

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



научный рецензируемый журнал

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

“Vestnik SibADI”

Том 22, № 1. 2025
Vol.22, No. 1. 2025

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: 10.26518/2071-7296-2025-22-1

TOM 22, № 1. 2025

VOL. 22, No. 1. 2025



Учредитель и издатель:

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

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ

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

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)», 2025

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 24.02.2025. Дата выхода в свет 28.02.2025. 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)», 2025

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

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

2.5.11. – Ground transport and technological systems and complexes (technical sciences),

2.9.1. – Transport and transport-technological systems of the country, regions and cities, organization of the transport production (Technical Sciences),

2.9.4. – Management of the transportation process (Technical Sciences),

2.9.5. – Operation of automobile transport (Technical Sciences),

2.1.1. – Building structures, buildings and facilities (Technical Sciences),

2.1.5. – Building materials and products (Technical Sciences),

2.1.7. – Technology and organization of construction (Technical Sciences),

2.1.8. – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels (Technical Sciences).

The journal is the periodical scientific edition registered as mass media. Certificate of registration media is PI NUMBER FS – 77-73591 dated on 31.08.2018 and is issued by the Federal Service of Supervision in the sphere of information technologies and mass communications (Roskomnadzor). The peer-reviewed scientific The Russian Automobile and Highway Industry Journal is included in the list of leading periodicals and recommended by the Higher Attestation Commission by a decision of the Presidium of the Higher Attestation Commission on 25.02.2011. In accordance with the order of The Ministry of Education and Science of Russia dated by December 28, 2018, No. 90 is included in the new list. Since 2017, all issues and articles of the journal have been assigned by Digital Object Identifiers (DOIs), the data of which are available in electronic version on the 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 24.02.2025. Publication date is 28.02.2025. 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)", 2025

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 ID 0000-0003-2763-0515

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

Транспорт

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

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

Строительство и архитектура

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

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

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

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

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

Зырянов Владимир Васильевич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Организация перевозок и дорожного движения» Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону
Scopus Author ID 26424901100, **Researcher ID** A-5063-2014,
ORCID ID 0000-0002-5567-5457

Кондаков Сергей Владимирович, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Колесные и гусеничные машины». Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия.
Scopus Author ID 56556574700, **Researcher ID** M-5466-2018,
ORCID ID 0000-0001-6818-1694

Копаница Наталья Олеговна, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Строительные материалы и технологии». Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия.
Scopus Author ID 6506597418, **Researcher ID** A-8158-2016,
ORCID ID 0000-0002-0991-8550

Корнеев Сергей Васильевич, д-р техн. наук, проф., Омский государственный технический университет (ОМГТУ), г. Омск, Россия
Scopus Author ID 7006776195, **Researcher ID** V-8864-2018

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

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

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

Леонovich 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. проф. наук Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский

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

Scopus Author ID 57200729552, **Researcher ID** AAU-8361-2020, **ORCID ID** 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-техн. наук, доц., проф. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия

Scopus Author ID 7006700218, **Researcher ID** H-2077-2016, **ORCID ID** 0000-0001-9913-2078

Мочалин Сергей Михайлович, д-р техн. наук, проф., Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия

Scopus Author ID 6507433262, **Researcher ID** D-7301-2017, **ORCID ID** 0000-0003-3651-0961

Немировский Юрий Владимирович, д-р физ.-мат. наук, проф. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича» Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия

Scopus Author ID 12759501600, **Researcher ID** M-8151-2017, **ORCID ID** 0000-0002-4281-4358

Новиков Александр Николаевич, д-р техн. наук, проф., Директор Политехнического института имени Н.Н. Поликарпова ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева» г. Орел, Россия

Scopus Author ID 57077906200, **Researcher ID** B-9082-2016, **ORCID ID** 0000-0001-5496-4997

Перегуд Яна Арнольдовна д-р экон. наук, проф. Высшая школа экономики в Варшаве (SGH), г. Варшава, Польша

Scopus Author ID 26649146500, **Researcher ID** A-1858-2014, **ORCID ID** 0000-0003-1774-5220

Плачиди Лука Л. доктор наук, доцент инженерного факультета Международного дистанционного университета UNINETTUNO, г. Рим, Италия

Scopus Author ID 57199322424, **ORCID ID** 0000-0002-1461-3997

Подшивалов Владимир Павлович, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

ORCID ID 0000-0002-2529-6018, **Researcher ID** E-4066-2018

Пономарев Андрей Будимирович, д-р техн. наук, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

Scopus Author ID 6603146403, **Researcher ID** A-8668-2013, **ORCID ID** 0000-0001-6521-9423

Рассоха Владимир Иванович, д-р техн. наук, доц., проф., ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург, Россия

Scopus Author ID 57193742928, **Researcher ID** M-3242-2017, **ORCID ID** 0000-0002-7836-2242

Савельев Сергей Валерьевич, д-р техн. наук, доц., проф. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия

Scopus Author ID 57159787800, **Researcher ID** A-4081-2019, **ORCID ID** 0000-0002-4034-2457

Ваклав Скала, профессор Университет Западной Богемии, г. Пльзень, Чехия

Scopus Author ID 7004643209, **Researcher ID** F-9141-2011, **ORCID ID** 0000-0001-8886-4281

Трофименко Юрий Васильевич, д-р техн. наук, проф., Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ) г. Москва, Россия

Scopus Author ID 56098551600, **Researcher ID** N-7846-2018, **ORCID ID** 0000-0002-3650-5022

Хмара Леонид Андреевич, д-р техн. наук, проф., Приднепровская государственная академия Строительства и Архитектуры, г. 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

Щербаков Виталий Сергеевич, д-р техн. наук, проф., Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия

Scopus Author ID 57034922100, **Researcher ID** N-1716-2017, **ORCID ID** 0000-0002-3084-2271

Чжаньпин, Ph.-D., профессор Мичиганского технологического университета, Хаутон, США.

Scopus Author ID 14420403300, **Researcher ID** P-4406-2015, **ORCID ID** 0000-0002-9103-6599

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

Куприна Татьяна Васильевна 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

Tatyana V. Kuprina
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**

<i>М.А. Афанасьев, И.С. Тюремнов</i> АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ КОНСТРУКЦИЙ САМОХОДНЫХ ВИБРОПЛИТ	12
<i>С.С. Бусаров, М.А. Ращупкина, Д.Р. Марченко</i> ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН	26

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

<i>С.А. Аземша</i> МУЛЬТИМАРШРУТНЫЙ МЕТОД ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ.....	38
<i>А.П. Жигаadlo, П.В. Орлов, А.Ю. Шонин, И.А. Эйхлер</i> ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНО-ОБЩЕСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА «ПРИВОКЗАЛЬНЫЙ» В Г. ОМСКЕ	54
<i>И.Е. Ильина, Е.Е. Витвицкий</i> ИНДЕКСЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ В РЕГИОНАХ.....	68
<i>Е.Г. Кеян, А.Н. Мельников, О.А. Тамошина</i> ФОРМИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ	78
<i>А.В. Климов</i> ВЛИЯНИЕ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ НА КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОМ ПРИВОДЕ.....	90
<i>С.Н. Кривцов, А.К. Бычков</i> ПРЕЖДЕВРЕМЕННЫЕ ОТКАЗЫ ДВИГАТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ КАМАЗ С АККУМУЛЯТОРНОЙ ТОПЛИВОПОДАЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ	102
<i>А.А. Юнг</i> РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОЛИЧЕСТВА ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ С УЧАСТИЕМ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ МОБИЛЬНОСТИ	112

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

<i>Сират Джавед</i> РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТРУКТУР И СОСТАВА ПЕРСОНАЛА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПАНИЙ С УЧЕТОМ ЗАТРАТ	124
<i>Л.Д. Маилян, Н.О. Сизен</i> ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ	136
<i>И.А. Столетьева (И.А. Черепанова), В.С. Лесовик, Е.В. Фомина</i> КОМПОЗИЦИОННЫЕ ВЯЖУЩИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫВЕТРЕННЫХ КВАРЦИТОПЕСЧАНИКОВ КУРСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ.....	148

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Mikhail A. Afanasev, Ivan S. Tyuremnov

