющих на качество транспортного обслуживания населения крупного города. Оценки уровня значимости исследуемых факторов осуществлялись по частоте встречаемости выделенных групп факторов в ответах респондентов. Перечень групп факторов может служить базой построения когнитивной модели совершенствования качества транспортного обслуживания в городской среде.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Так, на основе анализа нормативных и стратегических документов развития городской среды Санкт-Петербурга, систематизации пу-

бликаций и материалов Комитета по транспорту Санкт-Петербурга, исследований зарубежного опыта внедрения инноваций, выявлено, что к приоритетным направлениям транспортной политики Санкт-Петербурга сегодня относятся: цифровизация, комплексное развитие территорий, мультимодальность и интеграции видов транспорта, развитие общественного транспорта, экологизация. Несмотря на фокус, взятый Правительством Санкт-Петербурга, на развитие городской транспортной системы в рамках региональных программ, национальных проектов и стратегических региональных и отраслевых документов, остается ряд вопросов, связанных с определением наиболее перспективных и значимых направлений внедрения новых решений, и с оценкой восприятия инноваций как населением, так и государством.

Поэтому в исследовании выполнено анкетирование жителей Санкт-Петербургской агломерации, которое выявило следующие реакции населения по вопросам развития городской транспортной системы, основные результаты обработки анкет приведены на рисунках 1, 2, 3.

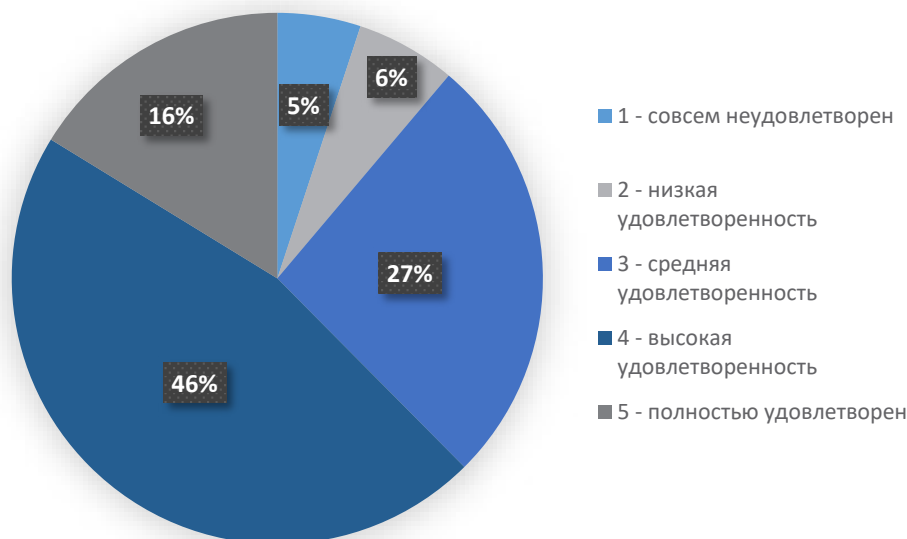


Рисунок 1 – Результаты анкетирования жителей Санкт-Петербурга в апреле 2026 г.: оценка удовлетворенности качеством общественного транспорта Санкт-Петербурга
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Results of St. Petersburg residents survey in April 2026: assessment of satisfaction with the quality of St. Petersburg public transportation
Source: compiled by the authors.

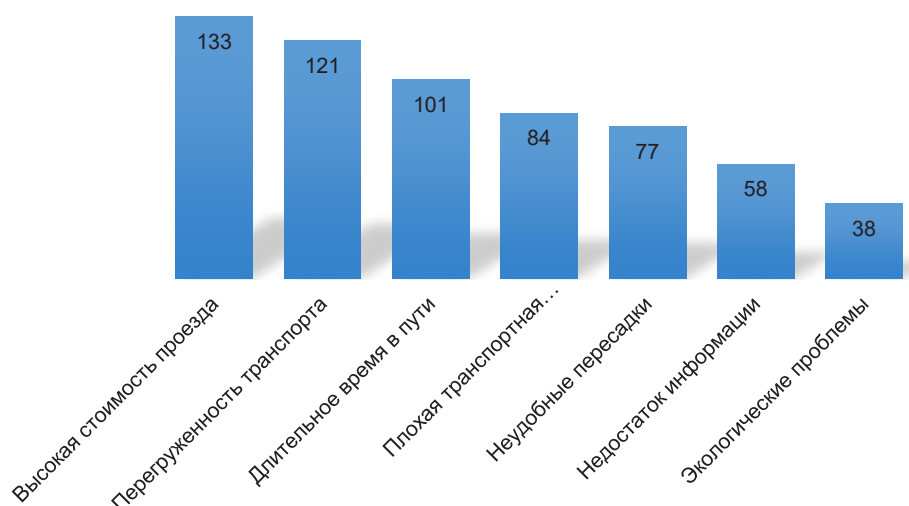


Рисунок 2 – Результаты анкетирования жителей Санкт-Петербурга в апреле 2026 г.: выявление проблем городского общественного транспорта
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Results of St. Petersburg resident survey in April 2026: identification of urban public transportation problems
Source: compiled by the authors.



Рисунок 3 – Результаты анкетирования жителей Санкт-Петербурга в апреле 2026 г.: определение приоритетного направления развития городского общественного транспорта
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Results of St. Petersburg residents survey in April 2026: identification of priority areas for urban public transportation development
Source: compiled by the authors.

Систематизация реакций жителей Санкт-Петербурга позволила определить основные проблемы транспортной системы города, а именно: перегруженность магистралей, большие интервалы движения, в ряде случаев невысокая транспортная доступность новых районов города, проблемы первой/последней мили, запрос на строительство новых станций метрополитена, внедрение цифровых сервисов, при этом ограниченный спрос на беспилотные решения на транспорте.

Аналогичные ответы в интервью с экспертами в сфере городского транспорта Санкт-Петербурга выявили следующие оценки: «транспорт не успевает за застройкой», нет системной интеграции, «нужна единая платформа», необходимо ввести пересадочные тарифы, следует расширять сеть станций метрополитена. Среди барьеров отмечается высокий уровень бюрократии, выраженной в длительных согласованиях решений по внедрению инноваций, а также правовые ограничения.

Ряд проблем транспортной системы города Санкт-Петербурга могут быть решены при помощи анализа наиболее оптимальных решений, внедряемых в общественный городской транспорт на основе инноваций.

Проведенное анкетирование жителей ядра агломерации в период 2023–2026 гг.^{3,4} позволило сделать вывод о необходимости совершенствования транспортной системы в первую очередь с акцентом на ее единство, взаимосвязь видов транспорта, возможности их гармоничного дополнения. Очевидна необходимость создания связности всех частей города и обеспечения транспортной доступности в отдаленных районах. Так, около 80% респондентов в 2026 г. отметили высокий, 4 и 5 баллов по 5-балльной шкале, уровень удов-

летворенности транспортным оборудованием, 58,4% – актуальность использования инновационных технологий на транспорте города (умных приложений, онлайн-каршеринга, инфосистем и пр.), 63,6% опрошенных отметили высокую степень значимости новых схем организации движения, которые способны сократить время проезда в пределах агломерации, при этом отмечая среднюю (40,2%) и в целом высокую (34,1%) степень удовлетворенности имеющимися схемами движения и пересадок, при этом высокий уровень неудовлетворенности отмечался в 12,8% ответов. Качество и доступность транспортного обслуживания в ядре агломерации респонденты оценили как среднее (40,9%) и достаточно высокое (35,6%), а в отдаленных районах как среднее 47,7%, выше среднего 21,2%, при этом также наблюдались низкие оценки в 18,2% анкет, что свидетельствует о высокой дифференциации качества транспортных услуг в отдаленных районах мегаполиса. К наиболее важным характеристикам транспортного обслуживания и возможностям, которые могут привести в жизнь жителей агломерации транспортные инновации, респонденты отнесли сокращение времени на проезд (77,3%), сокращение стоимости проезда (58,3%), использование бесконтактных способов оплаты проезда (58,3%), повышение информированности с помощью электронных и онлайн-табло (39,4%), использование электронных способов бронирования билетов (46,2%), а также построение оптимальных маршрутов онлайн (56%).

Кроме того, наличие открытых вопросов, связанных с улучшением качества транспортного обслуживания жителей мегаполиса, позволило определить уровень значимости указанных в таблице 2 групп факторов (таблица 3).

³ Бородулина Е.А., Зайцева И.В. Цифровые транспортные решения и инновации для городских агломераций // От синергии знаний к синергии бизнеса: сборник статей и тезисов докладов XI Международной научно-практической конференции студентов, магистрантов и преподавателей, Омск, 29 марта 2024 года. Омск: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский центр КАН», 2024. С. 195–198. EDN BOLOHG.

⁴ Бородулина Е.А., Зайцева И.В. Исследование потребности внедрения транспортных инноваций в городской среде Санкт-Петербурга // Современные проблемы менеджмента: XVIII Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 10 апреля 2024 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», 2024. С. 402–406. EDN WKBLMU.

Таблица 3

Частота упоминания факторов в ответах респондентов (взаимные корреляции факторов) в ходе анкетирования жителей города
Источник: составлено авторами.

Table 3

Frequency of factors mentioned in respondents' answers (mutual influencing factors) in questionnaires
Source: compiled by the authors.

Группы факторов	ОТ	ЦС	К	М	Итс	Исс	СТИ	ИР
Общественный транспорт (ОТ)	0,000	0,125	0,000	0,000	0,000	0,125	0,125	0,000
Цифровые сервисы (ЦС)	0,125	0,000	0,125	0,125	0,125	0,000	0,000	0,125
Каршеринг (К)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,125	0,000	0,125
Микромобильность (М)	0,125	0,125	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Интеллектуальные транспортные системы (Итс)	0,000	0,125	0,000	0,125	0,000	0,000	0,000	0,000
Интеграция ИТС и цифровых сервисов (Исс)	0,125	0,125	0,000	0,000	0,000	0,125	0,000	0,125
Социальные транспортные инновации (СТИ)	0,125	0,000	0,000	0,000	0,125	0,125	0,000	0,125
Инфраструктурные решения (ИР)	0,125	0,000	0,000	0,000	0,125	0,125	0,000	0,000

Построение когнитивной модели предполагает расчет частот влияний каждого фактора на прочие факторы, что используется в дальнейшем для построения когнитивной модели. Для оценки наиболее сильных влияний факторов на качество транспортного обслуживания в городе выбрано пороговое значение методом, в который заложено правило золотого сечения, оно составило 0,333. Таким образом, суммарные оценки уровней значимости позволяют выделить основные значимые группы: ОТ (0,375), ЦС (0,5), Исс (0,375), СТИ (0,375), ИР (0,375).

При построении когнитивной модели по материалам, полученным в ходе опросов экспер-

тов, к целевому концепту отнесем повышение качества транспортного обслуживания (КТО) в городской среде Санкт-Петербурга. Установим связи между факторами-концептами ОТ, ЦС, К, М, СТИ, Исс, Итс, ИР между собой и с целевым значением, которые могут быть усиливающего либо ослабляющего характера. Взаимовлияния факторов оценим по шкале количественных значений от -1 до $+1$. Влияние факторов с учетом оценок и упоминания их в ответах респондентов (экспертов) показаны на рисунке 4, который отражает причинно-следственную структуру с учетом интенсивности взаимовлияний их выделенных групп.

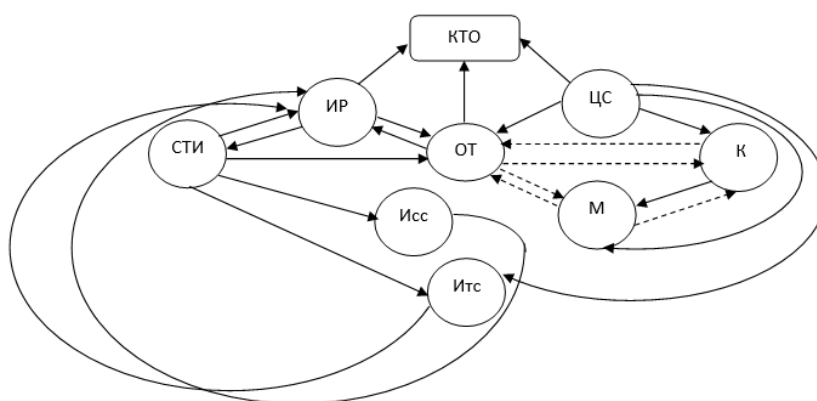


Рисунок 4 – Когнитивная карта проблемы повышения качества транспортного обслуживания населения Санкт-Петербурга
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Cognitive Map of the problem of improving transport service quality in St. Petersburg
Source: compiled by the authors.

Таблица 4

Наложение матрицы взаимного влияния концептов (прямые влияния концептов указаны в скобках) и транзитивно-замкнутой матрицы ответов экспертов (Е+, Е-)
Источник: составлено авторами.

Table 4

Concept cross-impact matrix (direct impacts indicated in parentheses) overlaid with transitively closed expert response matrix (E+, E-)
Source: compiled by the authors.

Группы факторов	ОТ	ЦС	К	М	Итс	Исс	СТИ	ИР	КТО
ОТ	0 0	0 0	0,02 -0,4 (-0,4)	0 -0,4 (-0,4)	0,003 0	0,003 0	0,03 0	(0,2) 0,2 0	(0,6) 0,6 0
ЦС	(0,3) 0,3 0	0 0	(0,5) 0,5 0	(0,5) 0,5 0	(0,5) 0,5 0	0 0	0 0	0 0	(0,5) 0,5 0
К	0 -0,4 (-0,4)	0 0	0 0	(0,1) 0,16 0	0,00002 0	0,00002 0	0 -0,00002	0 -0,08	0,105 -0,04
М	0,02 -0,05 (-0,05)	0 0	0,02 -0,05 (-0,05)	0 0	0 -0,0002	0 -0,0002	0 -0,0015	0,004 -0,01	0,12 -0,03
Итс	0,04 0	0 0	0,001 -0,02	0 -0,02	0 0	0,0375 0	0,0375 0	(0,25) 0,25 0	0,125 0
Исс	0,04 0	0 0	0,0008 -0,016	0 -0,002	0,003 0	0,003 0	0 0	(0,2) 0,2 0	0,1 0
СТИ	(0,05) 0,05 0	0 0	0,001 -0,02	0 -0,02	(0,1) 0,1 0	(0,1) 0,1 0	0,1 0	(0,1) 0,1 0	0,01 0
ИР	(0,2) 0,2 0	0 0	0,004 -0,08	0 -0,08	0,015 0	0,015 0	(0,15) 0,15 0	0 0	(0,5) 0,5 0
КТО	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0

В когнитивной карте (см. рисунок 4, таблицу 4, значения в скобках) приводятся наиболее значимые прямые связи между концептами, напрямую указанные экспертами. Однако комплексный анализ причинно-следственных связей должен включать информацию и о косвенных влияниях концептов (факторов) друг на друга, что достигается построением матрицы транзитивного замыкания. Поэтому на матрицу прямых связей наложена транзитивно-замкнутая матрица значений, позволяющая оценить ускорение (+) или (-) замедление развития целевого концепта («качество транспортного обслуживания») при влиянии всех указанных факторов, в т.ч. и косвенном не прямом, проявляющемся через другие факторы.

Согласно методу когнитивного моделирования, для каждой пары концептов (групп факторов) определены консонанс и диссонанс.

Для концептов ОТ/М, ОТ/Итс, ОТ/Исс, ОТ/СТИ и прочих, где имеются либо только (+), либо только (-), значения соответствующий консонанс равен 1. Промежуточные расчеты консонансов и диссонансов свидетельствуют о значимости влияний всех групп факторов на целевой концепт КТО, т.е. внедрение изменений в каждый концепт приводит к изменению КТО диссонансов и также свидетельствует о значимости влияний всех групп факторов на целевой концепт КТО. Кроме того, определено взаимовлияние концептов на основе функции $\text{sgn}(x)$. Расчет системных показателей влияния концептов на целевой показатель КТО выполнен по формуле средней арифметической соответствующих промежуточных показателей, результаты расчетов сведены в таблицу 5.

Таблица 5
Системные показатели когнитивной карты
Источник: составлено авторами.

Table 5
System indicators of the cognitive map
Source: compiled by the authors.