ANALYSIS OF DESIGN FEATURES OF VIBRATORY PLATE COMPACTORS..... 13

Sergey S. Busarov, Marina A. Rashchupkina, Dmitriy R. Marchenko

**STUDY OF WORKING PROCESSES OF RECIPROCATING
COMPRESSORS OF ROAD-BUILDING MACHINES..... 27**

PART II. TRANSPORT

Sergey A. Azemsha

MULTI-ROUTE METHOD OF WORK ORGANIZATION FOR TRANSPORT VEHICLES..... 39

Alexander P. Zhigadlo, Pavel V. Orlov, Anatoly Yu. Shonin, Ivan A. Eychler

**ASSESSMENT OF THE ORGANIZATION EXPEDIENCY
OF THE PUBLIC TRANSPORT COMPLEX "PRIVOKZAL'NYI" IN OMSK CITY 55**

Irina E. Ilyina, Evgeny E. Vitvitsky

INDICES FOR ASSESSING ROAD SAFETY LEVELS IN THE REGIONS OF RUSSIA..... 68

Ervand G. Keyan, Aleksey N. Melnikov, Olga A. Tamoshina

DETERMINATION OF AN EFFICIENCY PARAMETER FOR THE USE OF ELECTRIC VEHICLES..... 78

Alexander V. Klimov

**INFLUENCE OF THE CONTROL LAW ON OSCILLATORY PROCESSES
IN ELECTROMECHANICAL DRIVE..... 90**

Sergey N. Krivtsov, Alexey K. Bychkov

**PREMATURE ENGINE FAILURES OF KAMAZ VEHICLES WITH COMMON RAIL FUEL SUPPLY
SYSTEM IN REAL OPERATION..... 102**

A.A. Yung

**MATHEMATICAL MODEL DEVELOPMENT FOR PREDICTING THE NUMBER
OF ROAD TRAFFIC ACCIDENTS INVOLVING PERSONAL MOBILITY DEVICES 112**

PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Jawed Serat

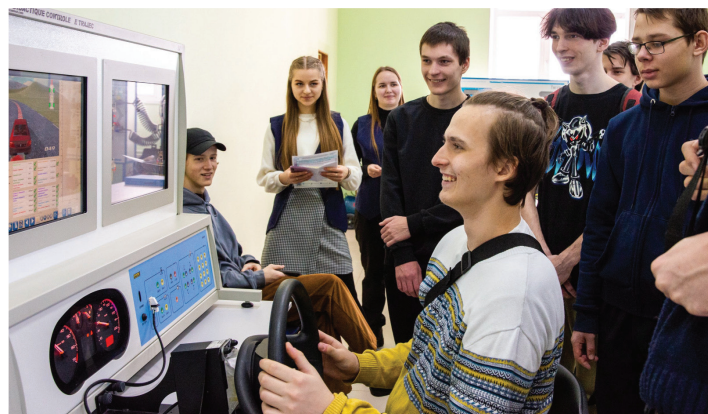
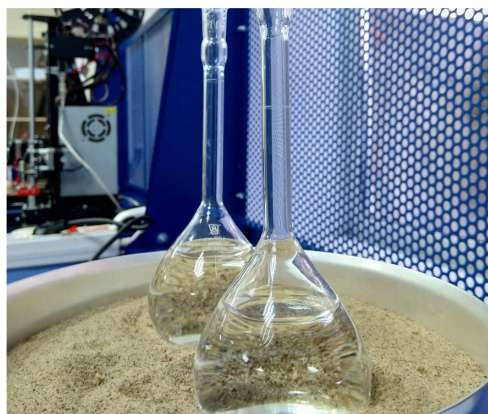
**DEVELOPMENT OF APPROACHES TO IMPROVING ORGANIZATION STRUCTURE AND STAFF
COMPOSITION OF CONSTRUCTION COMPANIES IN TERMS OF COSTS..... 124**

Lia D. Mailyan, Nikolai O. Sizen

**ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL LEVEL OF MAJOR REPAIRS
OF BUILDINGS AND STRUCTURES 136**

Irina A. Stoletova (Irina A. Cherepanova), Valery S. Lesovik , Ekaterina V. Fomina

**COMPOSITE BINDERS BASED ON WEATHERED QUARTZITE SANDSTONES
OF THE KURSK MAGNETIC ANOMALY..... 148**



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



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

Научная статья
УДК 625.76.08
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-12-25>
EDN: NTKBQI



АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ КОНСТРУКЦИЙ САМОХОДНЫХ 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 поверхностного действия, оснащенные плоским рабочим органом, который вводится в состояние колебательного движения при помощи вибровозбудителя. Разнообразие конструкций самоходных виброплит является одной из причин существенного разброса значений их основных параметров в соответствующих диапазонах масс. С целью совершенствования методик проектирования самоходных виброплит был выполнен анализ существующих конструкций и проанализировано их влияние на технические характеристики и технологические параметры самоходных виброплит.

Материалы и методы. В ходе исследования были изучены данные о конструкциях и технических характеристиках самоходных виброплит, представленные на сайтах и в сопроводительных материалах производителей, а также их дилеров. В общей сложности было рассмотрено 1137 моделей реверсивных и нереверсивных виброплит российских и зарубежных производителей.

Результаты. Выявлены конструктивные особенности промышленно выпускаемых самоходных виброплит, установлены диапазоны изменения их основных параметров. Проанализированы взаимосвязи компоновки самоходных (в том числе электрических) виброплит с их техническими характеристиками и расчетными схемами.

Заключение. Существенный разброс значений основных параметров реверсивных и нереверсивных виброплит отчасти связан с наличием у виброплит ряда конструктивных особенностей: количеством дебалансных валов, характером колебаний, типом трансмиссии и др. Большинство моделей нереверсивных виброплит при моделировании должны рассматриваться как двухмассные системы, содержащие рабочий орган и раму, соединенные упруго-вязкими связями. Ряд электрических виброплит представляет собой одномассную систему, что влияет на модели их взаимодействия с грунтом. Форма основания виброплиты оказывает влияние на значения контактных напряжений, количество циклов приложения нагрузки к одной точке грунта за один проход, глубину уплотнения и маневренность.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грунт, виброплита, уплотнение, вибрация, относительная вынуждающая сила, вынуждающая сила, виброплита нереверсивная, виброплита реверсивная, глубина уплотнения, ширина основания, длина основания

Статья поступила в редакцию 18.03.2024; одобрена после рецензирования 26.12.2024; принята к публикации 24.02.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Афанасьев М.А., Тюремнов И.С. Анализ особенностей конструкций самоходных виброплит // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 1. С. 12-25. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-12-25>

© Афанасьев М.А., Тюремнов И.С., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-12-25>

EDN: NTKBQI

ANALYSIS OF DESIGN FEATURES OF VIBRATORY PLATE COMPACTORS

Mikhail A. Afanasev ✉, Ivan S. Tyuremnov

Yaroslavl State Technical University,
Yaroslavl, Russia

✉ corresponding author
afanasiev.m.a2016@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Vibratory plate compactors are soil compaction machines with a flat operating device, which is put into a state of oscillatory motion by a vibration exciter. The variety of designs of vibratory plate compactors is one of the reasons for significant variations in their main parameters for the corresponding mass ranges. In order to improve the design methods for self-propelled vibratory plate compactors, an analysis of existing designs has been made. The impact of design on the technical characteristics of vibratory plate compactors has been analyzed.

Materials and methods. The study analyses data on the designs and technical characteristics of vibratory plate compactors, presented on the websites and in accompanying materials of manufacturers, as well as their dealers. A total of 1,137 models of reversible and forward vibratory plate compactors manufactured by Russian and foreign companies were reviewed.

Results. The design features of vibratory plate compactors have been identified, the ranges of their main parameters have been established. The relationship between the layout of self-propelled (especially, electric) plate compactors and their technical characteristics and analytical models has been analyzed.

Conclusion. The scattered main parameters of reversible and forward plate compactors are partly due to the design features of the plate compactors, such as number of unbalanced shafts, the nature of vibrations, the type of transmission, etc. Most of vibratory plate compactors must be considered as two-mass oscillation systems with elasto-viscous bonds when modeling. A number of electric plate compactors are single-mass oscillation systems, which affects the patterns of their interaction with the ground. The base plate shape influences the magnitude of contact stresses, the number of cycles of load applications to one point of soil in one pass, the compaction depth and maneuverability.

KEYWORDS: soil, plate compactor, compaction, vibration, relative driving force, driving force, forward plate compactor, reversible plate compactor, compaction depth, base plate width, base plate length

The article was submitted: 18.03.2024 approved after reviewing: 26.12.2024; accepted for publication: 24.02.2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Afanasev M.A., Tyuremnov I.S. Analysis of design features of vibratory plate compactors. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (1): 12-25. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-12-25>

© Afanasev M.A., Tyuremnov I.S., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Самоходные виброплиты (далее – виброплиты) – грунтоуплотняющие машины (ГУМ) поверхностного действия, оснащенные плоским рабочим органом, который приводится в движение при помощи вибровозбудителя¹. В отличие от других видов грунтоуплотняющих машин вибрационного действия, в виброплитах колебательное движение рабочего органа обеспечивает не только уплотнение грунта, но и перемещение машины.