Группы факторов	Консонанс влияния концепта на систему (С)	Диссонанс влияния концепта на систему (Д)	Расчет совокупного влияния концепта на систему (В)
ОТ	0,703	0,297	0,004
ЦС	0,556	0,444	0,256
К	0,717	0,283	-0,024
М	0,543	0,457	0,001
Итс	0,767	0,233	0,050
Исс	0,609	0,391	0,036
СТИ	0,767	0,233	0,047
ИР	0,767	0,233	0,080
КТО	0,000	1,000	0,000

Анализ когнитивной карты свидетельствует о том, что концепт ЦС (0,256) оказывает наибольшее положительное влияние на КТО, небольшое положительное ускорение развитию объекта придают такие группы факторов, как Итс (0,050) и СТИ (0,047) и Исс (0,036). Концепт К оказывает небольшое отрицательное влияние. Расчеты взаимовлияния концептов также свидетельствует о том, что наибольшее положительное влияние на целевой концепт КТО оказывают концепты ОТ (0,6), ЦС (0,5), ИР (0,5), что выявлено изначально при оценке прямых влияний. Однако показатели косвенных влияний выявили также значимые факторы Итс (0,125), М (0,12), К (0,105), Исс (0,1), влияние которых в ряде случаев носит отрицательный характер (как в случае фактора К). Также следует иметь в виду, что со временем происходит изменение значений уровня значимости исследуемых факторов. Таким образом, исследуемая когнитивная модель системы управления качеством транспортного обслуживания в Санкт-Петербурге содержит наиболее важные управляющие факторы, дает понимание, какие факторы усиливать в первую очередь для достижения наибольшего эффекта, и, соответственно, сокращать влияние каких факторов следует для минимизации отрицательных влияний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом анализ приоритетов развития транспортной системы Санкт-Петербурга показывает, что государственная политика в этой сфере носит комплексный характер и направлена на внедрение инновационных решений, охватывающих цифровизацию, экологизацию, развитие общественного транспорта и инте-

грацию различных видов мобильности. Систематизация реакций жителей Санкт-Петербурга позволила определить основные проблемы транспортной системы города, а именно: перегруженность магистралей, большие интервалы движения, в ряде случаев невысокая транспортная доступность новых районов города, проблемы первой/последней мили, запрос на строительство новых станций метрополитена, внедрение цифровых сервисов, при этом ограниченный спрос на беспилотные решения на транспорте. Рассмотренная когнитивная карта качества транспортного обслуживания жителей мегаполиса также свидетельствует о системном и в целом сбалансированном характере проводимой транспортной политики. Также возникает необходимость анализа возможностей и преимуществ инновационной трансформации городского транспорта для повышения качества транспортного обслуживания населения города как элемента стратегического управления городской средой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Васильева М.Е., Волкова Е.М., Романов А.С. Интеллектуальные транспортные системы в Российских агломерациях: сущность, структура и направления развития // Инновационные транспортные системы и технологии. 2023. Т. 9, № 4. С. 117–128. <https://doi.org/10.17816/transsyst202394117-128>
2. Савин Г.В. Умная транспортно-логистическая система города: теория, методология и практика // Управление. 2021. Т. 12, № 6. С. 67–86. <https://doi.org/10.29141/2218-5003-2021-12-6-5>
3. Мавлютова И., Атстая Д., Грасис Я. [и др.]. Концепция городского транспорта и устойчивая мобильность в умных городах: обзор // Energies. 2023. Т. 16, № 8. Ст. 3585.
4. Винклер Л.О.И., Пирс Д., Нельсон Дж., Бабаджан О. Влияние политики устойчивой мобильно-

сти на совокупные выбросы и энергопотребление городского транспорта // *Nature Communications*. 2023. Т. 14. Ст. 2357. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37728-x>

5. Дружинин П.В., Морошкина М.В., Седова К.Е. Влияние агломераций на развитие окружающих территорий: Новосибирская, Московская и Санкт-Петербургская агломерации // *Пространственная экономика*. 2025. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-aglomeratsiy-na-razvitie-okruzhayuschih-territoriy-novosibirskaya-moskovskaya-i-sankt-peterburgskaya-aglomeratsii> (дата обращения: 08.04.2026).

6. Абдрахманова Д.Р., Саубанов К.Р., Юрков Д.Р. Оценка цифровой конкурентоспособности региона // *Экономические науки*. 2025. № 12. С. 367–378.

7. Приходько Е.С. Роль искусственного интеллекта в логистике // *Транспортное дело России*. 2026. № 2. С. 35–39.

8. Солодкий А.И., Евтюков С.С., Селезнева Н.В. Интеллектуальные транспортные системы – основа цифровой трансформации автомобильно-дорожного комплекса // *Транспортное дело России*. 2026. № 2. С. 68–72.

9. Архипов А.Е., Ляшенко С.В. Технологические аспекты реализации инновационной парадигмы организации при мультимодальных перевозках // *Транспортное дело России*. 2026. № 2. С. 88–73.

10. Мустакаева Е.А. Цифровая трансформация водного транспорта: от перехода бизнеса к виртуально-физическим системам // *Транспортное дело России*. 2026. № 2. С. 95–98.

11. Пивоварова О.В., Макаров И.Н. Инновационные подходы к транспортному развитию городов: мировая практика и отечественные перспективы // *Экономика, предпринимательство и право*. 2026. Т. 16, № 4. <https://doi.org/10.18334/epp.16.4.125933>. EDN EJKJTC.

12. Аземша С.А. Мультимаршрутный метод организации работы транспортных средств // *Вестник СибАДИ*. 2025. Т. 22, № 1. С. 38–53. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-38-53>

13. Кеян Е.Г., Мельников А.Н., Тамошина О.А. Формирование параметра эффективности использования электромобилей // *Вестник СибАДИ*. 2025. Т. 22, № 1. С. 78–89. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-78-89>

14. Тишкова А.О., Якунин Н.Н., Якунина Н.В. Методика оценки уровня организации городских пассажирских автомобильных перевозок с учётом устойчивости // *Вестник СибАДИ*. 2026. Т. 23, № 1. С. 62–75. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-62-75>

15. Капский Д.В., Ляпин С.А., Богданович С.В. Влияние беспилотных транспортных средств и смежных технологий на социоприродоэкономическую среду города // *Мир транспорта и технологических машин*. 2024. № 3-1(86). С. 101–107. [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-3-1\(86\)-101-107](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-3-1(86)-101-107)

16. Трофимова Л.С., Гаврилин Д.В., Кабжамитова А.С. Организация регулярных перевозок пассажиров с учетом обращений граждан и диспет-

черского контроля // *Вестник СибАДИ*. 2024. Т. 21, № 4(98). С. 580–593. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-580-593>

17. Исмиханов З.Н., Гаджиев Ш.Д., Яхьяева А.А. Когнитивное моделирование социально-экономической системы региона // *Современные наукоемкие технологии*. 2016. № 2-2. С. 225–228.

18. Волков В.Ю., Волкова В.В. Инструментальные средства когнитивного моделирования в системах поддержки принятия решений // *Вестник Международной академии системных исследований. Информатика, экология, экономика*. 2016. Т. 18, № 1. С. 104–108.

19. Voronina E.V., Yarosh O.B., Zakieva N.I., Voronina E.V. et al., “Mathematical Model of Forecasting the Residential Real Estate Market Prices Level”, *Materials Science Forum*, Vol. 931, pp. 1101–1106, 2018 *Materials Science Forum (Volume 931)* <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.1101>

20. Knight CR.J.K., Lloyd D.J.B., Penn A.S. Linear and Sigmoidal Fuzzy Cognitive Maps: An Analysis of Fixed Points. 2014. 15:193-202 <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2013.10.030>

21. Цветков В.Я., Соловьев И.В. Принципы когнитивного управления сложной организационно-технической системой // *Государственный советник*. 2016. № 1 (13). С. 27–32.

REFERENCES

1. Vasilyeva M.E., Volkova E.M., Romanov A.S. Intelligent Transport Systems in Russian Agglomerations: Essence, Structure, and Directions of Development. *Innovative Transport Systems and Technologies*. 2023. Vol. 9. No. 4. P. 117–128. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/transsyst202394117-128>

2. Savin G.V. Smart transport and logistics system of the city: theory, methodology and practice. *Upravlenets*. 2021. Vol. 12. No. 6. Pp. 67–86. (In Russ.) <https://doi.org/10.29141/2218-5003-2021-12-6-5>

3. Mavlyutova I., Atstaya D., Grasis J. et al. The concept of urban transport and sustainable mobility in smart cities: an overview. *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 8. Article 3585. (In Russ.)

4. Winkler L.O.Y., Pierce D., Nelson J., and Bajaj, O. “The Impact of Sustainable Mobility Policy on Urban Transport Emissions and Energy Consumption” (2023). *Nature Communications* (vol. 14, no. 2357). (In Russ.) <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37728-x>

5. Druzhinin P.V., Moroshkina M.V., Sedova K.E. The Impact of Agglomerations on the Development of Surrounding Territories: Novosibirsk, Moscow, and St. Petersburg Agglomerations. *Spatial Economy*. 2025; No. 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-aglomeratsiy-na-razvitie-okruzhayuschih-territoriy-novosibirskaya-moskovskaya-i-sankt-peterburgskaya-aglomeratsii> (date of access: 04/08/2026). (In Russ.)

6. Abdrakhmanova D.R., Saubanov K.R., Yurkov D.R., Assessment of the digital competitiveness of the region. *Economic Sciences*. 2025; (12): 367-378. (In Russ.)

7. Prikhodko E.S. The role of artificial intelligence in logistics. *Transport business of Russia*. 2026; (2):35-39. (In Russ.)

8. Solodky A.I., Yevtyukov S.S., Selezneva N.V. Intelligent transport systems – the basis of the digital transformation of the automobile and road complex. *Transport business of Russia*. 2026; (2): 68-72. (In Russ.)

9. Arkhipov A.E., Lyashenko S.V. Technological aspects of the implementation of the innovative paradigm of organization in multimodal transportation. *Transport business of Russia*. 2026; 2(88-73). (In Russ.)

10. Mustakaeva E.A. Digital transformation of water transport: from business transition to virtual-physical systems. *Transport business of Russia*. 2026; (2): 95-98. (In Russ.)

11. Pivovarova O.V., Makarov I.N. Innovative approaches to urban transport development: world practice and domestic prospects. *Economics, Entrepreneurship and Law*. 2026; Vol. 16(4). (In Russ.) <https://doi.org/10.18334/epp.16.4.125933>. EDN EJKJTC.

12. Azemsha S.A. The multi-route method of organizing the work of vehicles. *Bulletin of SibADI*, 2025; T 22(1): 38-53. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-38-53>

13. Keyan E.G., Melnikov A.N., Tamoshina O.A. Formation of an electric vehicle efficiency parameter // *SibADI Bulletin*, 2025; 22(1):78-89. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-38-53>

14. Tishkova A.O., Yakunin N.N., Yakunina N.V. Methodology for assessing the level of organization of urban passenger automobile transportation, taking into account sustainability. *SibADI Bulletin*, 2026; vol. 23(1): 62-75. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-62-75>

15. Kapskij D.V., Lyapin S.A., Bogdanovich S.V. Vliyanie bespilotny'x transportny'x sredstv i smezhny'x tekhnologij na socioprirodnoe'konomicheskuyu sredu goroda. *Mir transporta i tekhnologicheskix mashin*. 2024. № 3-1(86): 101-107. (In Russ.) [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-3-1\(86\)-101-107](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-3-1(86)-101-107)

16. Trofimova L.S., Gavrilin D.V., Kabzhamitova A.S. Organizatsiya regul'yarny'x perevozok passazhirov s uchetoм obrashchenij grazhdan i dispetcherskogo kontrolya. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*. 2024; T. 21, № 4(98):580-593. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-580-593>

17. Ismikhonov Z.N., Gadzhiev Sh.D., Yahyayeva A.A. Cognitive modeling of the socio-economic system of the region. *Modern high-tech technologies*. 2016; No. 2-2:225-228. (In Russ.)

18. Volkov V.Yu., Volkova V.V. Instrumental means of cognitive modeling in decision support systems. *Bulletin of the International Academy of Systems Research. Computer science, ecology, economics*. 2016; Vol. 18(1):104-108. (In Russ.)

19. Voronina E.V., Yarosh O.B., Zakieva N.I. Voronina E.V. et al., "Mathematical Model of Forecasting the Residential Real Estate Market Prices Level", Materials Science Forum, 2018; Vol. 931, pp.

1101-1106, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.1101>

20. Knight CR.J.K., Lloyd D.J.B., Penn A.S. Linear and Sigmoidal Fuzzy Cognitive Maps: An Analysis of Fixed Points. 2014; 15: 193-202 <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2013.10.030>

21. Tsvetkov V.Ya., Solov'yov I.V. Principles of cognitive management of a complex organizational and technical system. *State Councilor*. 2016; 1 (13): 27-32. (In Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Бородулина Е.А. Выполнение анкетирования, обработка результатов, применение материалов и методов в управлении качеством транспортно-го обслуживания Санкт-Петербурга (70%).

Трофимова Л.С. Формулировка актуальности, материалов и методов исследования, обзор научных источников (30%).

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Borodulina E.A. Conducting the survey, data processing, and analysis, writing the manuscript.

Trofimova L.S. Determining the research relevance, selecting materials and research methods, state-of-the-art analysis.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бородулина Елизавета Александровна – бакалавр программы «Государственное и муниципальное управление» Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8149-2405>,

e-mail: elizavetka-borodulina@mail.ru

Трофимова Людмила Семеновна – д-р техн. наук, доц., заведующая кафедрой «Организация перевозок и безопасность движения» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7312-1557>,

SPIN-код: 6711-9953,

e-mail: trofimova_ls@mail.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Borodulina Elizaveta A. – Bachelor's degree student, National Research University Higher School of Economics (d. 20, Street Miasnickaia, Moskva, 101000).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8149-2405>,

e-mail: elizavetka-borodulina@mail.ru

Trofimova Liudmila S. – Dr. of Sci., Head of the Department of Transportation Organization and Traffic Safety, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5 Prospekt Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7312-1557>,

SPIN-code: 6711-9953,

e-mail: trofimova_ls@mail.ru

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Научная статья
УДК 691.3
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-512-521>
EDN: BAUBAA



КЛАДОЧНЫЕ РАСТВОРЫ ИЗ БОЯ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА: ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ ЗАКОНА СРОДСТВА СТРУКТУР

В.С. Лесовик¹, В.А. Дудченко¹ ✉, А.А. Клементьева²

¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия

²ООО «Полипласт»,
г. Москва, Россия

✉ ответственный автор
dudchenko.v.a@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Важной задачей является эффективное использование промышленных отходов, в частности керамического кирпичного боя (ККБ), в производстве строительных материалов, что позволяет одновременно решать экологические проблемы и повышать экономическую эффективность технологических процессов. ККБ, ежегодно образующийся в объемах 15–20 млн т в России, обладает перспективными физико-механическими свойствами, позволяющими применять его в качестве вторичного сырья для создания высококачественных кладочных растворов. Особенно это актуально при разработке технологий восстановления разрушенных зданий и сооружений в ЛНД, ДНР и новых регионах России. Особую актуальность приобретает разработка таких растворов в рамках закона сродства структур, предложенного в Белгородском технологическом университете, поскольку использование материалов с близким составом и структурой обеспечивает повышенную адгезию, долговечность и эксплуатационные характеристики каменных конструкций на основе ККБ.

Цель написания статьи. Целью исследования является разработка и обоснование применения кладочных растворов с использованием тонкодисперсного наполнителя из керамического кирпичного боя, обеспечивающих повышенные эксплуатационные свойства при возведении стеновых конструкций. Для этого были решены задачи по изучению влияния наполнителей на физико-механические и адгезионные свойства растворов, анализу кинетики их твердения, оценке деформационных характеристик и исследованию микроструктуры контактной зоны с различными стеновыми материалами.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования выполнялись в лабораториях кафедры строительного материаловедения изделий и конструкций, а анализ научной литературы – в научно-технической библиотеке Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. Работы проводились с применением стандартных методов испытаний, а также в соответствии с инструкциями по эксплуатации используемых приборов и оборудования.

Обсуждение и заключение. Исследование подтвердило, что использование тонкомолотого керамического кирпича в качестве наполнителя в кладочных растворах значительно повышает их адгезию за счёт структурной совместимости с керамическими стеновыми материалами, что соответствует закону сродства структур.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бой керамического кирпича, закон сродства структур, кладочные растворы, адгезия, вторичные материалы

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. В.С. Лесовик – член редакционной коллегии журнала «Вестник СиБАДИ». Журнал «Вестник СиБАДИ» не освобождает от рецензирования рукописи ученых вне зависимости от их статуса.

БЛАГОДАРНОСТИ: исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 25-19-00866) с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

© Лесовик В.С., Дудченко В.А., Клементьева А.А., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Статья поступила в редакцию 14.08.2025; одобрена после рецензирования 06.11.2025; принята к публикации 15.06.2026.

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: Лесовик В.С., Дудченко В.А., Клементьева А.А. Кладочные растворы из боя керамического кирпича: повышение эффективности на основе закона сродства структур // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 3. С. 512-521. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-512-521>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-512-521>

EDN: BAUBAA

MASONRY MORTARS MADE FROM CRUSHED CERAMIC BRICK WASTE: ENHANCING EFFICIENCY BASED ON THE LAW OF STRUCTURAL AFFINITY

Valery S. Lesovik¹, Valeria A. Dudchenko¹ ✉, Anna A. Klementyeva^{1, 2}

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
Belgorod, Russia,

²Polyplast LLC

г. Москва, Россия

✉ corresponding author
dudchenko.v.a@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. An important task is the effective utilization of industrial waste, particularly crushed ceramic brick (CCB), in the production of construction materials, which allows to solve environmental problems and to improve the economic efficiency of technological processes simultaneously. Crushed ceramic brick is a waste left annually in volumes of 15–20 million tons in Russia, it possesses promising physical and mechanical properties that enables its use as secondary raw material for producing high-quality masonry mortars. This is particularly relevant in developing technologies for the restoration of damaged buildings and structures in Luhansk, Donetsk and other regions of Russia. The development of such mortars is especially relevant within the framework of the “law of structural affinity” proposed by Belgorod Technological University, since using materials with similar composition and structure ensures enhanced adhesion, long service life, and improved operational performance characteristics of masonry structures based on crushed ceramic brick.

Purpose of the study. The aim of the research is to develop and substantiate the application of masonry mortars with the use of fine-dispersed filler derived from crushed ceramic brick, ensuring improved operational properties in the construction of wall structures. To achieve this goal, the tasks of studying the filler influence on the physical-mechanical and adhesive properties of mortars, analyzing their hardening kinetics, evaluating deformation characteristics, and investigating the microstructure of the contact zone with various wall materials, have been performed.