Виброплиты классифицируются по следующим признакам [1]:

- по массе – сверхлегкие (до 100 кг), легкие (100...200 кг), средние (200...500) и тяжелые (свыше 500 кг);
- по способу передвижения – реверсивные и нереверсивные;
- по типу двигателя – бензиновые, дизельные и электрические;
- по способу управления – ручное и дистанционное.

Основными параметрами виброплит являются масса (M , кг), частота колебаний (f , Гц) и вынуждающая сила вибровозбудителя (P , кН). На эффективность уплотнения грунта также влияет ряд дополнительных параметров, к которым относятся мощность двигателя (N , кВт), длина (D , мм) и ширина (B , мм) основания, а также относительная вынуждающая сила P/Q , определяемая как отношение вынуждающей силы (P , кН) к весу виброплиты (Q , кН).

Для оценки результата уплотнения грунта виброплитами используются технологические параметры: коэффициент уплотнения грунта, глубина уплотняемого слоя и число проходов, необходимых для достижения требуемого коэффициента уплотнения.

Текущими направлениями совершенствования самоходных виброплит являются повышение их эффективности, улучшение безопасности для человека и окружающей среды, расширение функциональных возможностей, увеличение уплотняющей способности, а также повышение надежности основных деталей и узлов. Исходя из этого, современные исследования касаются вопросов повышения производительности и снижения стоимости виброплит [2, 3], защиты оператора от вибрации

[4], обеспечения самоходности и увеличения крутизны преодолеваемого уклона [5, 6, 7], а также возможности использования виброплит вблизи строений и подземных коммуникаций [8, 9]. Общим направлением развития всех основных типов грунтоуплотняющих машин является внедрение систем непрерывного контроля уплотнения. Как правило, такие системы рассматриваются применительно к вибрационным каткам² [10, 11, 12, 13, 14], однако те же принципы могут использоваться в системах непрерывного контроля уплотнения для виброплит [15].

Исследования показывают, что для существующих моделей виброплит наблюдается значительный разброс технических характеристик в соответствующих диапазонах масс [16, 17]. С одной стороны, такой разброс может быть связан с отсутствием у производителей общепринятых методик, позволяющих оценить влияние технических характеристик виброплит на результат уплотнения грунта в заданных условиях. В то же время отклонения некоторых параметров могут быть связаны с конструктивными особенностями отдельных моделей виброплит, что требует дополнительной проверки.

В исследованиях [16, 17] рассматривается влияние типа двигателя реверсивных и нереверсивных виброплит на их технические характеристики. Однако в указанных исследованиях не учитывается наличие у различных моделей виброплит конструктивных особенностей (форма основания, количество дебалансных валов, тип трансмиссии и др.), которые прямо или косвенно могут влиять на технические характеристики и технологические параметры виброплит.

Цель данного исследования – выявление конструктивных особенностей самоходных виброплит и определение их взаимосвязи с техническими характеристиками для совершенствования методики проектирования данного типа грунтоуплотняющих машин.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании использованы данные о технических характеристиках, технологических возможностях и конструктивных особенностях самоходных виброплит, пред-

¹ Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1975. 288 с.

² Kaufmann, K. & Anderegg, Roland. GPS-based Compaction Technology. Proceedings of the 1st International Conference on Machine Control and Guidance. 2008. 287–296.

ставленные на официальных сайтах и в информационных материалах производителей и их дилеров. Сортировка и обработка данных выполнена в программе Microsoft Excel.

При выполнении исследования были рассмотрены в общей сложности 1137 моделей самоходных виброплит, выпускаемые под 67 марками (Дунпарас, Enar, Lumag, Сплитстоун, Техком, Вибромаш, Huter, KOMAN, NTC, Красный маяк, Zitrek, Wacker Neuson, Impulse, Lifan, MBW, BOMAG, Husqvarna, Chicago Pneumatic, Mikasa и др.). Из этих моделей 55 произведены в странах СНГ (Россия, Белоруссия), 470 – на территории КНР и 612 – в других странах (Великобритания, США, Германия, Италия, Швейцария, Франция, Чехия, Япония, Южная Корея, Швеция, Испания, Израиль).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предварительный анализ заявленных технических характеристик самоходных виброплит показал, что рассматриваемые модели имеют различия по форме основания, количеству и расположению дебалансов вибро-

возбудителя, типу трансмиссии, а также типу двигателей. Более подробно влияние типа двигателя на технические характеристики реверсивных и нереверсивных виброплит рассмотрено в исследованиях [16, 17].

В зависимости от формы основания существуют виброплиты с прямоугольным (рисунок 1, а) и круглым основанием. Во втором случае основание виброплиты может иметь форму, близкую к окружности (рисунок 1, б) или быть лишь немного скругленной (рисунок 1, в). Однако, поскольку в обоих случаях используется одинаковая компоновка рамы и двигателя, в каталогах производителей оба варианта конструкции указываются как виброплиты с круглым основанием.

Следует также отметить, что все промышленно выпускаемые модели виброплит имеют плоское основание. В отдельных патентах³ предлагаются альтернативные варианты профиля опорной плиты, которые тем не менее до сих пор не нашли применения в серийно выпускаемых виброплитах.

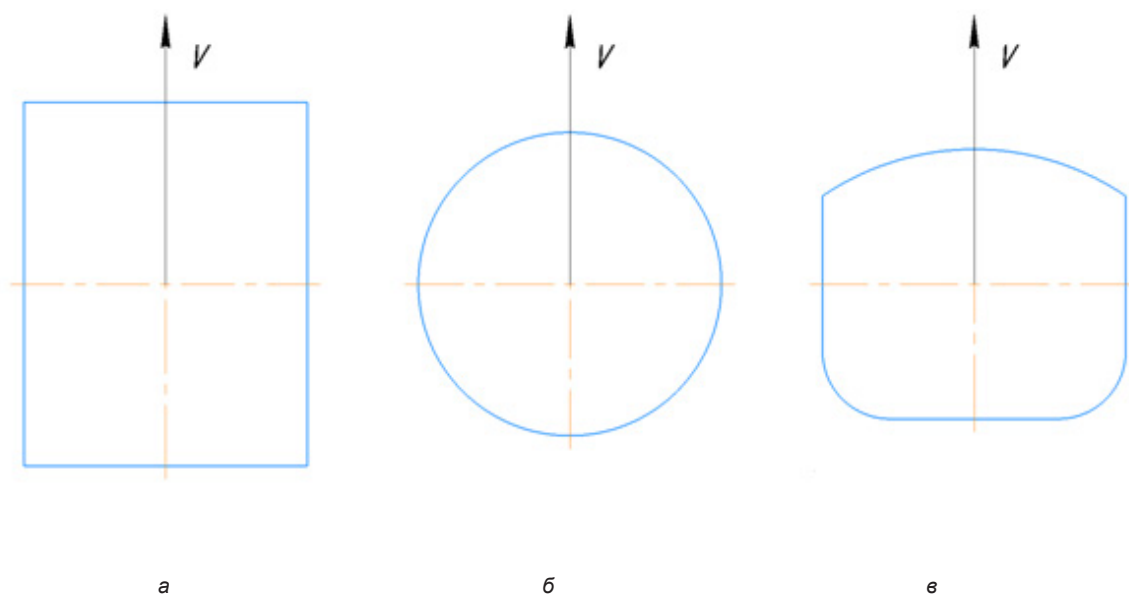


Рисунок 1 – Формы основания самоходных виброплит:
а – прямоугольная; б – круглая; в – круглая модифицированная
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Shapes of base plates of vibratory plate compactors:
a – rectangular; b – round; c – modified round
Source: compiled by the authors.

³ Beierlein, B. (1967). Tamping device (U.S. Patent No. 3,342,118)

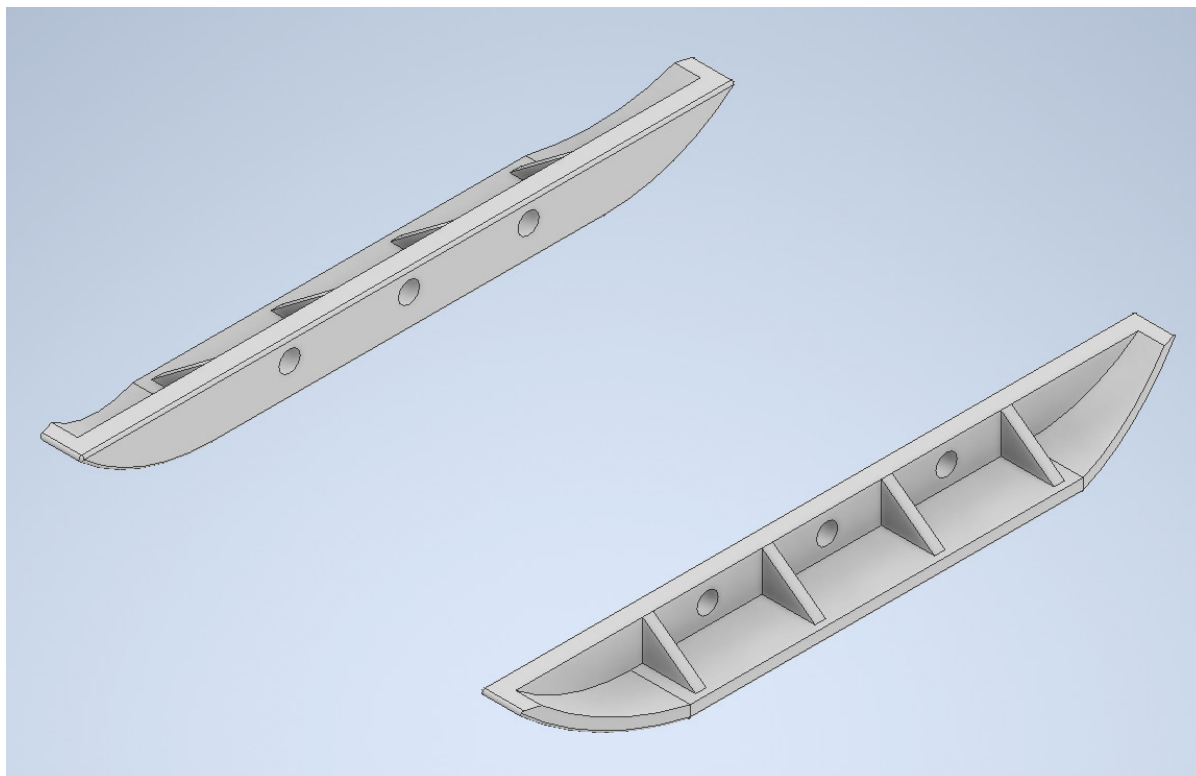


Рисунок 2 – Уширительные пластины для увеличения ширины основания виброплиты
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Extension plates to increase the width of plate compactors base plate
Source: compiled by the authors.

Среди реверсивных и нереверсивных виброплит наибольшее распространение получили модели с прямоугольным основанием (см. рисунок 1, а). В этом случае, при прямолинейном движении, по всей ширине основания виброплиты обеспечивается равное количество циклов приложения нагрузки к одной точке грунта за один проход.

Изменение размеров прямоугольного основания влияет на технологические возможности виброплиты сложным образом. Увеличение ширины основания, с одной стороны, позволяет увеличить ширину полосы уплотнения, а с другой – снижает значения контактных напряжений. Увеличение длины основания также снижает значения контактных напряжений, но при этом повышает количество циклов приложения нагрузки к одной точке грунта за один проход, что, в свою очередь, снижает требуемое количество проходов по одному следу. Интересно отметить, что для большинства существующих виброплит (как реверсивных, так и нереверсивных) габаритная длина основания превышает его ширину. При этом

многие модели реверсивных виброплит имеют возможность увеличения ширины основания за счет применения уширительных пластин (рисунок 2), которые крепятся к основной плите, что позволяет увеличить ширину полосы уплотнения, но также снижает значения контактных напряжений. Для отдельных моделей (Husqvarna LG 504, AMMANN APH 110/95, AMMANN APH 85/95, AMMANN APH 65/85 и др.) имеется возможность увеличения ширины основания до двух раз.

В отдельных случаях могут применяться специальные конструктивные исполнения виброплит. Так, для укладки тротуарной плитки и брусчатки могут использоваться виброплиты с роликовым основанием (Mikasa MVB-85M и др.). При уплотнении асфальтобетонных применяются виброплиты, оснащенные системой подачи воды к основанию (AMMANN APF 1033, ZITREK Z3K61W, TSS-WP90TL и др.). Для укладки плитки применяются виброплиты с возможностью крепления демфирующих коврик (Сплитстоун VS-244, Masalta MSR90 и др.).



Рисунок 3 – Неревверсивная виброплита Tremix KMR 11 с круглым основанием⁴

Figure 3 – Forward plate compactor Tremix KMR 11 with round base plate⁴

Недостатком виброплит с прямоугольным основанием является относительно низкая маневренность, что затрудняет их использование вблизи столбов и опор. По этой причине в линейках ведущих производителей виброплит представлены модели с круглым основанием (рисунок 3). Такие модели есть в линейках Chicago Pneumatic (модель KMR 11), Dynapac (LX90, D.ROUND), Husqvarna (LX90), Tremix (KMR 11), Weber MT (CFR90), BOMAG (BR95) и Wacker Neuson (BRS90 и ARS90e).

Главной отличительной особенностью данного типа виброплит является то, что длина и ширина основания здесь почти равны. При этом рукоять оператора располагается прямо над опорной поверхностью, что также облегчает маневрирование (в виброплитах с прямоугольным основанием рукоять вынесена за пределы опорной поверхности).

Ранние модели таких виброплит (Tremix KMR 11, Dynapac LX90, Chicago Pneumatic KMR 11, Husqvarna LX90) имеют полностью круглое основание (см. рисунок 1, б). Главным недостатком такой конструкции является то, что при прямолинейном движении количество циклов приложения нагрузки к одной точке

грунта распределяется по ширине основания неравномерно и при приближении к боковым кромкам стремится к нулю. По всей видимости, это привело к тому, что на более современных моделях виброплит (Dynapac D.ROUND, Weber CFR90, BOMAG BR95, Wacker Neuson BRS90 и Wacker Neuson ARS90e) основание имеет форму, представленную на рисунке 1, в.

Виброплиты с круглым основанием оснащаются однофазным возбудителем круговых колебаний и являются неревверсивными. Большинство моделей (Chicago Pneumatic KMR 11, Dynapac LX90, Dynapac D.ROUND, Husqvarna LX90, Tremix KMR 11, Weber MT CFR90, BOMAG BR95 и Wacker Neuson BRS90) оснащаются бензиновым двигателем, однако встречаются и электрические модели (Wacker Neuson ARS90e).

Анализ технических характеристик показывает, что вынуждающая сила и масса виброплит с круглым основанием соответствует усредненным значениям данных параметров для группы неревверсивных виброплит (рисунок 4). Аналогичная ситуация наблюдается для значений частоты колебаний и относительной вынуждающей силы.

⁴ TREMIX. Soil and Asphalt Compaction. Tremix, Satra, Sweden, 2007-12-19.

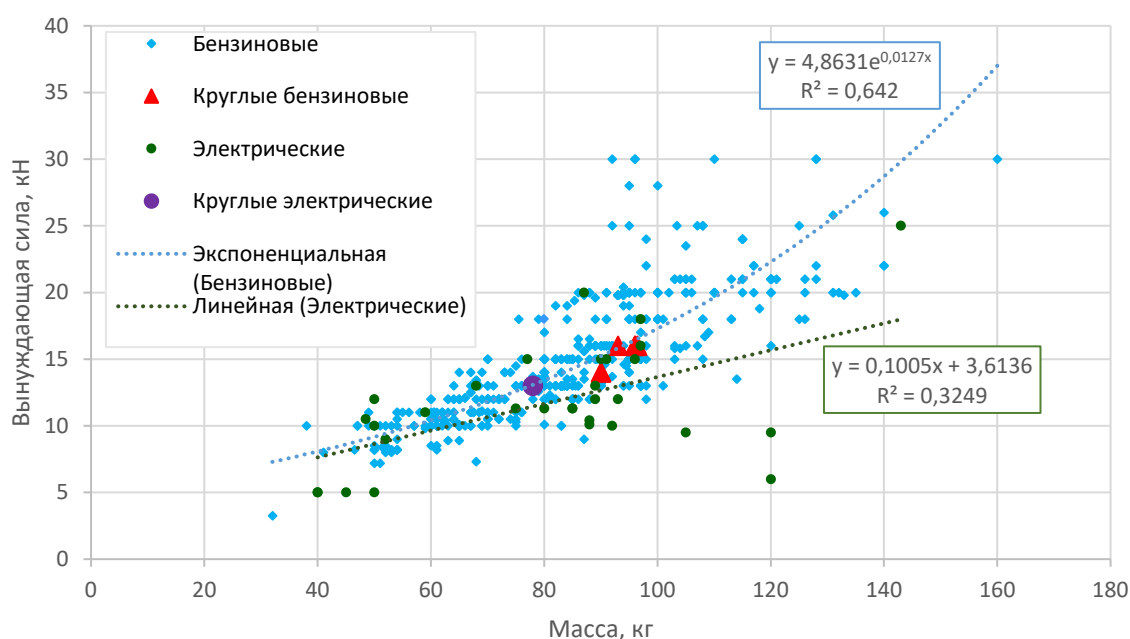


Рисунок 4 – Взаимосвязь массы и вынуждающей силы нереверсивных виброплит с круглым и прямоугольным основанием
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Correlation between mass and driving force of forward plate compactors with rectangular and round base plate.
Source: compiled by the authors.