Materials and methods. Experimental studies have been conducted in the laboratories of the Department of Construction Material Science of Products and Structures, and the analysis of the research literature has been carried out at the scientific and technical library of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. The work has been executed with the use of standard testing methods, as well as in accordance with operating instructions for the employed instruments and equipment.

Conclusion. The study confirmed that the application of finely ground ceramic brick as a filler in masonry mortars significantly enhances their adhesion due to structural compatibility with ceramic wall materials, in accordance with the law of structural affinity.

KEYWORDS: crushed ceramic brick waste, law of structural affinity, masonry mortars, adhesion, secondary materials

© Lesovik Valeriy S., Dudchenko Valeriya A., Klementyeva Anna A., 2026



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

CONFLICT OF INTEREST: *the authors declare no conflict of interest. V.S. Lesovik is a member of the editorial board of The Russian Automobile and Highway Industry Journal. The Russian Automobile and Highway Industry Journal requires reviewing all the manuscripts, regardless of their authors status.*

ACKNOWLEDGEMENT: *the study was supported by the grant from The Russian Science Foundation (project No 25-19-00866). The authors express their gratitude to the Center of High Technologies of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov for providing research facilities.*

The article was submitted: August 14, 2025; approved after reviewing: November 06, 2025; accepted for publication: June 15, 2026

All the authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Lesovik V.S., Dudchenko V.A., Klementyeva A.A. Masonry mortars made from crushed ceramic brick waste: enhancing efficiency based on the law of structural affinity. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2026; 23 (3): 512-521. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-512-521>

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях развития строительной отрасли особое внимание уделяется рациональному использованию ресурсов и утилизации промышленных отходов. Одним из перспективных направлений является применение вторичных материалов в производстве строительных смесей, что позволяет не только решить экологические проблемы, но и повысить экономические показатели производственных процессов. В данном контексте особый интерес представляет использование керамического кирпичного боя (ККБ) – отхода, образующегося при производстве и транспортировке керамического кирпича, а также при демонтаже зданий.

Ежегодно в Российской Федерации образуется около 15–20 млн т отходов строительного кирпича, в том числе за счёт разрушенных зданий и сооружений ЛНР, ДНР и новых территорий, которые в большинстве случаев направляются на полигоны твердых бытовых отходов, создавая значительную нагрузку на окружающую среду. В то же время керамический кирпичный бой обладает уникальными свойствами, которые могут быть использованы для создания новых строительных материалов с улучшенными характеристиками [1, 2, 3].

Кладочные растворы, применяемые для возведения стен, представляют собой важнейший компонент каменных конструкций, определяющий их прочность, долговечность и эксплуатационные характеристики. Традиционные цементно-песчаные растворы, несмотря на широкое применение, имеют ряд недостатков, включая низкую адгезию к пористым основаниям, значительные усадочные деформации и недостаточную водоудерживающую способность. Эти проблемы особенно акту-

альны при работе с пористыми стеновыми материалами, такими как блоки на основе керамического кирпичного боя и керамзитобетона.

В последние годы специалистами Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова был сформулирован закон сродства структур, согласно которому материалы с близкими структурными характеристиками демонстрируют улучшенные показатели совместной работы. Этот закон открывает новые возможности для создания эффективных композиционных материалов, в том числе кладочных растворов для возведения стен из блоков на основе керамического кирпичного боя [4, 5].

Целью настоящего исследования является разработка и научное обоснование кладочных растворов с использованием тонкодисперсного наполнителя из керамического кирпичного боя, направленных на повышение эксплуатационных характеристик стеновых конструкций. Для достижения этой цели были проведены комплексные исследования, включающие оценку физико-механических и адгезионных свойств растворов, анализ кинетики их твердения, изучение деформационных характеристик и микроструктуры контактной зоны с различными стеновыми материалами.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности использования вторичных материалов в строительстве, снижения негативного воздействия на окружающую среду и улучшения качества возводимых конструкций. Актуальность работы заключается в применении закона сродства структур для создания композиционных вяжущих с тонкодисперсным наполнителем из керамического кирпичного боя, обеспечивающих оптимальные характеристики кладочных растворов для возведения стен из аналогичных материалов.

Кладочные растворы традиционно представляют собой смесь вяжущего вещества, заполнителя и воды, предназначенную для соединения штучных стеновых материалов в единую конструкцию. Согласно ГОСТ 28013–98, кладочные растворы должны обладать определенными свойствами: достаточной подвижностью, водоудерживающей способностью, прочностью и адгезией к стеновым материалам. Основными компонентами традиционных кладочных растворов являются портландцемент, известковое тесто и песок. Такие составы, несмотря на их широкое применение, имеют ряд существенных недостатков, выявленных в результате многочисленных исследований [6, 7, 8, 9].

В последние годы в материаловедении активно внедряется закон сродства структур. Согласно этому закону, материалы с близкими структурными характеристиками демонстрируют улучшенные показатели совместной работы за счет формирования переходной зоны с идентичной структурой [8, 9, 10].

Структурное сродство материалов определяется совокупностью факторов: минеральным составом, дисперсностью, пористостью, поверхностной энергией и другими характеристиками.

На основе анализа литературных данных и существующих исследований была сформулирована гипотеза о том, что использование композиционного вяжущего с тонкодисперсным наполнителем из керамического кирпичного боя в кладочных растворах для возведения стен позволит повысить их активность за счёт реализации закона сродства структур [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20]. Данная гипотеза обоснована близостью минерального состава компонентов, способностью наполнителя удерживать влагу и обеспечивать благоприятные условия для гидратации, формированием монолитной переходной зоны с высокой адгезией, а также снижением деформационных несоответствий между раствором и стеновым материалом, что в совокупности должно предотвращать образование трещин и повышать долговечность конструкций. Для подтверждения выдвинутой гипотезы были проведены комплексные экспериментальные исследования, представленные в последующих разделах работы.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Методологической основой исследования послужили закон сродства структур, согласно которому максимальная прочность соедине-

ния достигается при структурной совместимости контактирующих материалов.

В качестве исходных компонентов для разработки композиционных вяжущих использованы портландцемент ЦЕМ I 42,5, кварцевый песок и вторичные минеральные добавки – отходы строительных материалов: бой керамического и силикатного кирпича, газосиликата, керамзитобетона и тяжёлого бетона, суперпластификатор Полипласт ПК. На их основе разработаны композиционные вяжущие, содержащие 35% цемента и 65% минеральной добавки. Помол минеральной добавки осуществляли в лабораторной роторно-шаровой мельнице до удельной поверхности 1000 м²/кг. Такой подход обеспечивает эффективное взаимодействие компонентов, повышение реакционной способности добавок и формирование высококачественной цементной матрицы. Использование вторичных материалов не только снижает расход цемента, но и способствует улучшению экологических и экономических показателей строительных растворов при одновременном сохранении или повышении их эксплуатационных свойств.

Исследования включали определение физико-механических свойств вяжущих (нормальная густота, сроки схватывания, удельная поверхность, активность), а также свойств растворов: подвижность (по глубине погружения конуса), водоудерживающая способность, средняя плотность, марочная прочность, фактическая прочность при твердении на подложке, адгезия к различным стеновым материалам.

Разработанная нестандартная методика определения адгезионной прочности кладочного раствора к стеновым материалам позволяет более адекватно оценить поведение соединения в условиях, приближённых к реальным эксплуатационным. Использование фрагментов натуральных стеновых материалов с сохранением их естественной поверхности и соблюдение нормативной толщины растворного шва (8–12 мм) обеспечивают достоверное моделирование структурного взаимодействия в кладке. Схема соединения «крест-накрест» и последующее испытание на отрыв позволяют точно определить максимальное усилие, необходимое для разрушения адгезионного контакта, что даёт объективную оценку прочности сцепления. Предложенная методика является эффективным инструментом для исследования и оптимизации составов кладочных растворов с учётом их совместимости с конкретными видами стеновых материалов.

Таблица 1
Основные характеристики композиционных вяжущих
Источник: составлено авторами.

Table 1
Basic characteristics of composite binders
Source: compiled by the authors.

Состав		Прочность раствора, МПа			
Вяжущее (35%)	Вид минеральной добавки (65 %)	Марочная прочность	Фактическая при твердении на подложке		
			кер. кирп.	сил. кирп.	цем. бетон
ЦЕМ I 42,5	Бой газосиликата (Ц-ГС)	15,2	11,6	5,6	9,1
	Силикатный кирпич (Ц-СК)	13,4	11,9	6,6	8,4
	Керамический кирпич (Ц-КК)	19,1	12,9	6,5	7,9
	Керамзитобетон (Ц-КБ)	19,7	15,3	5,5	8,8
	Тяжелый бетон (Ц-ТБ)	13,8	9,5	5,7	7,4
	Кварцевый песок (Ц-КП)	11,8	12,2	5,6	7,2

Для приложения и измерения отрывающего усилия применялся прибор ОНИКС-ОС, предназначенный для определения прочности бетона методом вырывания анкера. В связи с нестандартными геометрическими параметрами испытуемых образцов для данного прибора была разработана и изготовлена специальная металлическая испытательная рама, а также приспособление для фиксации образцов, допускающее регулировку длины подвеса. Конструкция захватного устройства включает шарнирные соединения, обеспечивающие центрирование нагрузки и минимизирующее влияние возможной непараллельности опорных граней образцов на равномерность распределения напряжений в зоне контакта.

Адгезионная прочность рассчитывалась как отношение максимального усилия отрыва к фактической площади контакта между кладочным раствором и поверхностью стенового материала, определяемой по отпечатку раствора на поверхности образца. За окончательное значение адгезии принималось среднее арифметическое результатов испытаний трёх парных образцов, обеспечивая статистическую достоверность полученных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты исследований показали, что оптимальное соотношение компонентов в составе композиционного вяжущего составляет 35% портландцементного клинкера и 65% минеральной добавки, подвергнутой предварительному измельчению до удельной поверхности 1000 м²/кг. Высокая эффективность раздельного помола, проведённого в лабора-

торной роторно-шаровой мельнице, обеспечила оптимальную гомогенизацию компонентов и достижение активности вяжущего до 35,6 МПа даже при существенной доле вторичных материалов в составе.

Особое внимание уделено оценке прочности растворов в условиях, приближённых к реальным эксплуатационным, что более точно отражает их поведение в кладке. Наиболее высокие показатели прочности как абсолютные, так и относительные (по отношению к активности вяжущего) продемонстрировали составы с минеральными добавками на основе строительных отходов – бой керамзитобетона, керамического кирпича и газосиликата. Это подтверждает перспективность использования вторичных ресурсов для создания эффективных, экологически безопасных и экономически целесообразных кладочных растворов, соответствующих современным требованиям устойчивого строительства.

Наибольшую марочную прочность показали составы Ц-КК и Ц-КБ, приготовленные на основе композиционных вяжущих с использованием дроблёного керамического боя (таблица 1). Особо высокие результаты продемонстрировал раствор Ц-КБ, в состав вяжущего которого входит измельчённый керамзитобетон. В этом случае реализуются все ключевые факторы повышения прочности: растворная часть керамзитобетона изначально содержит остатки непрореагировавшего клинкерного цементного камня, которые становятся доступными для гидратации при тонком помоле, что способствует дополнительному упрочнению структуры.

Ключевым фактором, определяющим прочность кладочных растворов в реальных условиях эксплуатации, является степень структурного и физико-химического соответствия между раствором и материалом подложки. Экспериментальные данные подтверждают действие закона структурного сродства: наилучшее сцепление и максимальная прочность достигаются при использовании минеральных добавок в растворе, идентичных по происхождению и составу материалу основания. Так, на керамической подложке лучшие результаты показали растворы с добавками керамзитобетона и керамического кирпича (составы Ц-КК и Ц-КБ), а на силикатной подложке – состав с добавкой, соответствующей силикатному кирпичу (Ц-СК). Таким образом, принцип структурного соответствия является универсальным и должен учитываться при проектировании составов кладочных растворов для обеспечения их высокой адгезии и долговечности.

Особую значимость представляет тот факт, что предел прочности при сжатии и адгезии растворов на разработанных композиционных вяжущих, твердеющих в условиях структурного сродства, превышает аналогичные показатели традиционных цементно-известково-песчаных растворов в 1,5–4,5 раза. Это свидетельствует не только о высокой эффективности использования вторичных минеральных добавок, но и о принципиальной важности учёта физико-химической совместимости между раствором и стеновым материалом при проектировании долговечных и надёжных кладочных систем.

Установлено, что наиболее высокие значения прочности наблюдаются при совпадении минерального состава минеральной добавки вяжущего и материала подложки, что подтверждает проявление закона структурного сродства.

Так, раствор на основе композиционного вяжущего с добавкой боя керамического кирпича (состав Ц-КК) продемонстрировал максимальную прочность при твердении на керамической подложке – 12,9 МПа, что на 9,5% выше, чем у состава Ц-ГС, и на 7,0% выше, чем у Ц-СК. Ещё более высокий результат показал состав Ц-КБ (с добавкой боя керамзитобетона), достигнув прочности 15,3 МПа на керамическом кирпиче. Это может быть обусловлено благоприятной поровой структурой и адгезионными свойствами керамзитобетон-

ной добавки, способствующей эффективному сцеплению с пористым керамическим основанием.

На подложке из силикатного кирпича наибольшую прочность обеспечил состав Ц-СК – 6,6 МПа, что на 1,0–2,4 МПа превышает аналогичные показатели других составов на той же подложке. Данное явление также объясняется совместимостью: гидратационные продукты цементного камня лучше взаимодействуют с силикатным основанием при наличии аналогичной кремнезёмистой составляющей в добавке.

Состав Ц-ТБ (с добавкой боя тяжёлого бетона) показал умеренные значения прочности на всех подложках, достигнув 7,4 МПа на бетоне, 9,5 МПа на керамике и 5,7 МПа на силикате, что свидетельствует о нейтральной, но не оптимальной совместимости с различными типами оснований.

Состав Ц-КП (с кварцевым песком в качестве добавки) характеризуется наименьшими значениями прочности на всех подложках: 12,2 МПа (керамика), 5,6 МПа (силикат), 7,2 МПа (бетон), что указывает на недостаточную реакционную способность инертного наполнителя и отсутствие эффекта структурного сродства.

Особо высокие показатели прочности состава Ц-КК на керамическом кирпиче (12,9 МПа) при соотношении В/Т = 0,48 и высокой вододерживающей способности (1,8 кг/м³) подчёркивают перспективность использования вторичных керамических материалов в качестве активных минеральных добавок в кладочных растворах.

Адгезия кладочного раствора к основанию является одной из ключевых характеристик, определяющих качество и долговечность кладки. Для оценки этого параметра проведено исследование влияния различных составов кладочного раствора на адгезию к трем типам кладочных материалов: керамическому кирпичу, силикатному кирпичу и цементному бетону. Результаты исследования представлены в таблице 2.

Таким образом, кладочные растворы на основе композиционных вяжущих, разработанных с учётом сродства компонентов, характеризуются минимальными значениями усадочных деформаций в ранние сроки твердения (до 7 сут) и обеспечивают максимальный прирост прочности (см. таблицу 2).

Таблица 2

Влияние состава кладочного раствора на величину адгезии к различным кладочным материалам
Источник: составлено авторами.

Table 2

The effect of the composition of the masonry mortar on the adhesion force to various masonry materials
Source: compiled by the authors.

Состав (вяжущее)	Нормальная адгезия. Состав к основанию, МПа		
	Керамический кирпич	Силикатный кирпич	Цементный бетон
Состав 1 (Ц-ГС)	0,57	0,59	0,40
Состав 2 (Ц-СК)	0,51	0,49	0,44
Состав 3 (Ц-КК)	0,63	0,37	0,49
Состав 4 (Ц-КБ)	0,79	0,35	0,52
Состав 5 (Ц-ТБ)	0,53	0,32	0,61
Состав 6 (Ц-КП)	0,34	0,31	0,80

Таблица 3

Прочность образцов кладки при различных направлениях приложения нагрузки
Источник: составлено авторами.

Table 3

The strength of the masonry samples under different directions of the load application
Source: compiled by the authors.

Стеновой материал	Состав кладочного раствора	Прочность, МПа, при приложении нагрузки по отношению к горизонтальным швам	
		поперёк	вдоль
Керамический кирпич	Керамический (Ц-КК)	13,9	11,0
Силикатный кирпич	Газосиликат (Ц-ГС)	12,9	9,9

При рассмотрении адгезии к керамическому кирпичу наибольшее значение зафиксировано для состава 4 (Ц-КБ) и составило 0,79 МПа, что является максимальным показателем среди всех испытанных вариантов. Наименьшая адгезия наблюдалась у состава 6 (Ц-КП) – всего 0,34 МПа. Таким образом, диапазон значений адгезии к керамическому кирпичу составляет от 0,34 до 0,79 МПа, что указывает на значительное влияние состава раствора на сцепление с данным материалом.

Что касается силикатного кирпича, то здесь также наиболее высокие показатели демонстрирует состав 4 (Ц-КБ), однако его адгезия заметно ниже – 0,35 МПа. Минимальная адгезия зафиксирована у состава 6 (Ц-КП) и составила 0,31 МПа. Средние значения по группе варьируются в пределах от 0,31 до 0,59 МПа, при этом наибольшее значение достигнуто у состава 1 (Ц-ГС). Относительно низкие показатели для большинства составов свидетельствуют о менее благоприятном сцеплении с силикатным кирпичом по сравнению с другими материалами.