При этом площадь контактной поверхности виброплит с круглым основанием несколько ниже, чем у виброплит с прямоугольным основанием с сопоставимыми значениями массы и вынуждающей силы. Таким образом, основные различия между виброплитами с круглым и прямоугольным основанием заключаются в технологических параметрах: количестве циклов приложения нагрузки к одной точке грунта за один проход (что обусловлено различной длиной оснований), значениях контактных напряжений и глубины уплотнения (что связано с различиями в размерах и площади оснований⁵), а также маневренности.

В зависимости от типа двигателя выделяют бензиновые, дизельные и электрические виброплиты. Исследования показывают, что наибольший разброс значений технических характеристик (в частности, значений вынуждающей силы, частоты колебаний и относительной вынуждающей силы) наблюдается для группы нереверсивных виброплит с электрическим двигателем [16]. Это связано

с наличием в этой группе как минимум трех вариантов конструкций, которые различаются передаточным отношением трансмиссии и расположением дебалансов.

Таким образом, применение электрического привода, помимо снижения уровня шума, уменьшения вредных для окружающей среды выбросов и более простой конструкции, открывает возможности для реализации большого количества компоновочных схем виброплиты. В частности, становится возможным использование индивидуального привода каждого из дебалансных валов в отдельности, например, за счет применения площадочных вибраторов общего назначения. При такой конструкции отпадает необходимость в трансмиссии, связывающей двигатель и вибровозбудитель (наличие которой оказывает влияние на упруго-вязкие свойства подвески виброплиты, поскольку двигатель внутреннего сгорания может быть установлен только на поддрессоренной раме).

⁵ Хархута Н.Я. Машины для уплотнения грунтов. Л.: Машиностроение, 1973. 176 с.

Таблица
Диапазоны изменения параметров различных типов виброплит
Источник: составлено авторами.

Table
Ranges of parameters for different types of plate compactors
Source: compiled by the authors.

Параметр	Тип виброплиты			
	Бензиновые	Электрические, стандартная компоновка	Электрические, вибратор общего назначения	Электрические, перед. число = 1
Масса плиты М, кг	32...160	40...212		
		48,5...212	40...85	50...120
Вынуждающая сила Р, кН	3,25...30	5...30		
		9...30	5...11,3	6...16
Частота колебаний f, Гц	60...126	47,5...112		
		81...112	50	47,5...60
Мощность двигателя N, кВт	1,4...6,3	0,25...4		
		0,6...4	0,25...0,9	1,5...2,2
Относительная вынуждающая сила Р/Q	10,35...33,24	5,1...24,46		
		11,08...23,43	10,19...15,36	5,1...24,46

Кроме того, потенциально отпадают ограничения по месту установки дебалансных валов на опорной плите, поскольку становится возможной синхронизация вращения дебалансных валов не механически, а за счет изменения управляющего сигнала, подаваемого на каждый электродвигатель в отдельности (в этом случае для коррекции управляющего сигнала требуется наличие сигнала обратной связи по фазовому положению каждого из дебалансных валов в отдельности)⁶. Все это существенно расширяет перспективы дальнейшего использования электрического привода в конструкциях самоходных виброплит и требует отдельного внимания.

Большинство промышленно выпускаемых моделей электрических неререверсивных виброплит имеют стандартную компоновку, при которой возбудитель круговых колебаний расположен в передней части опорной плиты, а передача крутящего момента от двигателя осуществляется с помощью ременной передачи с передаточным числом $u \leq 1$ (как правило, $u = 0,6 \dots 0,67$). Сам двигатель при этом установлен на раме с использованием демпферов. При такой конструкции технические характеристики виброплиты максимально приближены к значениям аналогичных параметров бензиновых виброплит сопоставимой массы

(таблица), а сама виброплита может рассматриваться как двухмассная система.

Неререверсивные электрические виброплиты производства РФ (модели Вибромаш ВУ-11-75, Вибромаш ВУ-04-40, Вибромаш ВУ-05-45, Красный маяк ВУ-05-45, Красный маяк ВУ-11-75, ЗУБР ЗВПЭ-5Г) оснащаются площадочными вибраторами общего назначения. При такой конструкции дебалансы расположены прямо на валу двигателя, а трансмиссия фактически отсутствует. В результате частота колебаний дебалансов соответствует частоте вращения вала двигателя и равна 50 Гц, что примерно в 2 раза ниже, чем у большинства неререверсивных виброплит с бензиновым двигателем сопоставимой массы. Снижение частоты колебаний также приводит к снижению значений вынуждающей силы и относительной вынуждающей силы.

Другой особенностью виброплит, оснащенных вибраторами общего назначения, является возможность регулирования статического момента и, как следствие, значения вынуждающей силы вибровозбудителя при фиксированной частоте колебаний. Регулировка осуществляется путем совмещения составных дебалансов по установочным отверстиям и позволяет изменять значение статического момента примерно в 2 раза (рисунок 5).

⁶ Malaschewski, A., Pinkert, M. (2018). Soil Compactor (DE 10 2017 109 686 A1

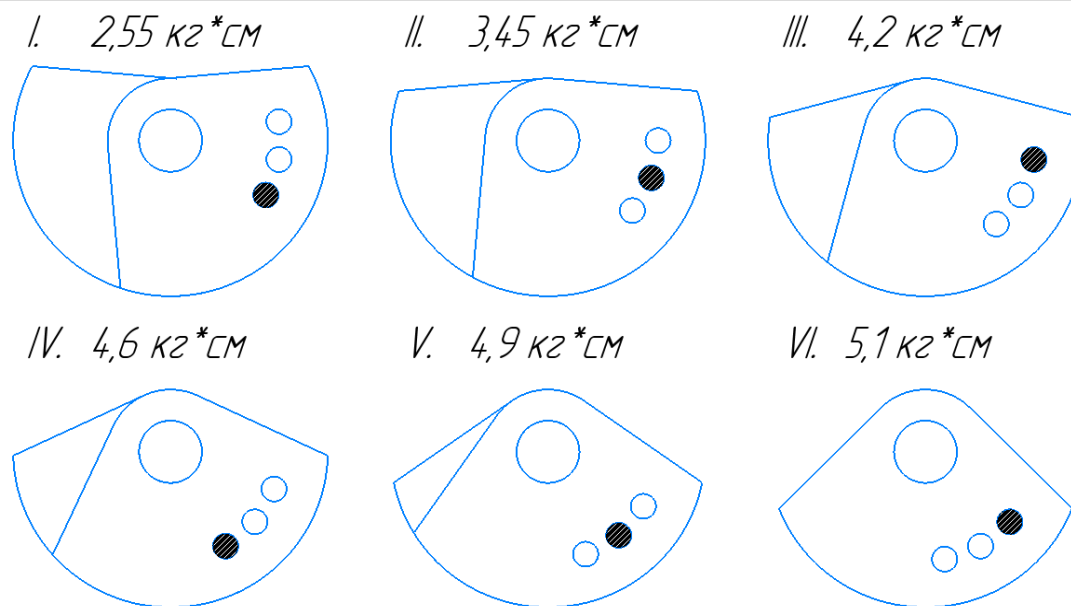


Рисунок 5 – Регулирование статического момента на примере вибровозбудителя ИВ-99Б (виброплита Красный маяк ВУ-05-45)
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Regulation of static moment of IV-99B vibration exciter (installed on plate compactor Krasniy Mayak VU-05-45)
Source: compiled by the authors.

Нереверсивные электрические виброплиты, выпускаемые компаниями МИСОМ (Белоруссия) и Belle (Франция), как и большинство нереверсивных виброплит, оснащаются отдельным вибровозбудителем, вынесенным в переднюю часть опорной плиты. При этом передаточное отношение трансмиссии в ряде моделей от этих производителей (МИСОМ СО-281, МИСОМ СО-325, МИСОМ СО-309, Belle PCLX 12/40E, Belle PCLX 16/45E) равно или близко к единице. В результате частота колебаний вибровозбудителя на указанных моделях находится в диапазоне 47,5–60 Гц.

Интересно отметить, что, несмотря на относительно низкую частоту колебаний, значения вынуждающей силы виброплит Belle PCLX 12/40E и Belle PCLX 16/45E находятся в диапазоне значений электрических виброплит со стандартной компоновкой в соответствующих диапазонах масс. Добиться таких показателей можно только увеличением статического момента дебаланса, однако это приводит и к увеличению амплитуды колебаний.

На рисунках 6, 7, 8, 9 приведены графические представления взаимосвязей технических характеристик электрических виброплит различного типа с их массой.

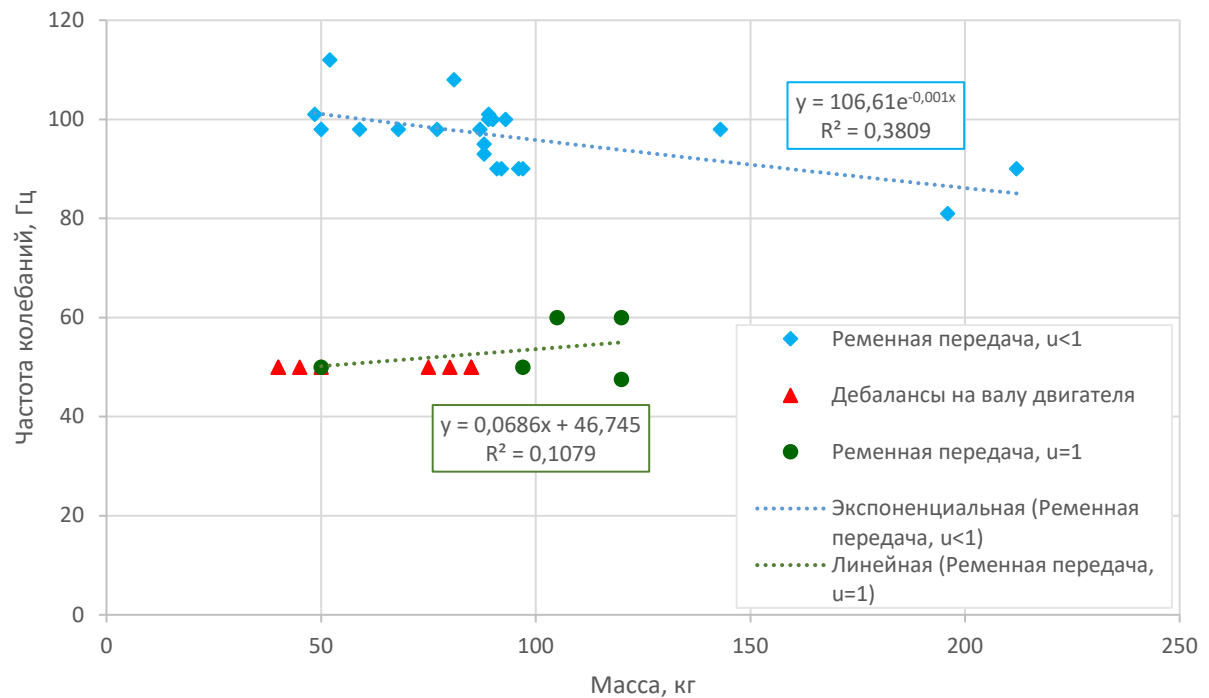


Рисунок 6 – Частота колебаний вибровозбудителя электрических виброплит различной массы
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Oscillation frequency of vibration exciter of electric plate compactors with different mass
Source: compiled by the authors.

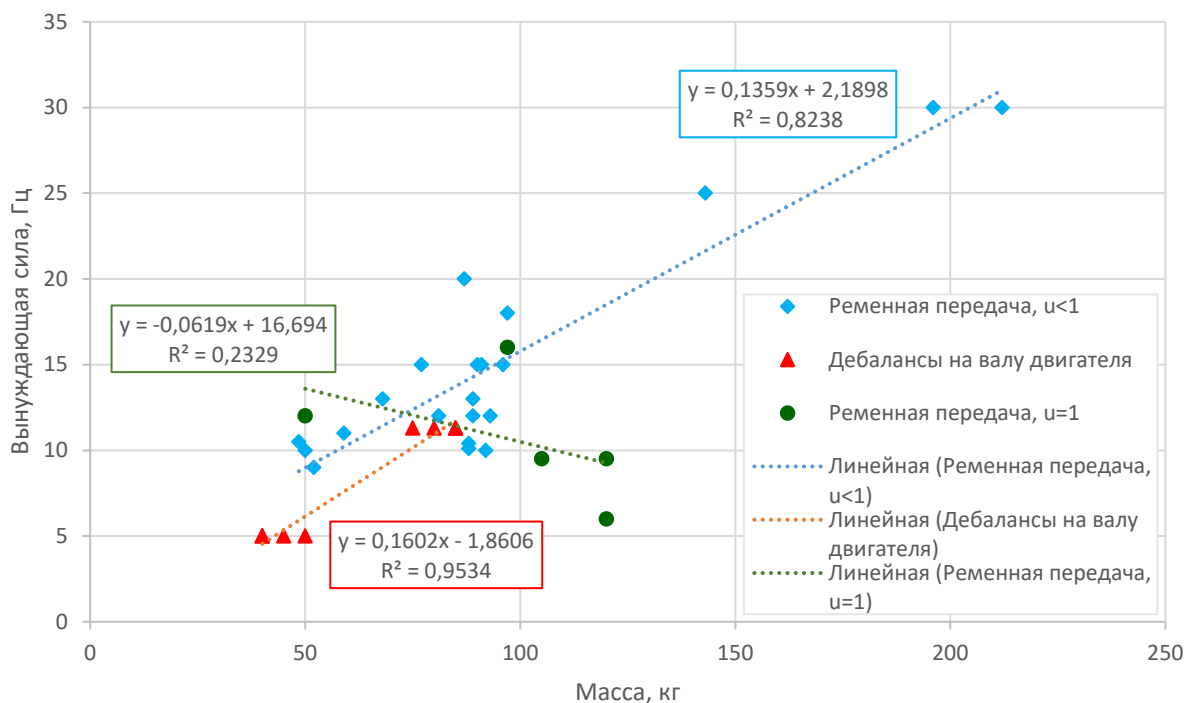


Рисунок 7 – Вынуждающая сила электрических виброплит различной массы
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Driving force of electric plate compactors with different mass
Source: compiled by the authors.

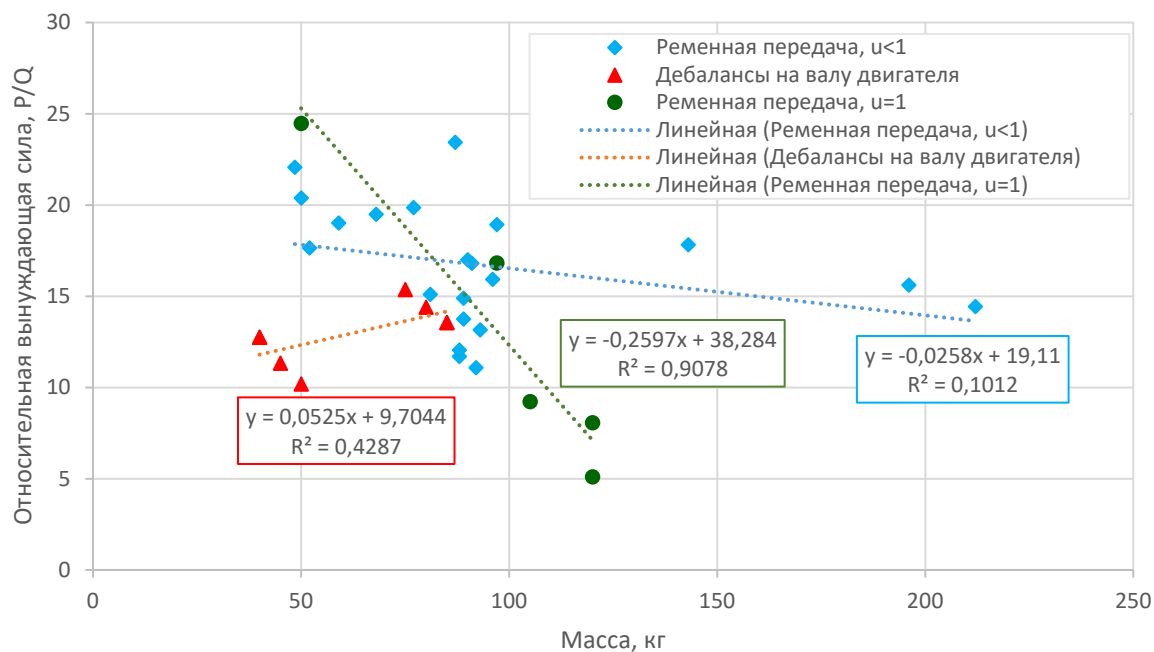


Рисунок 8 – Относительная вынуждающая сила электрических виброплит различной массы
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Relative driving force of electric plate compactors with different mass
Source: compiled by the authors.