Наиболее высокие значения адгезии наблюдаются при взаимодействии с цементным бетоном. Максимальное сцепление обеспе-

чивает состав 6 (Ц-КП) – 0,80 МПа, что является одним из самых высоких значений во всем исследовании. Минимальный показатель зафиксирован у состава 1 (Ц-ГС) и составляет 0,40 МПа. Диапазон адгезии к цементному бетону – от 0,40 до 0,80 МПа, что говорит о высокой эффективности некоторых составов при работе с бетонными поверхностями. Таким образом, можно сделать вывод, что разные составы кладочных растворов проявляют неодинаковую эффективность в зависимости от типа основания. Состав 4 (Ц-КБ) показал наилучшие результаты при работе с керамическим и силикатным кирпичом, тогда как состав 6 (Ц-КП) продемонстрировал высокую адгезию к цементному бетону, хотя и оказался наименее эффективным для кирпичных материалов. Это подчеркивает важность подбора раствора с учётом конкретного вида кладочного материала для обеспечения надёжного и долговечного соединения.

Использование композиционных вяжущих, схожих по составу со стеновыми материалами, снижает анизотропию кирпичной кладки на 30–45% и повышает прочность при сдвиге в 2,4–2,7 раза, особенно эффективно для силикатного кирпича (таблица 3). Это связано

с улучшением адгезии раствора к материалу, что повышает надёжность кладки при сейсмических нагрузках.

Хорошее сцепление кладочного раствора со стеновым материалом обеспечивается не только прочностью, но и балансом вязкости, химической совместимости, состава вяжущего, наличия добавок и технологии приготовления. При этом высокая марочная прочность раствора не всегда коррелирует с его адгезией, что подчёркивает важность комплексного подхода к подбору состава.

Химический состав вяжущего материала оказывает существенное влияние на качество кладочного раствора и его адгезию к стеновым материалам.

Технологические условия приготовления раствора также играют важную роль в достижении требуемых свойств кладки.

Разработанные композиционные вяжущие материалы значительно улучшают характеристики кладочного раствора, особенно в отношении сцепления с проблемными стеновыми материалами (например, силикатным кирпичом).

Улучшение адгезии и прочности при сдвиге делает кладку более надёжной и устойчивой к сейсмическим воздействиям.

Применение композиционных вяжущих, схожих по составу со стеновыми материалами, существенно повышает качество кладки, снижая коэффициент анизотропии и увеличивая прочность при сдвиге. Особенно эффективны такие решения при работе с проблемными материалами, такими как силикатный кирпич. При этом ключевую роль играют не только механические свойства раствора, но и химическая совместимость, адгезия и технологические условия приготовления. Эти факторы обеспечивают более надёжную и долговечную кладку, особенно в условиях сейсмической активности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплекс выполненных исследований с использованием закона сродства структур позволяет разрабатывать кладочные растворы на композиционном вяжущем с минеральной добавкой боя керамического и силикатного кирпича, керамзитобетона и газобетона.

Установлено, что применение минеральных добавок, при получении композиционных вяжущих, оптимизирует процессы структурообразования при твердении кладочных растворов, что приводит к существенному улучшению адгезии к соответствующим стеновым

материалам и в 1,5–3 раза больше, чем на традиционно применяемых растворах.

Внедрение результатов исследований позволит улучшить экологическую обстановку за счёт применения техногенного сырья и снижения расхода цемента. Особенно это актуально при восстановлении зданий и сооружений в ЛНР, ДНР и новых регионах Российской Федерации, а также в других государствах, в которых разрушены города в результате войн и землетрясений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лесовик В.С., Беленцов Ю.А., Куприна А.А. Использование положений Геоники при проектировании конструкций для работы в условиях динамических и сейсмических нагрузок // Известия вузов. Строительство. 2013. № 2–3 (650–651). С. 121–126. ISSN 1997-0935.
2. Ma Zhiming Tang, Qin Wu, Huixia Xu, Jiangguang Liang, Chao. Mechanical properties and water absorption of cement composites with various fineness and contents of waste brick powder from C&D waste. Cement and Concrete Composites. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103758>
3. Hu J., Ahmed W., Jiao D. A Critical Review of the Technical Characteristics of Recycled Brick Powder and Its Influence on Concrete Properties. Buildings 2024; 14, 3691. <https://doi.org/10.3390/buildings14113691>
4. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Чулкова И.Л., Толстой А.Д., Володченко А.А. Сродство структур как теоретическая основа проектирования композитов будущего // Construction materials. 2015. № 9.
5. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении. 2-е изд., доп. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. 287 с. ISBN 978-5-361-00354-9. EDN WOAVYD.
6. Kuprina A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyk L.H., Elistratkin M.Y. Anisotropy of Materials Properties of Natural and Man-Triggered Origin // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Vol. 9, No. 11. P. 816–819. ISSN 1816-949X. <https://doi.org/10.3923/rjasci.2014.816.819>
7. Баруздин А.А., Закревская Л.В., Николаева К.А. Композиционный материал на основе техногенных отходов // Эксперт: теория и практика. 2023. № 2 (21). С. 78–84. ISSN 2687-071X.
8. Gołaszewska Małgorzata, Gołaszewski, Jacek Bochen, Jerzy Cygan, Grzegorz. Comparative Study of Effects of Air-Entraining Plasticizing Admixture and Lime on Physical and Mechanical Properties of Masonry Mortars and Plasters. Materials.2022; 15. 2583. <https://doi.org/10.3390/ma15072583>
9. Ohemeng Eric Ababio Ekololu, Stephen Quainoo, Harry Naghizadeh, Abdolhossein. Economical and eco-friendly masonry mortar containing waste concrete powder as a supplementary cementitious material. Case Studies in Construction Materials. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01527>

10. Lesovik V.S., Ahmed A.A., Fediuk R.S., Kozlenko B., Mugahed Amran Y.H., Alaskhanov A.Kh., Asaad M.A., Murali G., Uvarov V.A. Performance investigation of demolition wastes-based concrete composites. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 106(6). Article No. 10608. <https://doi.org/10.34910/MCE.106.8>

11. Загороднюк Л.Х., Рыжих В.Д., Махортов Д.С., Синебок Д.А. Особенности формирования микроструктуры гранулированных заполнителей на разных вяжущих композициях (часть 3) // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2021. № 9.

12. Сулейманова Л.А., Есипов С.М., Се Д. Сопротивление кладки из ячеистобетонных блоков на полиуретановом клее центральному сжатию // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2024. № 7. С. 35–42. ISSN 2312-818X. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-7-35-42>

13. Загороднюк Л.Х., Лесовик В.С., Воронов В.В., Чулкова И.Л., Куприна А.А., Павленко О.А. Особенности твердения строительных растворов на основе сухих смесей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 10. С. 33–39.

14. Копаница Н.О., Демьяненко О.В., Куликова А.А., Ткач Е.В., Шестаков Н.И., Степина И.В. Вторичные ресурсы в производстве композиционных строительных материалов на основе цемента // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 10. С. 112–121. ISSN 2413-1830. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/10/2675>

15. Баруздин А.А., Закревская Л.В. Композиционные материалы на основе строительных и полимерных отходов // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19, № 2. С. 205–214. ISSN 2304-6600.

16. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Бабаев З.К., Джуманиязов З.Б. Керамический кирпич дорожного назначения для мощения тротуаров в регионах Приаралья // Стекло и керамика. 2023. № 2 (1142). С. 53–60. ISSN 0369-7139. <https://doi.org/10.47612/0369-7139-2023-2-53-60>

17. Махортов Д.С., Загороднюк Л.Х., Сумской Д.А., Аль Мамури Саад Халил Шадид. Получение вяжущих композиций оптимальных составов на основе портландцемента и отходов боя керамического кирпича // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2022. № 7. С. 45–52.

18. Токарев В.А., Кабалин М.Д., Грищенко М.С., Высоцкая М.А. Рециклинг вторичного сырья для изготовления мелкоштучных бетонных изделий в дорожном строительстве. Обзор // Вестник МГСУ. 2025. № 6.

19. Кузьмин Е.О., Нелюбова В.В., Володченко А.Н. Прогнозируемая прочность цементного камня с добавкой нанодисперсного кремнезема // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2024. № 10. С. 17–24. ISSN 2312-818X. URL: <https://vestnik.bstu.ru/> (дата обращения: 05.04.2025).

20. Бабаев З.К., Машарипова Ш.М. Отходы керамического кирпича как сырьё для производства реставрационных материалов архитектурных памятников // Eastern-European Scientific Journal. 2020. № 4–2 (56). С. 88–95.

REFERENCES

1. Lesovik V.S., Belentsov Yu.A., Kuprina A.A. The use of Geonics in the design of structures for operation under dynamic and seismic loads. *Izvestiya vuzov. Construction*. 2013; No. 2-3 (650-651). pp. 121-126. ISSN 1997-0935. (in Russ.)

2. Ma Ziming Tang, Qin Wu, Huixia Xu, Jianguang Liang, Chao. Mechanical properties and water absorption of cement composites with various fineness and contents of waste brick powder from C&D waste. *Cement and Concrete Composites*. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103758>

3. Hu J., Ahmed W., Jiao D. A Critical Review of the Technical Characteristics of Recycled Brick Powder and Its Influence on Concrete Properties. *Buildings* 2024; 14, 3691. <https://doi.org/10.3390/buildings14113691>

4. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.Kh., Chulkova I.L., Tolstoy A.D., Volodchenko A.A. Affinity of structures as a theoretical basis for designing composites of the future. *Construction materials*. 2015; No. 9. (in Russ.)

5. Lesovik V.S. Geonics (geomimetics). Examples of implementation in building materials science. 2nd edition, expanded. *Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*, 2016. 287 p. ISBN 978-5-361-00354-9. EDN WOAVYD. (in Russ.)

6. Kuprina A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Elistratkin M.Y. Anisotropy of Materials Properties of Natural and Man-Triggered Origin. *Research Journal of Applied Sciences*. 2014. Vol. 9, No. 11. P. 816–819. ISSN 1816-949X. <https://doi.org/10.3923/rjasci.2014.816.819>

7. Baruzdin A.A., Zakrevskaya L.V., Nikolaeva K.A. Composite material based on man-made waste. *Expert: theory and practice*. 2023. No. 2 (21). pp. 78-84. ISSN 2687-071X. (in Russ.)

8. Gołaszewska Małgorzata, Gołaszewski Jacek, Bochen, Jerzy, Cygan, Grzegorz. Comparative Study of Effects of Air-Entraining Plasticizing Admixture and Lime on Physical and Mechanical Properties of Masonry Mortars and Plasters. *Materials*. 2022; 15. 2583. <https://doi.org/10.3390/ma15072583>

9. Ohemeng Eric Ababio, Ekolu Stephen, Quainoo Harry, Naghizadeh Abdolhossein. Economical and eco-friendly masonry mortar containing waste concrete powder as a supplementary cementitious material. *Case Studies in Construction Materials*. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01527>

10. Lesovik V.S., Ahmed A.A., Fediuk R.S., Kozlenko B., Mugahed Amran Y.H., Alaskhanov A.Kh., Asaad M.A., Murali G., Uvarov V.A. Performance investigation of demolition wastes-based concrete composites. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 106(6). Article No. 10608. <https://doi.org/10.34910/MCE.106.8>

11. Zagorodnyuk L.Kh., Ryzhikh V.D., Makhortov D.S., Sinebok D.A. Features of the formation of the microstructure of granular aggregates on various binder compositions (PART 3). *Bulletin of the BSTU named after V. G. Shukhov*. 2021. №9. (in Russ.)

12. Suleymanova L.A., Esipov S.M., Se D. Resistance of masonry from cellular concrete blocks on poly-

urethane glue to central compression. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 7. pp. 35-42. ISSN 2312-818X. (in Russ.) <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-7-35-42>

13. Zagorodnyuk L.Kh., Lesovik V.S., Voronov V.V., Chulkova I.L., Kuprina A.A., Pavlenko O.A. Features of hardening of building mortars based on dry mixtures. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016; No.10:33-39. (in Russ.)

14. Kopanitsa N.O., Demyanenko O.V., Kulikova A.A., Tkach E.V., Shestakov N.I., Stepina I.V. Secondary resources in the production of composite building materials based on cement. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*. 2023; Vol. 334(10):112-121. ISSN 2413-1830. (in Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/10/2675>

15. Baruzdin A.A., Zakrevskaya L.V. Composite materials based on construction and polymer waste. *Bulletin of MGSU*. 2024; Vol. 19(2):205-214. ISSN 2304-6600. (in Russ.)

16. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.Kh., Babaev Z.K., Jumaniyazov Z.B. Ceramic road bricks for paving sidewalks in the Aral Sea region. *Glass and ceramics*. 2023; No. 2 (1142):53-60. ISSN 0369-7139. (in Russ.) <https://doi.org/10.47612/0369-7139-2023-2-53-60>

17. Makhorov D.S., Zagorodnyuk L.H., Sums-koy D.A., Al Mamuri Saad Khalil Shadid. Obtaining binding compositions of optimal compositions based on Portland cement and waste from the battle of ceramic bricks. *Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022; No. 7:45-52. (in Russ.)

18. Tokarev V.A., Kabalin M.D., Grishchenko M.S., Vysotskaya M.A. Retsikling vtorichnogo syr'ya dlya izgotovleniya melkoshhtuchnykh betonnykh izdeliy v dorozhnom stroitel'stve. Obzor [Recycling secondary raw materials for the production of small concrete products in road construction. Review]. *Vestnik MGSU*, 2025; no. 6. (in Russ.)

19. Kuzmin E.O., Nelyubova V.V., Volodchenko A.N. The predicted strength of cement stone with the addition of nanodispersed silica. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2024; No. 10:17-24. ISSN 2312-818X. URL: <https://vestnik.bstu.ru/> (date of access: 04/05/2025). (in Russ.)

20. Babaev Z.K., Masharipova Sh.M. Ceramic brick waste as a raw material for the production of restoration materials of architectural monuments. *Eastern-European Scientific Journal*. 2020; No. 4-2 (56): 88-95. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONTRIBUTIONS CO-AUTHORS

All authors contributed equally to this article writing. The authors declare no conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лесовик Валерий Станиславович – д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ, чл. корр. РААСН, заведующий кафедрой «Строительное материаловедение изделий и конструкций» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова) (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2378-3947>,

Scopus Author ID: 55887733300,

Researcher ID: A-4757-2016,

SPIN-код: 2873-6860,

e-mail: naukavs@mail.ru

Дудченко Валерия Александровна – аспирант, ассистент кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова) (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д.46).

Author ID: 1170036,

SPIN-код: 8957-1566,

e-mail: dudchenko.v.a@yandex.ru

Клементьева Анна Александровна – канд. техн. наук, технический менеджер ООО «Полипласт» (115114, г. Москва, ул. Дербеневская, д. 14, корп. 2).

Author ID: 855492,

SPIN-код: 7563-1860,

e-mail: Anna-121989@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lesovik Valery S. – Dr. of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Head of the Department of Construction Materials Science of Products and Structures, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova street, Belgorod, 308012).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2378-3947>,

Scopus Author ID: 55887733300,

Researcher ID: A-4757-2016,

SPIN-code: 2873-6860,

e-mail: naukavs@mail.ru

Dudchenko Valeria A. – Postgraduate student, Assistant, Department of Theoretical Mechanics and Strength of Materials, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova street, Belgorod, 308012).

SPIN-code: 8957-1566,

Author ID: 1170036,

e-mail: dudchenko.v.a@yandex.ru

Klementyeva Anna A. – Cand. of Technical Sciences, Technical Manager, Poliplast Limited Liability Company (Derbenevskaya St., 14/2, Moscow, 115114).

Author ID: 855492,

SPIN-code: 7563-1860,

e-mail: Anna-121989@mail.ru

Научная статья
УДК 625.7/8
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-522-539>
EDN: PFVRNU



ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ ДЛЯ УКРЕПЛЕНИЯ АСФАЛЬТОГРАНУЛЯТА

А.А. Лыткин, Г.В. Долгих, А.С. Пролягин ✉

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия

✉ ответственный автор
aleksandrprolygin@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Использование при ремонте дорог с дорожными одеждами нежесткого типа, технологии холодной регенерации с укреплением асфальтогранулята, различными вяжущими, позволяет значительно увеличить межремонтные сроки, снизить материалоемкость дорожных конструкций и эксплуатационные затраты.

При этом замена цемента для укрепления асфальтогранулята на комплексные медленноотвердевающие минеральные вяжущие с повышенным содержанием двухкальциевого силиката (белита) даст возможность сэкономить значительные объёмы цемента, повысить технологические параметры асфальтогранулобетонных смесей и долговечность дорожных конструкций за счет длительного сохранения в асфальтогранулобетоне большого резерва негидротированного вяжущего.

Следовательно, разработка научно обоснованных оптимальных составов комплексных минеральных вяжущих для укрепления асфальтогранулята является весьма актуальной научной и практической задачей.

Материалы и методы. Лабораторные исследования включали определение физических и физико-механических свойств исходных материалов для получения асфальтогранулобетона: нефелинового шлама, портландцемента, асфальтогранулята по стандартным методикам ОДМ 218.3.043–2015, ГОСТ 31108–2020, ОДМ 218.6.1.005–2021 соответственно.

Также было выполнено определение тонкости помола, сроков начала схватывания и прочности на сжатие в возрасте 56 сут, разработанных минеральных вяжущих, по ГОСТ Р 70196–2022.