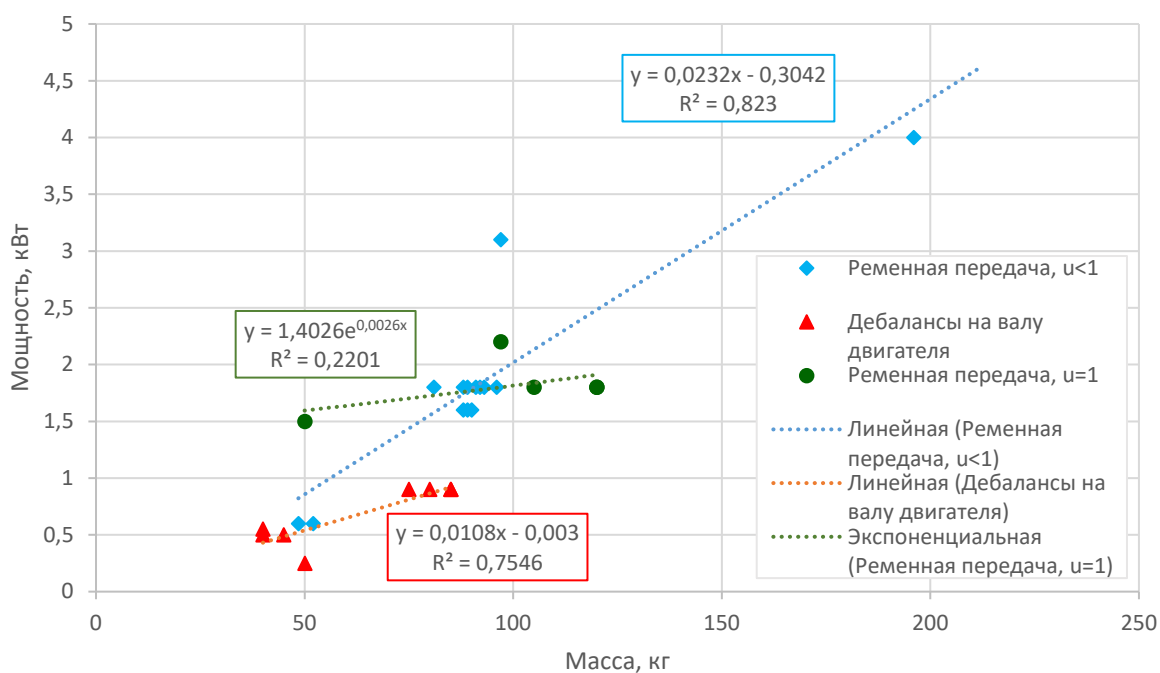


Рисунок 9 – Мощность электрических виброплит различной массы
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Engine power of electric plate compactors with different mass
Source: compiled by the authors.

Тип трансмиссии также взаимосвязан с техническими характеристиками виброплит. Все нереверсивные виброплиты (за исключением электрических моделей Вибромаш ВУ-11-75, Вибромаш ВУ-04-40, Вибромаш ВУ-05-45, Красный маяк ВУ-05-45, Красный маяк ВУ-11-75, ЗУБР ЗВПЭ-5Г) и значительная часть реверсивных виброплит оснащаются ременной передачей, что позволяет упростить конструкцию и снизить стоимость виброплит. На реверсивных виброплитах массой свыше 350 кг применяется гидравлический привод. Его использование обусловлено повышением мощности двигателя с увеличением массы виброплиты, что снижает ресурс трансмиссии в случае использования ременной передачи.

ОБСУЖДЕНИЕ

Наибольший разброс параметров наблюдается в группе электрических виброплит. Это связано с максимальным разнообразием используемых в них компоновочных решений. Электрические нереверсивные виброплиты со стандартной компоновкой (возбудитель круговых колебаний расположен в передней части опорной плиты, передаточное число ременной передачи $u < 1$) по большинству параметров (кроме мощности) соответствуют диапазону значений моделей с бензиновым двигателем. При этом у отдельных моделей низкие значения частоты колебаний компенсируются увеличением статического момента дебаланса, что позволяет повысить значение вынуждающей силы, но также приводит к увеличению амплитуды колебаний.

В общем случае виброплита может рассматриваться как рабочий орган, движение которого ограничивается двумя подвижными ограничителями. В качестве верхнего ограничителя выступает инерционное сопротивление рамы виброплиты с двигателем. В качестве нижнего ограничителя выступает деформируемый грунт. Рама воздействует на рабочий орган через амортизаторы (связи с линейными характеристиками: упругими и вязкими). Грунт представляет собой ограничитель с нелинейными связями, поскольку периодически может разрываться контакт грунта с рабочим органом виброплиты. Таким образом, виброплита при моделировании должна рассматриваться как двухмассная система с двумя ограничителями (или трёхмассная система, если учитывается присоединенная масса грунта). На некоторых моделях электрических виброплит дебалансы устанавливаются прямо на электродвигатель, жестко связанный с основанием, что приводит

к необходимости изменения расчетной схемы виброплиты, считая ее одномассной системой (или двухмассной, если учитывается присоединенная масса грунта).

Форма основания практически не оказывает влияния на технические характеристики виброплит, однако влияет на их технологические параметры (в частности, ширину полосы уплотнения, контактные напряжения и количество циклов приложения нагрузки к одной точке грунта за один проход). Виброплиты с круглым основанием предназначены для решения узкого перечня задач и применяются сравнительно редко. По этой причине производители задают технические характеристики круглых виброплит, соответствующие усредненным значениям для группы нереверсивных виброплит.

Тип трансмиссии выбирается производителями, исходя из массы виброплиты и мощности двигателя. Ременная передача позволяет снизить стоимость конструкции и применяется на сверхлегких, легких и средних моделях виброплит. Гидравлическая трансмиссия обладает более высоким ресурсом при повышенных значениях мощности двигателя и применяется преимущественно на тяжелых моделях. Возможна также конструкция без трансмиссии (дебалансы установлены непосредственно на валу приводного двигателя). Однако использование такой конструкции ограничено электрическими моделями со сравнительно низкими значениями вынуждающей силы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существенный разброс значений параметров, установленный в исследованиях [16, 17], частично связан с наличием у виброплит ряда конструктивных особенностей, влияющих на диапазоны значений параметров. В частности, это касается группы виброплит с электрическими двигателями, на которых могут применяться вибраторы общего назначения, совмещенные с двигателем, а также различные передаточные отношения трансмиссии. Различия в конструкции электрических виброплит приводят к более чем двукратному разбросу значений частоты колебаний, вынуждающей силы и относительной вынуждающей силы вибровозбудителя при сопоставимой массе виброплиты. Электрические виброплиты, оснащенные площадочным вибратором общего назначения, не отвечают установившимся в последние десятилетия тенденциям по увеличению значений частоты колебаний, вынуждающей силы и относительной вынуждающей силы [16, 17].

При проектировании легких и сверхлегких виброплит целесообразно использовать механическую трансмиссию ввиду ее дешевизны. Гидравлическая трансмиссия может быть использована при проектировании тяжелых неререверсивных виброплит, что позволяет повысить надежность конструкции. Для средних виброплит одинаково пригодна как механическая, так и гидравлическая трансмиссия.

Форма основания виброплиты не связана с ее техническими характеристиками, однако оказывает влияние на технологические параметры: глубину уплотнения, значения контактных напряжений, количество циклов приложения нагрузки к одной точке грунта за один проход, ширину полосы уплотнения и маневренность.

Собранные в ходе исследования данные целесообразно использовать при разработке и модернизации виброплит с различными конструктивными исполнениями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тюремнов И.С., Новичихин А.А. Уплотнение грунтов вибрационными плитами: монография. Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2018. 143 с.
2. Sawant, Rohan. (2021). Advance Equipment for Compaction on Site. 10.35291/2454-9150.2021.0099.
3. Massarsch, K. Rainer & Wersäll, Carl. (2019). Vibratory plate resonance compaction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*. 173. 1–30. 10.1680/jgeen.19.00169.
4. Кузьмичев В.Д. Математическая модель виброплиты // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2012. № 3(35). С. 65–68.
5. Рябов Г.К., Леонтьева В.С., Федосеев Ю.В. О механизме передвижения бесколесной виброплиты // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. 2012. № 3(96). С. 143.
6. Башкарев А.Я., Мусияко Д.В., Пешков В.С. Вибрационное перемещение поверхностного уплотнителя // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2013. № 1(166). С. 175–178.
7. Кузьмичев В.Д. Разработка динамической модели самоходной неререверсивной виброплиты // *Механика XXI века*. 2012. № 11. С. 39–45.
8. Czech, Krzysztof & Gosk, Wojciech. Impact of the Operation of a Tri-band Hydraulic Compactor on the Technical Condition of a Residential Building. *Applied Sciences*. 2019. 9. 336. 10.3390/app9020336.
9. Wang, Chaoyi & Qiu, Tong & Xiao, Ming & Wang, Jintai. Utility Trench Backfill Compaction Using Vibratory Plate Compactor versus Excavator-Mounted Hydraulic Plate Compactor. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2017. 8. 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000284.