Изготовление и испытание образцов асфальтогранулобетона выполнялось согласно требованиям ОДМ 218.6.1.005–2021. Помимо нормативных сроков испытания образцов в возрасте 7 и 28 сут, были произведены испытания в возрасте 270 сут.

Результаты. Дано теоретическое обоснование применения нефелинового шлама в качестве компонента комплексных минеральных вяжущих для укрепления асфальтогранулята. Разработаны оптимальные составы комплексных минеральных вяжущих класса 5,0 из нефелинового шлама, активированного 5–15% портландцемента. Рекомендованы оптимальные дозировки комплексных вяжущих 5–15% для укрепления асфальтогранулята при строительстве оснований и покрытий.

Использование данных вяжущих позволит получать высокотехнологичные асфальтогранулобетонные смеси и асфальтогранулобетон повышенной долговечности при минимальном расходе цемента, что способствует увеличению межремонтных сроков и улучшению экологической обстановки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: монолитные основания, асфальтогранулят, комплексные минеральные вяжущие, холодный ресайклинг, белитовый шлам

Статья поступила в редакцию 29.12.2025; одобрена после рецензирования 17.02.2026; принята к публикации 15.06.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Лыткин А.А., Долгих Г.В., Пролягин А.С., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Лыткин А.А., Долгих Г.В., Пролыгин А.С. Эффективность использования комплексных минеральных вяжущих для укрепления асфальтогранулята // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 3. С. 522-539. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-522-539>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-522-539>

EDN: PFVRNU

THE EFFECTIVENESS OF USING COMPLEX MINERAL BINDERS TO STRENGTHEN ASPHALT GRANULATE

Alexandr A. Lytkin, Gennadiy V. Dolgikh, Aleksandr S. Prolygin ✉

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),

Omsk, Russia

✉ corresponding author
aleksandrprolygin@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The use of cold regeneration technology with stabilization of asphalt granulate by various binders in the repair of roads with nonrigid pavement allows to increase the time between repairs considerably, to reduce the material consumption for road structures, and operating costs.

At the same time, the replacement of cement used to strengthen asphalt granulate with complex slow-hardening mineral binders with an increased content of dicalcium silicate (belite) will save significant volume of cement, improve the technological parameters of asphalt granulate concrete mixtures and enhance the durability of road structures due to the long-term preservation of a large reserve of non-hydrated binder in asphalt granulate concrete. Therefore, the development of scientifically based optimal compositions of complex mineral binders for strengthening asphalt granulate is a highly relevant scientific and practical task.

Materials and methods. Laboratory studies included the determination of the physical and physical-mechanical properties of the initial material used to produce asphalt granulated concrete: nepheline sludge, Portland cement, and asphalt granulate, according to standard methods described in industry road methodological documents and Interstate standard: ODM 218.3.043-2015, GOST 31108-2020, and ODM 218.6.1.005-2021, respectively.

The measurements of grinding fineness, time of initial setting and compressive strength of the developed mineral binders after 56 days have also been fulfilled.

The manufacture and testing of asphalt granulated concrete samples has been carried out in accordance with the requirements of industry road methodological document: ODM 218.6.1.005-2021. In addition to the standard checking periods for samples aged 7 and 28 days, tests have been performed at the age of 270 days.

Results. A theoretical justification is given for the use of nepheline sludge as a component of complex mineral binders to strengthen asphalt granulate. Optimal compositions of complex mineral binders to 5.0 class from nepheline sludge, 5-15% activated Portland cement have been developed. Optimal dosages of 5-15% of complex binders have been recommended for strengthening asphalt granulate during the construction of foundations and coatings. The use of these binders will enable to obtain high-tech asphalt granule concrete mixtures and asphalt granule concrete with increased service life and minimal cement consumption, which will help to extend the time between repairs and improve the environmental conditions.

KEYWORDS: monolithic basements, asphalt granulate, complex mineral binders, cold recycling, belite sludge

The article was submitted: December 29, 2025; approved after reviewing: February 17, 2026; accepted for publication: June 15, 2026.

All the authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Lytkin A.A., Dolgikh G.V., Prolygin A.S. The effectiveness of using complex mineral binders to strengthen asphalt granulate. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (3): 522-539. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-522-539>

© Lytkin Alexandr A., Dolgikh Gennadiy V., Prolygin Aleksandr S., 2026



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

ВВЕДЕНИЕ

Качество дорог исторически считается одной из важнейших проблем нашей страны. Несмотря на наблюдающуюся в последние годы положительную динамику в России, согласно открытым источникам, более 50% автомобильных дорог общего пользования регионального и местного значения не отвечают нормативным требованиям. В результате потери РФ из-за низкого качества сети автомобильных дорог составляют 3% валового внутреннего продукта.

С целью удовлетворения потребностей социально-экономического развития страны была разработана государственная программа «Развитие транспортной системы» и транспортная стратегия РФ на период до 2030 года¹.

Только за 5 лет (2025–2030 гг.) в рамках национального проекта «Инфраструктура для жизни» планируется привести в нормативное состояние более 14 тыс. км автомобильных дорог опорной сети России².

Одним из основных условий успешного развития дорожной отрасли и повышения потребительских свойств автомобильных дорог является более широкое внедрение в производство инновационных технологий и материалов.

Стратегия развития инновационной деятельности в области дорожного хозяйства определяет, в частности, следующие приоритетные направления:

- увеличение межремонтных сроков автомобильных дорог;
- исследования в области неорганических материалов и обоснованный рациональный выбор вяжущих для дорожного строительства с целью повышения эффективности укрепления грунтов и каменных материалов, т.к. отдельные действующие методы и методики

ки не отражают потребностей отрасли и требуют актуализации;

- применение технологии холодного ресайклинга при капитальном ремонте автомобильных дорог и получение исходных данных для актуализации и разработки нормативных документов, регламентирующих применение технологии холодного ресайклинга;

- реализация Программы стандартизации в части дорожного хозяйства и т. д.³

В настоящее время более 96% дорог нашей страны с дорожными одеждами нежесткого типа и основаниями из зернистых материалов (ЩПС, ЩГПС, ГПС, ПГС, песка, щебня и т. д.).

Одним из существенных недостатков таких дорожных конструкций являются значительные затраты на эксплуатацию, связанные в том числе с сокращением межремонтных периодов и общих сроков службы. Постоянно возрастающая интенсивность движения на автомобильных дорогах общего пользования, а также значительное повышение нагрузок на ось требуют увеличения несущей способности дорожных одежд при их ремонте путём устройства монолитных оснований [1].

При этом важно обеспечить достижение указанной цели без значительного повышения материалоемкости дорожных конструкций.

Наиболее эффективной технологией восстановления слоев оснований и усиления нежестких дорожных одежд в сравнении с традиционными методами является «Метод холодной регенерации» (ресайклинг)^{4, 5, 6} [2, 3]. Об этом свидетельствует и положительный международный опыт применения данной технологии. Например, исследование специалистов из Германии показало, что слои из асфальтогранулобетона обладают повышенной деформативностью и усталостной прочностью [4].

¹ Постановление Правительства РФ от 20.12.2017 № 1596 (ред. от 16.01.2023) «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие транспортной системы» (с изменениями и дополнениями) // <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 21.11.2025).

² Национальный проект «Инфраструктура для жизни» : [сайт]. Инфраструктура для жизни; 2026 [процитировано 17 февраля 2026]. Доступно: <https://dorogistrany.ru/MassMedia>. (17.02.2026)

³ Распоряжение Федерального дорожного агентства от 03.03.2021 № 771-р «Об утверждении стратегии развития инновационной деятельности в области дорожного хозяйства на период 2021–2025 годов» // <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 21.10.2025).

⁴ ARRA. Guidelines for cold-in-place recycling. Asphalt Recycling and Reclaiming Association. Annapolis, USA, 2001, 176 p.

⁵ Milton L.J., Earland M. Design guide and specification for structural maintenance of highway pavements by cold in-situ recycling. TRL report 386, Transport Research Laboratory, 1999, 79 p.

⁶ Перспектива развития ремонта дорожных одежд нежесткого типа методом холодной регенерации / Г.С. Бахрах // 70 лет отраслевой дорожной науке: сб. науч. тр., 1996. 77–86 с.

Данная технология предусматривает выполнение регенерации старых слоев покрытия и основания с максимальным использованием материала старого асфальтобетона как основного компонента нового монолитного основания. При условии укрепления полученного асфальтогранулята вяжущими (цементом, битумом, битумной эмульсией и др.) достигается значительная экономия кондиционных дорожно-строительных материалов и в 1,5–2 раза повышается общий модуль упругости дорожной одежды.

Кроме того, в результате ресайклинга материала старого покрытия исключается вероятность появления отраженных трещин в выше лежащих слоях покрытия.

Но следует отметить, что метод укрепления гранулята цементом не лишен недостатков. Во-первых, цемент – дорогостоящий материал. Во-вторых, вследствие того, что цемент является высокоактивным быстротвердеющим вяжущим, технологические операции по устройству конструктивных слоев с его применением должны выполняться в сжатые сроки, а следовательно, с ограничением длины технологической захватки⁷.

Кроме того, значительное повышение прочности асфальтогранулобетона (АГБ) с использованием цемента приводит к увеличению жесткости материала и, как следствие, снижению трещиностойкости монолитных слоев оснований.

Следовательно, метод холодной регенерации требует дальнейшего развития в части использования для укрепления асфальтогранулята других более эффективных вяжущих.

Замена портландцемента медленноотвердеющими бесклнкерными вяжущими, не имеющими ярко выраженного срока схватывания: сланцевые золы уноса, активированные известью; тонкомолотые фосфорные шлаки, активированные известью или цементной пылью; белитовые шламы – позволит облегчить соблюдение требуемых технологических параметров при производстве работ в ранние

сроки твердения материала. Свежеуложенный слой дорожной одежды из смеси на основе медленноотвердеющего вяжущего будет обладать повышенной ремонтпригодностью в процессе укладки и уплотнения⁸ [5].

В 2018 г. в результате совместных исследований ООО «Стройсервис» и ФГБОУ ВО «СибАДИ» была установлена принципиальная возможность и целесообразность использования тонкомолотого нефелинового шлама АО «РУСАЛ Ачинск» в качестве вяжущего для укрепления асфальтогранулята по технологии холодный ресайклинг, в том числе при низких, до 0 °С, температурах воздуха без введения специальных противоморозных добавок [2].

Для снижения дозировки вяжущего при укреплении асфальтогранулята и повышения экономической эффективности использования шлама, при значительном удалении объектов от шламоотвала (г. Ачинск), целесообразно активировать шлам цементом, известью, минеральным порошком, цементной пылью, гипсом, золой сухого отбора и т. п.⁹ [6].

Следует отметить, что вопросы по разработке научно обоснованных оптимальных составов комплексных вяжущих на основе нефелинового шлама и укреплению ими асфальтогранулята в настоящее время не изучены.

Цель исследований – научное обоснование и разработка оптимальных составов комплексных минеральных вяжущих на основе нефелинового шлама для укрепления асфальтогранулята.

Поставленная цель соответствует приоритетным направлениям стратегии развития инновационной деятельности в области дорожного хозяйства РФ¹⁰.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие научные и практические задачи:

1. На основании анализа результатов многолетних исследований в области использования минеральных вяжущих для устройства монолитных оснований дать теоретиче-

⁷ ОДМ 218.6.1.005–2021 Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог методом холодной регенерации (с Изменением)

⁸ Лыткин А.А. Применение белитового шлама для устройства слоев дорожных одежд при отрицательных температурах: автореф. дис. канд. техн. наук: 05. 23. 11 / А. А. Лыткин. 1990. 18 с.

⁹ Применение нефелинового шлама для строительства автомобильных дорог в условиях Сибири: автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05. 23. 14. / В. М. Бескровный. М. 1984. 22 с.

¹⁰ Распоряжение Федерального дорожного агентства от 03.03.2021 № 771-р «Об утверждении стратегии развития инновационной деятельности в области дорожного хозяйства на период 2021–2025 годов»// <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 21.10.2025).

ское обоснование применения нефелинового шлама в качестве компонента комплексных минеральных вяжущих для укрепления асфальтогранулята.

2. Разработать оптимальные составы двухкомпонентных минеральных вяжущих из нефелинового шлама, активированного различными дозировками портландцемента.

3. Изучить кинетику твердения асфальтогранулобетона, укрепленного разработанными комплексными минеральными вяжущими.

Анализ нормативных и литературных источников по вопросу устройства монолитных оснований с применением комплексных минеральных вяжущих при капитальном ремонте дорог

В соответствии с ГОСТ Р 71404–2024¹¹ за проектированные дорожные одежды должны быть не только прочными и надежными в эксплуатации, но и экономичными и наименее материалоемкими, особенно по расходу дорогостоящих строительных материалов и энергоресурсов [7]. В частности, можно отметить положительный опыт индийских исследователей, которые с целью экономии энергоресурсов рекомендуют массовое использование отходов промышленного производства [8].

Выбор и назначение материалов для конструктивных слоев дорожных одежд необходимо осуществлять на основе результатов анализа сырьевой базы региона строительства, ее мощностей, вида и объемов вторичных материалов, получаемых от разборки существующих дорожных одежд (при реконструкции, капитальном ремонте, ремонте и содержании автомобильных дорог).

Следовательно, с учетом того, что более 20 регионов РФ не имеют местных каменных материалов, при выборе технологии ремонта дорог с дорожными одеждами нежесткого типа, с целью комплексного решения проблем, предпочтение следует отдавать технологии холодного ресайклинга^{12, 13, 14} [9].

Сегодня отсутствуют нормативные барьеры для повсеместного, массового применения технологии холодного ресайклинга, а вопрос наиболее эффективной реализации данной технологии сводится к выбору ведущей машины (ресайклера) и вяжущего для укрепления слоя асфальтового гранулята. Для получения асфальтогранулобетона можно использовать как традиционные вяжущие (цемент, известь, битум, битумную эмульсию), так и комплексные минеральные вяжущие (введение в состав органоминеральной смеси минерального и органического вяжущих)¹⁴.

Как известно, основным и наиболее широко используемым видом минерального вяжущего в строительной отрасли является портландцемент. Это, вероятно, является одной из главных причин наиболее массового применения цемента для устройства монолитных оснований, в том числе и по технологии холодного ресайклинга. Как отмечалось ранее, использование для этих целей цемента сопряжено с существенными недостатками [2, 6].

Кроме того, цементная промышленность отличается очень высокой энергоемкостью и является одним из крупнейших источников выбросов парниковых газов. Во всем мире ее предприятия выбрасывают около 2,2–2,5 млрд т. CO₂, что составляет примерно 5–7% всех его отходов. Сюда входят выбросы, образующиеся при получении цемента (47%), при сжигании топлива (40%), выхлопы транспортных средств (около 5%) и выбросы, образующиеся при сжигании топлива для выработки электроэнергии, используемой в производстве цемента (около 5%)¹⁵. В частности, исследователи из Италии, Великобритании и Германии принимают активные меры по совершенствованию технологии производства цемента с целью сокращения выбросов в атмосферу. Кроме того, принимаются административные меры по сти-

¹¹ ГОСТ Р 71404–2024 Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования (с Поправкой): дата введения 2024-09-01. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2024. 147 с.

¹² Бахрах Г.С. Перспектива развития ремонта дорожных одежд нежесткого типа методом холодной регенерации // 70 лет отраслевой дорожной науке: сб. науч. тр., 1996. 77–86 с.

¹³ Постановление Правительства Российской Федерации от 30.05.2017 № 658 «О нормативах финансовых затрат и Правилах расчета размера бюджетных ассигнований федерального бюджета на капитальный ремонт, ремонт и содержание автомобильных дорог Федерального значения» // <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 21.10.2025).

¹⁴ ГОСТ Р 70197.1–2022 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси органоминеральные холодные с использованием вторичного асфальтобетона. Общие технические условия (с Поправкой): дата введения 2022-10-01. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2022. 14 с.

¹⁵ Uliasz-Bocheńczyk A., Mokrzycki E. Emisja dwutlenku węgla w przemyśle cementowym // Polityka energetyczna. 2003. Т. 6. Zeszyt specjalny. S. 367—375.

муляции предприятий отрасли за сокращение выбросов [10, 11].

Стратегия развития промышленности строительных материалов на период до 2030 г. определяет следующие технологические решения обозначенной проблемы:

- производство модифицированных вяжущих с минимальной долей портландцементного клинкера и введением минеральных добавок техногенного происхождения;
- развитие бесклинкерной технологии вяжущих щелочного затворения как на основе использования отходов топливно-энергетической промышленности при их наличии в данном регионе (шлакощелочные цементы), так и с применением тонкодисперсных добавок алюмосиликатной природы (геополимеры)¹⁶ [6].

Перспективность развития бесклинкерной технологии производства строительных композитов доказана современными отечественными и мировыми тенденциями¹⁷ [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

В связи с этим все больший интерес проявляется к комплексным бесклинкерным вяжущим, в большей степени на основе сырьевых материалов алюмосиликатного состава.

В 2023 г. утвержден ГОСТ Р 70196–2022, регламентирующий технические условия на комплексные минеральные вяжущие¹⁸.

Комплексное минеральное вяжущее (КМВ) – это строительная смесь, представляющая собой порошкообразный вяжущий материал, обладающий гидравлическими свойствами техногенного происхождения, содержащий портландцементный клинкер и минеральные компоненты¹⁷.

Номенклатура бесклинкерных медленновердеющих вяжущих довольно широка, что связано, прежде всего, с большим разнообразием применяемых сырьевых материалов (зачастую, мало востребованных) как природного, так и техногенного происхождения^{16,17} [12, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 21].

Основными компонентами КМВ могут быть портландцемент, доменные и электротермо-

софосфорные гранулированные шлаки, зола-уноса, строительная известь (кальциевая негашеная и гидратная), микрокремнезем, пуццолан, глиеж, обожженный сланец, белитовый шлак, известняк, золошлаковые смеси и пыль-уноса вращающихся печей и т.д.

Преимущества комплексных минеральных вяжущих перед цементом:

- возможность влиять на сроки набора прочности за счёт применения различных компонентов;
- влияние на уровень pH при укреплении грунтов;
- экономичность (за счет замены части цемента другим, менее дорогим, минеральным вяжущим);
- увеличение плотности цементного камня за счёт формирования определённого состава продуктов гидратации, коагулирующих поры;
- создание эффекта расширения, компенсирующего усадку цементного камня в оптимальном диапазоне;
- повышение экологичности материалов, поскольку для вяжущего требуется меньшее количество клинкера, при производстве которого происходят огромные вредные выбросы в атмосферу [16, 22].

Кроме того, одним из основных преимуществ специально приготовленных комплексных вяжущих перед традиционными (цементом и известью), по нашему мнению, является возможность регулировать физико-химические свойства вяжущего путем изменения его минералогического состава, с учетом свойств укрепляемого материала и климатических условий строительства.

В условиях усиливающейся антропогенной нагрузки на окружающую природную среду особое значение приобретает проблема расширения сырьевой базы для дорожного строительства за счет максимального использования отходов и полупродуктов различных производств, что соответствует отраслевой программе «Применение вторичных ресурсов и вторичного сырья из отходов в про-

¹⁶ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 10.05.2016 № 868-р «Об утверждении стратегии развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года» (с изменениями на 23 ноября 2016 года) // <http://www.consultant.ru> (21.10.2025).

¹⁷ Саламанова М.Ш. Строительные композиты на основе бесклинкерных вяжущих щелочной активации: автореф. дис. д-ра техн. наук: 2.1.5. Грозный, 2022. 50 с.

¹⁸ ГОСТ Р 70196–2022. Дороги автомобильные общего пользования. Комплексные минеральные вяжущие для стабилизации и укрепления грунтов. Технические условия: дата введения 2023-01-01. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2022. 12 с.

мышленном производстве», утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 17.11.2022 г.¹⁹

Использование вторичных ресурсов помимо экологического эффекта позволяет получить также и значительный экономический эффект за счет экономии невозобновляемых дефицитных природных ресурсов, уменьшения площадей для складирования отходов и расширения сырьевой базы дорожно-строительных материалов.

При выборе отхода для производства комплексных вяжущих с целью значительного снижения дозировки активатора твердения предпочтение следует отдавать отходам, обладающим самостоятельной гидравлической активностью. При этом наибольший эффект отмечается при использовании отходов с повышенным содержанием β -двухкальциевого силиката, белита (C_2S), что дает возможность получать медленнотвердеющие комплексные минеральные вяжущие²⁰ [6].

В соответствии с ГОСТ Р 70196–2022²¹ медленнотвердеющее комплексное минеральное вяжущее (МКМВ) – гидравлическое вяжущее, которое должно соответствовать требованиям, предъявляемым к прочности вяжущего на сжатие в возрасте 56 сут твердения.

Преимущества медленнотвердеющих вяжущих:

- длительное сохранение тиксотропной коагуляционной структуры. Это позволяет увеличить время на укладку смеси, удлинить захватку участка производства работ и улучшить качество уплотнения смеси;
- способность восстанавливать прочность после рыхления и повторного уплотнения;
- высокие прочностные и деформативные свойства. Это объясняется образованием

при медленном твердении гелевидных гидросиликатов кальция, которые после полного уплотнения по прочностным показателям не уступают кристаллогидратным новообразованиям, а по деформативным свойствам даже превосходят, так как имеют волокнистую структуру^{19,22} [1, 2, 6];

- способность к самоупрочнению (самопроизвольное увеличение прочности структурных связей в монолитном материале в процессе его эксплуатации)^{20,23,24}.

Преимущества медленнотвердеющих комплексных вяжущих перед цементом достаточно убедительно показаны в работах под руководством Б.А. Асмагулаева, по изучению свойств самовосстанавливающихся дорожных бетонов на основе белитовых цементов [23].

Установлено, что для обеспечения медленного затвердевания новых цементов в их составах содержание белита было увеличено до 60–85%, а количество быстротвердеющих высокоосновных силикатов: алитов (C_3S), алюминатов (C_3A) и алюмоферритов (C_4AF) снижено до минимума. При этом в процессе гидратации вяжущего возникают аморфные новообразования с длительным сохранением тиксотропной коагуляционной структуры.

Как отмечалось ранее, одним из отходов, представляющих практическую ценность для дорожной отрасли, является белитовый шлам. Этот материал образуется при производстве глинозема – оксида алюминия из нефелиновых и бокситовых руд способом спекания, в процессе высокотемпературного обжига руды с известняком на глиноземных предприятиях. Окись кальция и содержащийся в руде кремнезем вступают в соединение и образуют в основном частично гидратированный β -двухкальциевый силикат. Из продукта спекания путем гидротермального выщелачивания выделяют

¹⁹ Паспорт отраслевой программы «Применение вторичных ресурсов и вторичного сырья из отходов в промышленном производстве» (утв. Правительством РФ 17 ноября 2022 г. № 13493п-П11) // <http://www.consultant.ru> (21.10.2025).

²⁰ Применение нефелинового шлама для строительства автомобильных дорог в условиях Сибири: автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05. 23. 14 / В. М. Бескровный. М. 1984. 22 с.

²¹ ГОСТ Р 70196–2022. Дороги автомобильные общего пользования. Комплексные минеральные вяжущие для стабилизации и укрепления грунтов. Технические условия: дата введения 2023-01-01. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2022. 12 с.

²² Лыткин А.А. Применение белитового шлама для устройства слоев дорожных одежд при отрицательных температурах : автореф. дис. канд. техн. наук: 05. 23. 11 / А.А. Лыткин. 1990. 18 с.

²³ ОДМ 218.3.043–2015. Методические рекомендации по применению в слоях дорожных одежд натуральных белитовых шламов. Росавтодор Министерства транспорта Российской Федерации. Информавтодор. Издан на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 30.11.2015. № 2283. Р. с., М. 66 с.

²⁴ Белоусов Б.В., Гаврилов А.Н., Афонин А.С. Предложения по конструированию дорожных одежд с повышенным сроком службы. Мир дорог. М., 2016. 2 с.

глинозем, а белит, практически полностью оставаясь в шламе, в виде пескообразного отхода поступает в отвал. В зависимости от перерабатываемой руды белитовый шлак подразделяют на нефелиновый и бокситовый²⁵.

Невостребованные запасы этого отхода на шламоотвалах предприятий алюминиевой промышленности России составляют сотни миллионов тонн. Например, на сегодняшний день только на Ачинском глиноземном комбинате (АО «РУСАЛ Ачинск») общий объем складского хранения нефелинового шлака составляет более 220 млн т при ежегодном поступлении 6–7 млн т в год. При этом использование нефелинового шлака в качестве вторичного материального ресурса не превышает 200–300 тыс. т в год [7].

По фазовому составу нефелиновый шлак состоит в основном из смеси силикатов, гидросиликатов (20–30%) и гидроалюминатов кальция (3–5%), гидроферритов, карбонатов. Содержание C_2S в нефелиновом шлаке составляет 70–85%.

Бокситовый шлак состоит из C_2S (40–55%), кальцита, магнетита, гематита, гидрограната, гиббсита, перовскита, кварцита²⁵.

На основании многолетних научных исследований и производственного внедрения были разработаны методические рекомендации и национальные стандарты, регламентирующие область применения белитового шлака: ОДМ

218.3.043–2015²⁶, ГОСТ Р 70196–2022²⁷, ГОСТ Р 70452–2022²⁸, ГОСТ Р 70455–2022²⁹.

Натуральный белитовый (шлак текущего производства, немолотый) использовался в конструктивных слоях дорожных одежд при строительстве сотен километров дорог общего пользования I–IV категорий и нефтепромысловых дорог в I, II, III и IV дорожно-климатических зонах, в Красноярском крае, Омской, Новосибирской, Тюменской, Томской и Павлодарской областях^{30,31,32} [1, 2].

Кроме того, в 80-е годы прошлого столетия В.М. Бескровным разработаны составы специальных вяжущих для укрепления грунтов с применением нефелинового шлака Ачинского глиноземного комбината (гипсошламовые и портландцементношламовые), которые в опытно-экспериментальном порядке были использованы при строительстве монолитных оснований дорожных одежд³³.

Использование нефелинового шлака в качестве сырья для получения комплексных вяжущих, в промышленных объемах является экономически целесообразным решением, так как технология приготовления состоит только из двух операций – сушки шлака и совместного помола его с активатором твердения. Благодаря чему себестоимость таких вяжущих, по аналогии с нефелиновым цементом, может быть ориентировочно в 2 раза ниже себестоимости портландцемента [24].

²⁵ Логинова И.В., Кырчиков А.В. Аппаратурно-технологические схемы в производстве глинозема // Екатеринбург: Урфу, 2011. 233 с.

²⁶ ОДМ 218.3.043–2015. Методические рекомендации по применению в слоях дорожных одежд натуральных белитовых шламов. Росавтодор Министерства транспорта Российской Федерации. Информавтодор. Издан на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 30.11.2015. № 2283. Р. с., М. 66 с.

²⁷ ГОСТ Р 70196–2022. Дороги автомобильные общего пользования. Комплексные минеральные вяжущие для стабилизации и укрепления грунтов. Технические условия: дата введения 2023-01-01. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2022. 12 с.

²⁸ ГОСТ Р 70452–2022 Дороги автомобильные общего пользования. Грунты стабилизированные и укрепленные неорганическими вяжущими. Общие технические условия: дата введения 2023-01-01. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2022. 24 с.

²⁹ ГОСТ Р 70455–2022 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси щебеночно-гравийно-песчаные, обработанные неорганическими вяжущими. Общие технические условия: дата введения 2023-01-01. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2022. 14 с.

³⁰ Лыткин А.А. Применение белитового шлака для устройства слоев дорожных одежд при отрицательных температурах : автореф. дис. канд. техн. наук : 05. 23. 11 / А.А. Лыткин. 1990. 18 с.

³¹ Белоусов Б.В., Гаврилов А.Н., Афонин А.С. Предложения по конструированию дорожных одежд с повышенным сроком службы // Мир дорог. М., 2016. 2 с.

³² Бескровный В.М., Дежина Н.С., Лыткин А.А. Устройство щебеночного основания с обработкой нефелиновым шламом // Сб. «Вопросы производства и применения местных каменных материалов из естественных горных пород и отходов промышленности при строительстве дорожных одежд» Тр. СоюздорНИИ. М., 1981. 62–68 с.

³³ Применение нефелинового шлака для строительства автомобильных дорог в условиях Сибири: автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук: 05. 23. 14. / В. М. Бескровный. М. 1984. 22 с.

Следует также отметить, что в строительном материаловедении научной базой для разработки современных композитов является закон структурного сродства [25].

Сродство структур достигается за счёт согласования следующих параметров: фазовый состав компонентов, химическое сродство, генетическое сродство (общность происхождения материалов). По всем этим параметрам структуры белитового шлама и цемента с большой долей вероятности согласуются, что является убедительной предпосылкой к получению из этих материалов высокоэффективных комплексных минеральных вяжущих.

Следовательно, для производства комплексных минеральных вяжущих для укрепления асфальтогранулята, из условия высокого содержания белита (70–85%), огромных невосребованных объемов и положительного

опыта использования в дорожной отрасли предпочтение следует отдать нефелиновому шламу Ачинского глиноземного комбината.

Тем более что в соответствии с ГОСТ Р 70196–2022 (таблица 2)³⁴ этот шлам входит в перечень основных компонентов КМВ и есть положительный опыт лабораторных исследований и опытно-экспериментального строительства по применению молотого нефелинового шлама для укрепления асфальтового гранулята. Подробно результаты этих исследований изложены в работах [4, 7].

С учетом проведенного анализа литературных источников для выполнения лабораторных исследований были предварительно приняты следующие составы комплексных минеральных вяжущих и их дозировки для укрепления АГБС (таблица 1).

Таблица 1
Составы минерального вяжущего и дозировки в АГБС
Источник: составлено авторами.

Table 1
Compositions of mineral binders and its dosages in asphalt granule concrete mixtures
Source: compiled by the authors.

Маркировка вяжущего	Состав минерального вяжущего	Дозировка вяжущего в составе АГБС, %
А	Комплексное вяжущее (совместный помол 95% шлама +5% цемент)	5
		10
		15
В	Комплексное вяжущее (совместный помол 90% шлама +10% цемент)	5
		10
		15
С	Комплексное вяжущее (совместный помол 85% шлама +15% цемент)	5
		10
		15
Н	Натуральный нефелиновый шлам 100% (контрольный)	5
		10
		15
Ц	Цемент 100% (контрольный)	5

³⁴ ГОСТ Р 70196–2022. Дороги автомобильные общего пользования. Комплексные минеральные вяжущие для стабилизации и укрепления грунтов. Технические условия: дата введения 2023-01-01. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2022. 12 с.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Лабораторные исследования выполнялись в 3 этапа: испытание исходных материалов для приготовления комплексных минеральных двухкомпонентных вяжущих и асфальтогранулята (АГ) на предмет соответствия их нормативным требованиям; приготовление комплексных вяжущих и определение их физико-механических свойств; изготовление и испытание образцов из асфальтогранулобетонных смесей с различными дозировками комплексных вяжущих.

Для подбора составов асфальтогранулобетона был отобран асфальтогранулят из штабеля на базе строительной организации ЗАО «Стройсервис».

Агрегатный состав АГ определяли ситовым методом по ГОСТ 33029–2014³⁵.

Также было определено содержание битума в АГ, методом выжигания по ГОСТ 58401.15–2019³⁶.

Оптимальную влажность АГ определяли по ГОСТ 25607–2009³⁷.

Согласно данному нормативному документу оптимальная влажность складывается из оптимальной влажности песка (частицы мельче 5 мм), выделенного из асфальтогранулята, и водопоглощения щебня (частицы крупнее 5 мм).

В качестве компонентов комплексных минеральных вяжущих использовали общестро-

ительный портландцемент по ГОСТ 31108–2020³⁸ и натуральный нефелиновый шлам.

Гранулометрический состав натурального нефелинового шлама определяли ситовым методом по ГОСТ 8736–2014³⁹.

Перед определением активности шлама была определена его оптимальная влажность и максимальная плотность по ГОСТ 22733⁴⁰.

После чего, согласно ОДМ 218.3.043–2015,⁴¹ из шлама оптимальной влажности были изготовлены образцы диаметром 50,5 мм и высотой $50,5 \pm 1,0$ мм под нагрузкой 15 МПа, которые хранились в нормальных условиях и испытывались на сжатие в возрасте 90 сут.

Изготовление комплексных минеральных вяжущих, в соответствии с ГОСТ Р 70196–2022,⁴² выполняли методом совместного помола шлама с цементом в лабораторной шаровой мельнице марки МШ-40МЛ.

Материал массой 15 кг загружался в барабан со стальными шарами, после помола в течение 30 мин отбиралась проба 50 г и просеивалась на сите № 008 в соответствии с ГОСТ 310.2–76⁴³.

Помол осуществлялся в течение 120 мин с контролем тонкости помола через каждые 30 мин, до достижения тонкости помола общестроительных цементов.

Физико-механические свойства комплексных вяжущих определяли по стандартной методике ГОСТ Р 70196–2022⁴².

³⁵ ГОСТ 33029–2014 Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Определение гранулометрического состава (с Поправкой, с Изменением № 1): дата введения 2016-06-01. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.

³⁶ ГОСТ Р 58401.15–2019 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Определение содержания битумного вяжущего методом выжигания: дата введения 2019-06-01. М.: Стандартинформ, 2019. 8 с.

³⁷ ГОСТ 25607–2009 Смеси щебеночно-гравийно-песчаные для покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия (с Поправкой): дата введения 2011-01-01. М.: Стандартинформ, 2018. 14 с.

³⁸ ГОСТ 31108–2020 Цементы общестроительные. Технические условия (с Поправкой, с Изменением № 1): дата введения 2022-02-01. М.: Стандартинформ, 2020. 29 с.

³⁹ ГОСТ 8736–2014 Песок для строительных работ. Технические условия (с Поправками, с Изменением № 1): дата введения 2015-04-01. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.

⁴⁰ ГОСТ 22733–2016 Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности (с Поправками): дата введения 2017-01-01. М.: Стандартинформ, 2019. 15 с.

⁴¹ ОДМ 218.3.043–2015. Методические рекомендации по применению в слоях дорожных одежд натуральных белитовых шламов. Росавтодор Министерства транспорта Российской Федерации. Информавтодор. Издан на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 30.11.2015. № 2283. Р. с., М. 2015. 66 с.

⁴² ГОСТ Р 70196–2022. Дороги автомобильные общего пользования. Комплексные минеральные вяжущие для стабилизации и укрепления грунтов. Технические условия: дата введения 2023-01-01. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2022. 12 с.

⁴³ ГОСТ 310.2–76 Цементы. Методы определения тонкости помола (с Изменением № 1). М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 5 с.

С целью выявления степени эффективности использования комплексных минеральных вяжущих, кроме составов двухкомпонентных вяжущих «А», «В», «С» с дозировками активатора (цемента) 5, 10 и 15%, для укрепления АГБС использовали натуральный (немолотый) нефелиновый шлам и цемент.

Составы минеральных вяжущих и их дозировки для укрепления АГБС представлены в таблице 1.

Агрегатный состав АГБС определяли по методике ОДМ 218.6.1.005–2021⁴⁴.

Для изучения кинетики твердения АГБ, укрепленного минеральными вяжущими, изготавливались цилиндрические образцы по стандартной методике ОДМ 218.6.1.005–2021⁴⁴ в уплотнителе Маршалла.

Образцы хранили в нормальных условиях в климатической камере при температуре $20 \pm 0,5$ °С и относительной влажности 98–100% и испытывали для определения предела прочности на сжатие и предела прочности при непрямом растяжении, по 3 образца каждой серии в возрасте 7 и 28 сут при температурах 20 и 40 °С.

Кроме нормативных сроков испытаний, с учетом повышенного содержания в шламе бе-

лита (до 85%), дополнительно выполняли испытания образцов в возрасте 270 сут.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Агрегатный состав АГ соответствует требованиям ОДМ 218.6.1.005–2021⁴⁴. Содержание битума в АГ составило 5,0% сверх 100% от минеральной части.

Оптимальная влажность асфальтогранулята составила 4,7% (оптимальная влажность песка в составе АГ 10,2%, водопоглощение щебня 2,6%).

Цемент по физико-механическим свойствам, согласно ГОСТ 31108–2020⁴⁵, классифицируется как ЦЕМ II/B-1 32,5Н.

Нефелиновый шлам по модулю крупности классифицируется как песок средний.

Оптимальная влажность шлама составила 26,2%, а максимальная плотность 1,48 г/см³.

Предел прочности при сжатии образцов из шлама после 90 сут нормального твердения составил 6,5 МПа. Следовательно, в соответствии с ОДМ 218.3.043–2015 (см. таблицу 1)⁴⁴, шлам относится к высокоактивному.

Результаты определения физико-механических свойств комплексных минеральных вяжущих представлены в таблице 2.

Таблица 2
Физико-механические свойства комплексных минеральных вяжущих
Источник: составлено авторами.

Table 2
Physical and mechanical properties of complex mineral binders
Source: compiled by the authors.

Наименование состава	Прочность на сжатие в возрасте 56 сут, МПа	Вещественный состав КВМ, % масс		Тонкость помола по остатку на сите 0,08 мм, % масс		Начало схватывания, мин	
		Нефелиновый шлам	Цемент	Требования ГОСТ Р 70196	Фактическое значение	Требования ГОСТ Р 70196	Фактическое значение
А	5,59	95	5	не более 15,0	14,5	Не ранее 150	>360
В	6,36	90	10		14,6		>360
С	6,42	85	15		14,8		>360

⁴⁴ ОДМ 218.6.1.005–2021 Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог методом холодной регенерации (с Изменением) : дата введения 2021-02-17. М.: Росавтодор, 2021. 29 с.

⁴⁵ ГОСТ 31108–2020 Цементы общестроительные. Технические условия (с Поправкой, с Изменением № 1): дата введения 2022-02-01. М.: Стандартинформ, 2020. 29 с.

Таблица 3

Агрегатный состав АГБС

Источник: составлено авторами.

Table 3

Aggregate composition of asphalt granule concrete mixtures

Source: compiled by the authors.

Требования согласно ОДМ для АГБС	Полные проходы, % масс, через сито с отверстием, мм					
	45	31,5	22,4	16,0	11,2	4,0
32	100	100–80	95–70	-	-	75–40
22	-	100	100–80	95–70	-	75–40
16	-	-	-	100–80	95–70	75–40
Фактические значения	100	100	94,6	83,2	72,4	41,3

Согласно ГОСТ Р 70196–2022⁴⁶ все приготовленные вяжущие (А, В, С) удовлетворяют требованиям для медленноотвердеющих комплексных минеральных вяжущих (МКМВ), класс по прочности 5,0. Следовательно, тонкомолотый нефелиновый шлам, активированный цементом 5–15%, за счёт развитой реакционноспособной поверхности частиц может быть рекомендован для производства медленноотвердеющих комплексных минеральных вяжущих.

Все исследуемые асфальтогранулобетонные смеси по агрегатному составу соответствуют требованиям для АГБС–22⁴⁷.

Для примера данные по агрегатному составу АГБС с дозировкой комплексного минерального вяжущего 15% представлены в таблице 3.

На рисунке 1 приведены результаты определения водостойкости образцов АГБ.

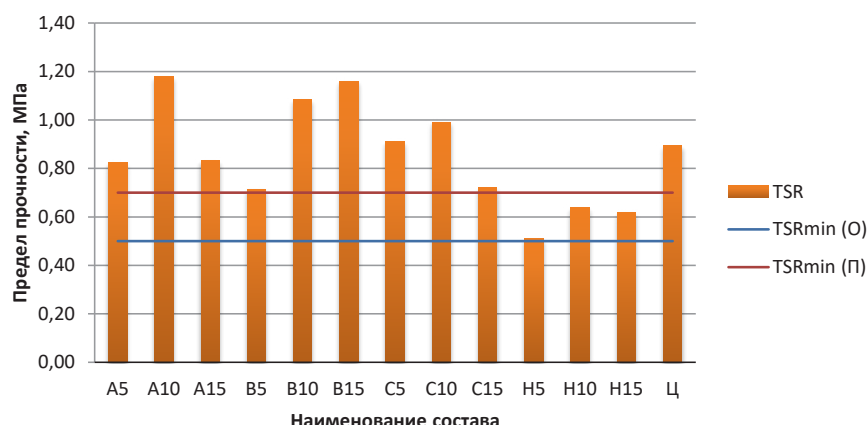


Рисунок 1 – Водостойкость образцов АГБ.

TSR – водостойкость образцов; $TSR_{min}(O)$ и $TSR_{min}(П)$ – требуемая минимальная водостойкость образцов, отформованных из АГБС, применяемой в качестве слоев оснований (и нижних слоев покрытий) и верхних слоев покрытий дорожной одежды.

Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Water Resistance of Asphalt Granule Concrete Samples

TSR – water resistance of samples; $TSR_{min}(O)$ and $TSR_{min}(P)$ – required minimum water resistance of samples formed from asphalt granule concrete mixture used as base layers (and lower pavement layers) and upper pavement layers of road surfaces.

Source: compiled by the authors.

⁴⁶ ГОСТ Р 70196–2022. Дороги автомобильные общего пользования. Комплексные минеральные вяжущие для стабилизации и укрепления грунтов. Технические условия: дата введения 2023-01-01. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2022. 12 с.

⁴⁷ ОДМ 218.6.1.005–2021 Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог методом холодной регенерации (с Изменением): дата введения 2021-02-17. М.: Росавтодор, 2021. 29 с.

Данные по испытанию образцов на водостойкость свидетельствуют о том, что все составы, кроме контрольных «Н5», «Н10», «Н15» удовлетворяют нормативным требованиям для оснований и покрытий дорожных одежд. Причём водостойкость образцов АГБ, укрепленного комплексными вяжущими, в основном выше, чем контрольных образцов укрепленных цементом.

Составы АГБ, укрепленные натуральным шламом по водостойкости, удовлетворяют только требованиям для оснований.

На рисунках 2 и 3 приведены результаты определения предела прочности при непрямом растяжении образцов АГБ при температуре 20 и 40 °С.

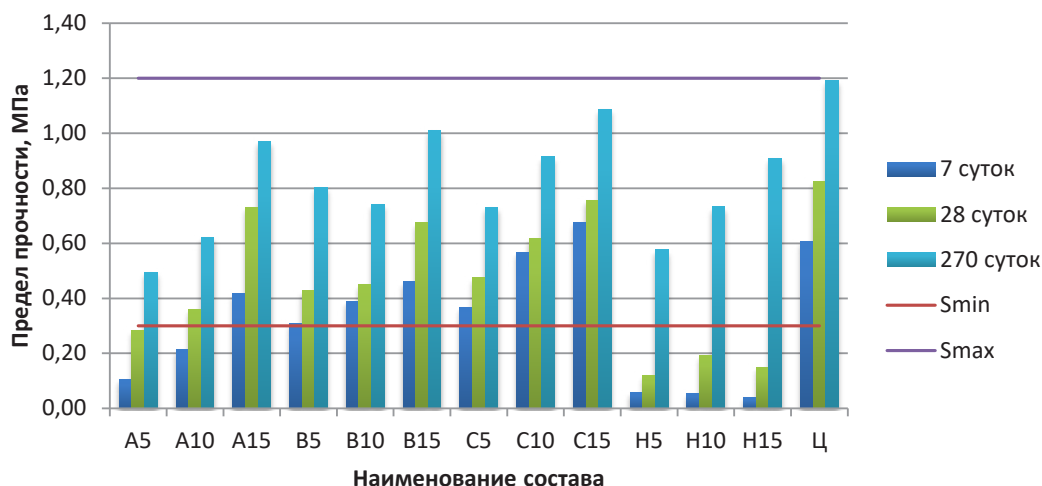


Рисунок 2 – Предел прочности образцов АГБ при непрямом растяжении при температуре 20 °С.
 S_{min} и S_{max} – требуемое минимальное и максимальное значение предела прочности при непрямом растяжении при температуре 20 °С
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Strength limit of asphalt granule concrete samples under indirect tensile stress at 20 °C
 S_{min} and S_{max} – the required minimum and maximum strength limit under indirect tensile stress at 20 °C
 Source: compiled by the authors.

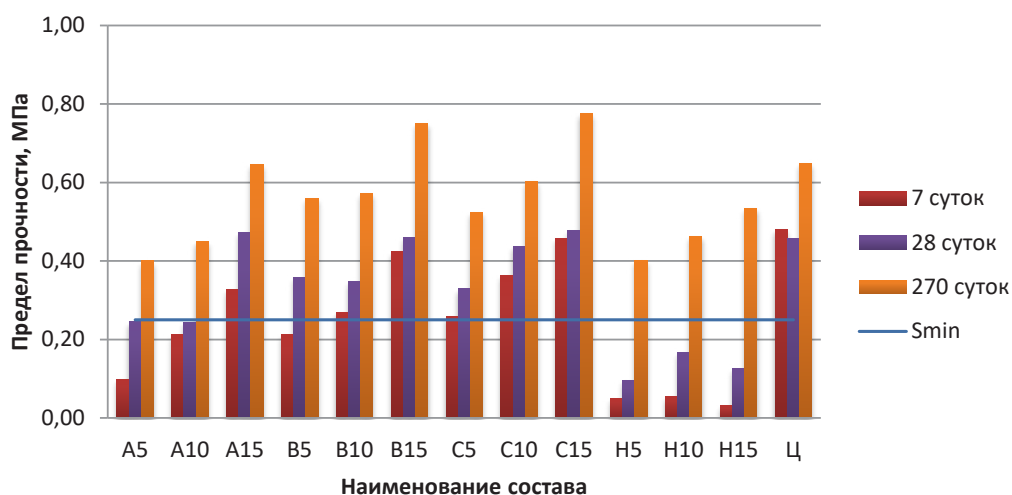


Рисунок 3 – Предел прочности образцов АГБ при непрямом растяжении при температуре 40 °С.
 S_{min} – требуемое минимальное значение предела прочности при непрямом растяжении при температуре 40 °С
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Strength limit of asphalt granule concrete samples under indirect tensile stress at 40 °C
 S_{min} – the required minimum and maximum strength limit under indirect tensile stress at 40 °C
 Source: compiled by the authors.

Данные, приведённые на рисунках 1, 2, 3, свидетельствуют о том, что АГБ, укреплённый комплексными минеральными вяжущими всех составов («А», «В», «С») при дозировках МКМВ 15% («А15», «В15», «С15») в нормативном возрасте твердения (7 сут) набрал прочность, соответствующую требованиям как для оснований, так и для покрытий (ОДМ 218.6.1.005–2021, таблицы 4, 5)⁴⁸. При дозировке МКМВ 10% нормативным требованиям отвечают только составы «В10» и «С10» с использованием комплексных вяжущих, активированных 10 и 15% цемента (см. таблицу 1). Составы «А5», «А10», «В5» и «С5» не набрали нормативную прочность. Следовательно, при использовании комплексного вяжущего с дозировкой активатора 5% дозировка МКМВ должна быть не менее 15%.

Наиболее высокие прочностные показатели достигнуты при дозировке МКМВ 15%.

Следует отметить, что прочностные показатели образцов составов «В15» и «С15» аналогичны контрольным образцам состава «Ц», а при испытании при температуре 40 °С в возрасте 270 сут даже превышают их (0,78 МПа против 0,65 МПа). Это объясняется высоким содержанием в шламе белита, который проявляет вяжущие свойства в более поздние сроки твердения⁴⁹ [2]. Кроме того, поверхность зёрен АГ частично покрыта битумом (5,0% сверх 100% от минеральной части), а шлам отличается хорошей адгезией с органическими вяжущими^{47,50}.

В подтверждение настоящих выводов свидетельствуют также данные испытания контрольных образцов АГБ, укреплённого натуральным шламом («Н5», «Н10», «Н15»). Так, если в нормативном возрасте образцы не

набрали требуемую прочность, то в возрасте 270 сут она составила, при температуре испытания 40 °С – 0,4–0,53 МПа, а при температуре 20 °С – 0,58–0,91 МПа, что соответственно в 2 и 2,4 раза выше нормативной и аналогична показателям АГБ укреплённого цементом и комплексными минеральными вяжущими. Решающую роль при этом играет накопление в грубодисперсном натуральном шламе, в поздние сроки твердения, большого резерва не гидратированного белита в виде гелеобразных новообразований, что способствует интенсификации твердения [4, 5, 6]. Но с учётом того, что контрольные образцы «Н5», «Н10» и «Н15» в нормативном возрасте не набрали требуемую прочность, натуральный шлак при дозировках 5–15% не может быть рекомендован в качестве вяжущего для укрепления АГ.

Однако имеется положительный опыт укрепления натуральным шламом каменных материалов при значительном увеличении его дозировок от 20 до 40%, в зависимости от его активности и требуемого модуля упругости конструктивного слоя^{51,52,53}. Следовательно, есть основание считать, что при увеличении дозировок шлама с целью достижения требуемой прочности АГБ в нормативном возрасте (7 сут) и соответствующем экономическом обосновании натуральный шлак может быть использован в качестве вяжущего для укрепления АГ. Окончательные выводы можно сделать после дополнительных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Теоретически обоснована и экспериментально установлена возможность и

⁴⁸ ОДМ 218.6.1.005–2021 Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог методом холодной регенерации (с Изменением) : дата введения 2021-02-17. М. : Росавтодор, 2021. 29 с.

⁴⁹ Белоусов Б.В., Гаврилов А.Н., Афонин А.С. Предложения по конструированию дорожных одежд с повышенным сроком службы // Мир дорог. М., 2016. 2 с.

⁵⁰ Артюхина Г.И. Применение бокситовых шламов, обработанных нефтяными гудронами и эмульсиями, при строительстве автомобильных дорог местного значения на северо-западе РСФСР : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : (05.23.14). Л., 1980. 25 с. : граф. Библиогр.: с. 25 (5 назв.).

⁵¹ Лыткин А.А. Применение белитового шлама для устройства слоев дорожных одежд при отрицательных температурах : автореферат дис. канд. техн. наук : 05. 23. 11 / А. А. Лыткин. 1990. 18 с.

⁵² ОДМ 218.3.043–2015. Методические рекомендации по применению в слоях дорожных одежд натуральных белитовых шламов. Росавтодор Министерства транспорта Российской Федерации. Информавтодор. Издан на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 30.11.2015. № 2283. Р. с., М. 66 с.

⁵³ Бескровный В.М., Дежина Н.С., Лыткин А.А. Устройство щебеночного основания с обработкой нефелиновым шламом // Сб. «Вопросы производства и применения местных каменных материалов из естественных горных пород и отходов промышленности при строительстве дорожных одежд» Тр.СоюздорНИИ. М., 1981. 62–68 с.

целесообразность применения белитового (нефелинового) шлама в качестве основного компонента комплексных минеральных вяжущих.

2. Разработаны рациональные составы комплексных минеральных вяжущих класса 5,0 из нефелинового шлама, активированного 5–15% портландцемента.

3. Рекомендованы оптимальные дозировки комплексных вяжущих для укрепления асфальтогранулята при строительстве оснований и покрытий:

- для составов вяжущих с дозировкой активатора твердения (цемента) 10–15% дозировки вяжущих составляют 5–15%;

- для состава вяжущего с дозировкой активатора 5%, для обеспечения АГБ нормативных требований по прочностным показателям, дозировка вяжущего должна быть не менее 15%.

4. Установлено, что АГБ, укрепленный комплексными вяжущими в поздние сроки твердения (28, 270 сут) имеет прочность, аналогичную или более высокую, чем прочность АГБ, укрепленного цементом, что подтверждает наши теоретические предпосылки об эффективности использования белитового шлама для производства комплексных минеральных вяжущих.

5. Установлены зависимости показателей основных физико-механических свойств АГБ от состава вяжущих и их дозировок для достижения нормативных показателей материала, что позволяет выбирать рациональные составы для проектирования и строительства оснований и покрытий в конкретных условиях строительства.

6. Использование для укрепления асфальтогранулята вяжущих на основе белитового шлама будет способствовать повышению долговечности дорожных конструкций за счёт длительного повышения модуля упругости при значительной экономии цемента и улучшению экологической обстановки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лыткин А.А., Долгих Г.В., Прохыгин А.С. Пути увеличения межремонтных сроков службы автомобильных дорог // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 2(96). С. 290–313. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-290-313>. EDN MJZCRV.

2. Лыткин А.А., Старков Г.Б., Вагнер Е.Я. Исследование эффективности использования белитового шлама для устройства монолитных слоев дорожных одежд методом холодного ресайклинга // Вестник СибАДИ. 2020. Т. 17, № 6(76). С. 764–776. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-764-776>. EDN ROURJD.

3. Aker S.N.A., Ozer H. Cold Recycling Technology for Airfield Pavement Rehabilitation Practices // Transportation Research Record. 2024. <https://doi.org/10.1177/03611981241265844>. EDN JNJDEM.

4. Al-Mohammedawi A., Mollenhauer K. Experimental investigation on fatigue and fracture behaviour of cold recycling materials // Transportation Engineering. 2024. Vol. 17. P. 100258. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2024.100258>. EDN CCAXVE.

5. Lytkin A.A. Study of the transport loads influence on the nature of belite sludge hardening in pavement // Materials Science Forum. 2020. Vol. 992. P. 79–85. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.79>. EDN AHDIWP.

6. Левин Б.В., Лисюк Б.С., Луценко К.Л. [и др.] Нефелиновые концентраты и шламы – уникальное сырье для геополлимерных материалов и конструкций // Мир дорог. 2020. № 129–130. С. 91–100. EDN FWCAHQ.

7. Gupta S., Kumar S. A state-of-the-art review of the deep soil mixing technique for ground improvement // Innovative Infrastructure Solutions. 2023. Vol. 8, No. 4. P. 129. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01098-6> EDN IYBPAN.

8. Pateriya A.S., Robert D.J., Dharavath K., Soni S.K. Stabilization of marble wastes using cement and nano materials for subgrade applications // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 326. P. 126865. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126865>. EDN TLIHPV.

9. Курдюков Р.П., Курдюков Д.П., Мануковский А.Ю. Регенерация асфальтобетонного покрытия // Леса России в XXI веке: сборник научных трудов по итогам Международной научно-технической интернет-конференции, Санкт-Петербург, 26 ноября 2015 года. Выпуск 12. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2015. С. 130–135. EDN YLTQPT.

10. Carbone C., Ferrario D., Lanzini A. [et al.] Evaluating the Carbon Footprint of Cement Plants Integrated With the Calcium Looping CO2 Capture Process // Frontiers in Sustainability. 2022. Vol. 3. <https://doi.org/10.3389/frsus.2022.809231>. EDN LSATWR.

11. Strunge T., Renforth Ph., Van Der Spek M. Towards a business case for CO2 mineralisation in the cement industry // Communications Earth and Environment. 2022. Vol. 3, No. 1. P. 1–14. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00390-0>. EDN HJBXQZ.

12. Чижов Р.В., Кожухова Н.И., Строкова В.В., Жерновский И.В. Алюмосиликатные бесклнкерные вяжущие и области их использования // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 4. С. 6–10. EDN VRRFEZ.

13. Кадышев Н.Д., Кожухова Н.И. Перспективы использования доменных гранулированных шлаков при производстве эффективных бесцементных вяжущих // Современные строительные материалы, технологии и конструкции: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО «ГГТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова», Грозный, 24–26 марта 2015

года / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Грозненский государственный нефтяной технический университет им. академика М.Д. Миллионщикова» (ФГБОУ ВПО «ГГНТУ»), г. Грозный. Том 1. Грозный: ФГУП «Издательско-полиграфический комплекс «Грозненский рабочий», 2015. С. 139–143. EDN TUBCCF.

14. Фомина Е.В., Кудярова Н.П., Тюкавкина В.В. Активация гидратации композиционно-го вяжущего на основе техногенного сырья // Строительные материалы. 2015. № 12. С. 61–64. EDN TEPNUS.

15. Strokova V.V., Cherevatova A.V., Pavlenko N.V., Nelubova V.V. Prospects of Application of Zero-Cement Binders of a Nonhydration Hardening Type // *World Applied Sciences Journal*. 2013. Vol. 25, No. 1. P. 119–123. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.25.01.7032>. EDN SHZFGD.

16. Агеева М.С., Алфимова Н.И. Эффективные композиционные вяжущие на основе техногенного сырья / Saarbrücken : LAP LAMBERT, 2015. 75 с. ISBN 978-3-659-79264-9. EDN ULZZOT.

17. Abdila S.R., Abdullah M.M.A.I.B., Ahmad R. [et al.] Potential of Soil Stabilization Using Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) and Fly Ash via Geopolymerization Method: A Review // *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 1. P. 375. <https://doi.org/10.3390/ma15010375>. EDN XNCOCU.

18. Coban H.S., Cetin B. Suitability Assessment of Using Lime Sludge for Subgrade Soil Stabilization // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2022. Vol. 34, No. 3. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0004122](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004122). EDN JXEBVD.

19. Kererat Ch., Kroehong W., Thaipum S., Chindaprasart P. Bottom ash stabilized with cement and para rubber latex for road base applications // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. P. e01259. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01259>. EDN RAEAEU.

20. Парфенова А.А., Синицин Д.А., Глазачев А.О. [и др.]. Комплексные минеральные вяжущие для укрепления грунтов на основе вторичных ресурсов химической и металлургической промышленности // *Техника и технология силикатов*. 2025. Т. 32, № 2. С. 184–194. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2025-184-194>. EDN TAEPAS.

21. Щеткин Е.С., Гзелишвили Д.С. Опыт применения двухкомпонентных комплексных органоминеральных стабилизаторов грунта при строительстве дорог на объекте «Обустройство Ковыктинского газоконденсатного месторождения» // *Газовая промышленность*. 2024. № 11(873). С. 80–83. EDN MACCSK.

22. Хрищатая Е.В., Воробьев Д.В., Шестаков М.А. Эффективность комплексных минеральных вяжущих для укрепления грунтов // *Цемент и его применение*. 2023. № 3. С. 28–31. EDN BNROIA.

23. Асмагулаев Б. А., Асмагулаев Р. Б., Асмагулаев Н.Б. [и др.]. Наномодифицированные медленно твердеющие дорожные бетоны для долговечных автомобильных дорог // *Дороги и мосты*. 2020. № 1(43). С. 180–204. EDN VERIHD.

24. Степанова М.Л., Маркелов Н.А., Гафаров М.Ш. [и др.]. Комплексное использование нефелинового шлама в производстве строительных материалов // *Современные наукоемкие технологии*. 2019. № 3-1. С. 77–82. EDN ZLEZPF.

25. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Чулкова И.Л. [и др.]. Средство структур как теоретическая основа проектирования композитов будущего // *Строительные материалы*. 2015. № 9. С. 18–22. EDN UKLIAP.

REFERENCES

1. Lytkin A.A., Dolgih G.V., Prolygin A.S. Puti uvelicheniya mezhremontnykh srokov sluzhby avtomobil'nykh dorog. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*. 2024; T. 21, № 2(96). S. 290–313. (in Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-290-313>. EDN MJZCRV.

2. Lytkin A.A., Starkov G.B., Vagner E.Ja. Issledovanie effektivnosti ispol'zovaniya belitovogo shlama dlja ustrojstva monolitnykh sloev dorozhnykh odezd metodom xolodnogo resajklinga. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*. 2020; T. 17, № 6(76). S. 764–776. (in Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-764-776>. EDN ROURJD.

3. Aker S.N.A., Ozer H. Cold Recycling Technology for Airfield Pavement Rehabilitation Practices. *Transportation Research Record*. 2024; <https://doi.org/10.1177/03611981241265844>. EDN JNJDEM.

4. Al-Mohammedawi, Mollenhauer K.A. Experimental investigation on fatigue and fracture behaviour of cold recycling materials // *Transportation Engineering*. 2024; Vol. 17. P. 100258. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2024.100258>. EDN CCAXVE.

5. Lytkin A.A. Study of the transport loads influence on the nature of belite sludge hardening in pavement // *Materials Science Forum*. 2020; Vol. 992. P. 79–85. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.79>. EDN AHDWIP.

6. Levin B.V., Lisjuk B.S., Lucenko K.L. [i dr.] Nefelinovye koncentraty i shlamy - unikal'noe syr'e dlja geopolimernyx materialov i konstrukcij. *Mir dorog*. 2020; № 129–130. S. 91–100. EDN FWCAHQ. (in Russ.)

7. Gupta S., Kumar S. A state-of-the-art review of the deep soil mixing technique for ground improvement. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2023; Vol. 8, No. 4. P. 129. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01098-6>. EDN IYBPAN.

8. Pateriya A.S., Robert D.J., Dharavath K., Soni S.K. Stabilization of marble wastes using cement and nano materials for subgrade applications. *Construction and Building Materials*. 2022; Vol. 326. P. 126865. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126865>. EDN TLIHPV.

9. Kurdjukov R.P., Kurdjukov D.P., Manukovskij A.Ju. Regeneracija asfal'tobetonnoho pokrytija. *Lesa Rossii v XXI veke* : sbornik nauchnyx trudov po itogam mezhdunarodnoj naučno-tehničeskoj internet-konferencii, Sankt-Peterburg, 26 nojabrja 2015

года. Tom Vypusk 12. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj lesotexničeskij universitet im. S.M. Kirova, 2015; S. 130-135. EDN YLTQPT. (in Russ.)

10. Carbone C., Ferrario D., Lanzini A. [et al.] Evaluating the Carbon Footprint of Cement Plants Integrated With the Calcium Looping CO₂ Capture Process. *Frontiers in Sustainability*. 2022; Vol. 3. <https://doi.org/10.3389/frsus.2022.809231>. EDN LSATWR.

11. Strunge T., Renforth Ph., Van Der Spek M. Towards a business case for CO₂ mineralisation in the cement industry. *Communications Earth and Environment*. 2022; Vol. 3, No. 1. P. 1-14. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00390-0>. EDN HJBXQZ.

12. Čižov R.V., Kožuxova N.I., Strokova V.V., Žernovskij I.V. Aljumosilikatnye besklinskernye vjažuščie i oblasti ix ispol'zovanija. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo texnologičeskogo universiteta im. V.G. Šuxova*. 2016; № 4. S. 6-10. EDN VRRFEZ. (in Russ.)

13. Kadyšev N.D., Kožuxova N.I. Perspektivy ispol'zovanija domennyx granulirovannyx šlakov pri proizvodstve éffektivnyx bescementnyx vjažuščix. *Sovremennye stroitel'nye materialy, tehnologii i konstrukcii* : Materialy Meždunarodnoj naučno-praktičeskoj konferencii, posvjaščennoj 95-letiju FGBOU VPO "GGNTU im. akad. M.D. Millionščikova", Groznyj, 24–26 marta 2015 goda / Federal'noe gosudarstvennoe bjudžetnoe obrazovatel'noe učreždenie vysšego professional'nogo obrazovanija «Grozenskij gosudarstvennyj neftjanij texničeskij universitet imeni akademika M.D. Millionščikova» (FGBOU VPO «GGNTU»), g. Groznyj. Groznyj: FGUP «Izdatel'sko-poli-grafičeskij kompleks «Grozenskij rabočij», 2015; 1; S. 139-143. EDN TUBCCF. (in Russ.)

14. Fomina E.V., Kudejarova N.P., Tjukavkina V.V. Aktivacija gidratacii kompozicionnogo vjažuščegona osnove texnogennogo syr'ja. *Stroitel'nye materialy*. 2015; № 12. S. 61-64. EDN TEPNUS. (in Russ.)

15. Strokova V.V., Cherevatova A.V., Pavlenko N.V., Nelubova V.V. Prospects of Application of Zero-Cement Binders of a Nonhydration Hardening Type. *World Applied Sciences Journal*. 2013; Vol. 25, No. 1. P. 119-123. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.25.01.7032>. EDN SHZFGD.

16. Ageeva M.S., Alfimova N.I. Éffektivnye kompozicionnye vjažuščie na osnove texnogennogo syr'ja. Saarbrücken : LAP LAMBERT, 2015. 75 s. ISBN 978-3-659-79264-9. EDN ULZZOT. (in Russ.)

17. Abdila S.R., Abdullah M.M.A.I.B., Ahmad R. [et al.] Potential of Soil Stabilization Using Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) and Fly Ash via Geopolymerization Method: A Review. *Materials*. 2022; Vol. 15, No. 1. P. 375. <https://doi.org/10.3390/ma15010375>. EDN XNCOCU.

18. Coban H.S., Cetin B. Suitability Assessment of Using Lime Sludge for Subgrade Soil Stabilization / H. S. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2022; Vol. 34, No. 3. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0004122](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004122). EDN JXEBVD.

19. Kererat Ch., Kroehong W., Thaipum S., Chindaprasit P. Bottom ash stabilized with cement and para rubber latex for road base applications. *Case*

Studies in Construction Materials. 2022. Vol. 17. P. e01259. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01259>. EDN RAEAEU.

20. Parfenova A.A., Sinicin D.A., Glazačev A.O. [i dr.] Kompleksnye mineral'nye vjažuščie dlja ukreplenija gruntov na osnove vtoričnyx resursov ximičeskoj i metallurģičeskoj promyšlennosti. *Texnika i tehnologija silikatov*. 2025; T. 32, № 2. S. 184-194. (in Russ.) <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2025-184-194>. EDN TAEPAS.

21. Ščetkin E.S., Gzelišvili D.S. Opyt primenenija dvuxkomponentnyx kompleksnyx organomineral'nyx stabilizatorov grunta pri stroitel'stve dorog na ob"ekte «Obustrojstvo Kovyktinskogo gazokondensatnogo mestoroždenija». *Gazovaja promyšlennost'*. 2024; № 11(873). S. 80-83. EDN MACCSK. (in Russ.)

22. Xriščataja E.V., Vorob'ev D.V., Šestakov M.A. Éffektivnost' kompleksnyx mineral'nyx vjažuščix dlja ukreplenija gruntov. *Cement i ego primenenie*. 2023; № 3. S. 28-31. EDN BNROIA. (in Russ.)

23. Asmatulaev B.A., Asmatulaev R.B., Asmatulaev N. B. [i dr.] Nanomodificirovannye medlenno tverdejuščie dorožnye betony dlja dolgovečnyx avtomobil'nyx dorog. *Dorogi i mosty*. 2020; № 1(43). S. 180-204. EDN VERIHD. (in Russ.)

24. Stepanova M.L., Markelov N.A., Gafarov M.Š. [i dr.] Kompleksnoe ispol'zovanie nefelinovogo šlama v proizvodstve stroitel'nyx materialov. *Sovremennye naukoemkie tehnologii*. 2019; № 3-1. S. 77-82. EDN ZLEZPF. (in Russ.)

25. Lesovik V.S., Zagorodnjuk L.X., Čulkova I.L. [i dr.] Srodstvo struktur kak teoretičeskaja osnova proektirovanija kompozitov buduščego. *Stroitel'nye materialy*. 2015; № 9. S. 18-22. EDN UKLIAP. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Лыткин А.А. Постановка цели и задачи исследования, анализ и обобщение литературных источников, формулирование заключения.

Долгих Г.В. Анализ и обобщение литературных источников, осуществление критического анализа и доработка текста.

Пролыгин А.С. Проведение лабораторных испытаний, редактирование текста, оформление результатов исследования в графиках и таблицах.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Lytkin Alexandr A. Setting the goals and objectives of the study, analyzing and summarizing the literary sources, formulating the conclusion.

Dolgikh Gennadiy V. Analysis and synthesis of literary sources, critical analysis and revision of the text.

Prolygin Aleksandr S. Execution of laboratory tests, editing the text, presenting research results in graphs and tables.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лыткин Александр Александрович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доц.

кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (644050, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5257-0502>,

Scopus ID: 57217279492,

e-mail: alx.lytkin2016@yandex.ru

Долгих Геннадий Владимирович – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Строительство и эксплуатация дорог» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (644050, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7582-3939>,

Scopus ID: 57199391542,

SPIN-код: 7079-8998,

e-mail: dolgikh-gv@yandex.ru

Пролыгин Александр Сергеевич – преподаватель кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (644050, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1395-0553>,

Scopus ID: 57222243670,

SPIN-код: 4526-5078,

e-mail: aleksandrprolygin@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lytkin Alexandr Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor, Road Construction and Operation Department, Siberian State Automobile and Highway University (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5257-0502>,

Scopus ID: 57217279492,

e-mail: alx.lytkin2016@yandex.ru

Dolgikh Gennadiy Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Road Construction and Operation Department, Siberian State Automobile and Highway University (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7582-3939>,

Scopus ID: 57199391542,

SPIN-code: 7079-8998,

e-mail: dolgikh-gv@yandex.ru

Prolygin Aleksandr Sergeevich – Lecturer, Road Construction and Operation Department, Siberian State Automobile and Highway University (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1395-0553>,

Scopus ID: 57222243670,

SPIN-code: 4526-5078,

e-mail: aleksandrprolygin@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются рукописи по направлениям: Транспорт. Транспортные и технологические машины; Строительство. Строительные материалы и изделия. Редакция принимает к рассмотрению **оригинальные научные статьи** объемом 8–10 стр. машинописного текста через 1 интервал, 5–8 рисунков и (или) таблиц, 20–50 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. Рекомендованное 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 A4, 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 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 – 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. Корректурa статей авторам не высылается, 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.