10. Chen, Chen & Hu, Yongbiao & Jia, Feng & Wang, Xuebin. Intelligent compaction quality evaluation based on multi-domain analysis and artificial neural network. *Construction and Building Materials*. 2022. 341. 127583. 10.1016/j.conbuildmat.2022.127583.

11. Xu, Guanghui & Chang, George & Wang, Dongsheng & Correia, Antonio & Nazarian, Soheil. The pioneer of intelligent construction – An overview of the development of intelligent compaction. *Journal of Road Engineering*. 2022. 2. 10.1016/j.jreng.2022.12.001.

12. Fathi, Aria & Tirado, Cesar & Rocha, Sergio & Mazari, Mehran & Nazarian, Soheil. (2020). Assessing Depth of Influence of Intelligent Compaction Rollers by Integrating Laboratory Testing and Field Measurements. *Transportation Geotechnics*. 28. 100509. 10.1016/j.trgeo.2020.100509.

13. Yao, Yangping & Song, Er Bo. Intelligent compaction methods and quality control. *Smart Construction and Sustainable Cities*. 2023. 1. 10.1007/s44268-023-00004-4.

14. 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*. 2022. 31. 2775–2792. 10.3934/era.2023140.

15. Anderegg, Roland & Kaufmann, Kuno. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors. *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006. 10.1061/40803(187)41.

16. Афанасьев М.А., Тюремнов И.С. Статистический анализ технических характеристик самоходных неререверсивных 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.

17. 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.

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. Sawant, Rohan. Advance Equipment for Compaction on Site. 2021. 10.35291/2454-9150.2021.0099.
3. Massarsch, K. Rainer & Wersäll, Carl. Vibratory plate resonance compaction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*. 2019; 173. 1–30. 10.1680/jgeen.19.00169.
4. Kuz'michev V.D. Mathematical model of plate compactors. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2012; 3(35): 65–68. (in Russ.)
5. Ryabov G.K., Leont'eva V.S., Fedoseev YU.V. About the movement mechanism of wheelless vibro-

plate. Transactions of Nizhniy Novgorod state technical university N.A.R.Y. Alexeev. 2012; 3(96): 143. (in Russ.)

6. Bashkarev A.Ya., Musiako D.V., Peshkov V.S. Oscillatory motion of the plate compactor. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU*. 2013; 1(166): 175–178. (in Russ.)

7. Kuz'michev V.D. Development of dynamic model of self-propelled non-reversible vibratory plate. *Mechanics to the 21st century*. 2012; 11: 39–45. (in Russ.)

8. Czech, Krzysztof & Gosk, Wojciech. Impact of the Operation of a Tri-band Hydraulic Compactor on the Technical Condition of a Residential Building. *Applied Sciences*. 2019; 9: 336. 10.3390/app9020336.

9. Wang, Chaoyi & Qiu, Tong & Xiao, Ming & Wang, Jintai. Utility Trench Backfill Compaction Using Vibratory Plate Compactor versus Excavator-Mounted Hydraulic Plate Compactor. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2017; 8. 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000284.

10. Chen, Chen & Hu, Yongbiao & Jia, Feng & Wang, Xuebin. Intelligent compaction quality evaluation based on multi-domain analysis and artificial neural network. *Construction and Building Materials*. 2022; 341. 127583. 10.1016/j.conbuildmat.2022.127583.

11. Xu, Guanghui & Chang, George & Wang, Dongsheng & Correia, Antonio & Nazarian, Soheil. The pioneer of intelligent construction – An overview of the development of intelligent compaction. *Journal of Road Engineering*. 2022; 2. 10.1016/j.jreng.2022.12.001.

12. Fathi, Aria & Tirado, Cesar & Rocha, Sergio & Mazari, Mehran & Nazarian, Soheil. Assessing Depth of Influence of Intelligent Compaction Rollers by Integrating Laboratory Testing and Field Measurements. *Transportation Geotechnics*. 2020; 28. 100509. 10.1016/j.trgeo.2020.100509.

13. Yao, Yangping & Song, Er Bo. Intelligent compaction methods and quality control. *Smart Construction and Sustainable Cities*. 2023; 1. 10.1007/s44268-023-00004-4.

14. 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. 10.3934/era.2023140.

15. Anderegg, Roland & Kaufmann, Kuno. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors. GeoCongress 2006: *Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006. 10.1061/40803(187)41.

16. 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.

17. 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.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Афанасьев М.А. Сбор информации об особенностях конструкций самоходных виброплит, обработка данных, подготовка текста статьи.

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

COAUTHORS' CONTRIBUTION

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

Tyuremnov I.S. General design of the research, 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: 0009-0005-5095-2557,

SPIN-код: 8256-8500,

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

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

ORCID: <https://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 Machine Department, Yaroslavl State Technical University (88, Moskovskiy Proezd, Yaroslavl, 150023).

ORCID: 0009-0005-5095-2557,

SPIN-code: 8256-8500,

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

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

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

SPIN-code: 9976-0728,

e-mail: tyuremnovis@yandex.ru

Научная статья

УДК 621.51

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-26-36>

EDN: VIFXGV



ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

С.С. Бусаров¹, М.А. Ращупкина², Д.Р. Марченко¹¹Омский государственный технический университет (ОмГТУ),
г. Омск, Россия²Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье представлены исследования возможности повышения давления газа в одной ступени. Рассмотрены поршневые компрессоры дорожно-строительных машин, для которых, как и для любых мобильных станций, остро стоит вопрос снижения массогабаритных параметров технологического оборудования. В связи с этим цель работы – расширить диапазон давлений, получаемых в одноступенчатых поршневых машинах. Альтернативой применения существующих компрессоров со смазываемой проточной частью могут являться компрессоры с уплотнениями на основе фторопластовых композиций, не требующих жидкой смазки. В связи с этим актуальной задачей является определение диапазона отношений давлений с ограничением по температуре работы несмазываемых уплотнений. Повышение давления в одной ступени сжатия позволит значительно повысить эффективность передвижных компрессорных установок, в том числе и для дорожно-строительных работ

Материалы и методы. На основе разработанной математической модели сосредоточенными параметрами газа были проведены теоретические исследования по определению температуры цилиндропоршневых уплотнений компрессора. В статье представлены упрощающие допущения, принятые в математической модели, и система расчётных уравнений, основными из которых являются уравнение первого закона термодинамики, уравнение состояния, уравнение работы и уравнение для расчёта массовых потоков через неплотности рабочей камеры и клапаны.

Результаты. На основании теоретических исследований были получены диаграммы изменения средней температуры для одноступенчатых машин и для случая непродолжительной работы компрессора. Ограничение по температуре устанавливалось на уровне +200 °С, что характерно для исследуемых материалов на основе фторопласта.

Обсуждение и заключение. Были получены перспективные результаты, показавшие возможность расширения диапазона давлений в одноступенчатой машине. В случаях, когда не требуется соблюдения жёстких условий по температуре газа, в таких компрессорах отношение давлений может достигать 16. При этом объём ресивера может быть уменьшен до 44%. Рассмотрен также вариант с кратковременной работой компрессора от 15 до 45 мин, при этом диапазон отношения давлений может быть увеличен до 28...30, однако при этом время остывания компрессора составляет не менее 1 ч.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: поршневой компрессор, дорожно-строительные машины, отношение давлений в ступени, температура нагнетания, компрессоры без смазки, эффективность рабочего процесса, компрессоры периодического действия, математическая модель, упрощающие допущения, расчётные уравнения

Статья поступила в редакцию 27.11.2024; одобрена после рецензирования 16.01.2025; принята к публикации 24.02.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Бусаров С.С., Ращупкина М.А., Марченко Д.Р. Исследование рабочих процессов поршневых компрессоров дорожно-строительных машин // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 1. С. 26-36. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-26-36>

© Бусаров С.С., Ращупкина М.А., Марченко Д.Р., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-26-36>

EDN: VIFXGV

STUDY OF WORKING PROCESSES OF RECIPROCATING COMPRESSORS OF ROAD-BUILDING MACHINES

Sergey S. Busarov¹, Marina A. Rashchupkina², Dmitriy R. Marchenko¹

¹Omsk State Technical University,
Omsk, Russia

²Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. The article presents studies of the possibility of increasing gas pressure in one stage. Reciprocating compressors of road construction machines have been investigated, for which, as for any mobile stations, the issue of reducing the weight and size parameters of process equipment is acute. In this regard, the aim of the work was to expand the range of pressures obtained in single-stage piston machines. An alternative to the use of existing compressors with lubricated flow part can be compressors with seals based on fluoroplastic compounds that do not require liquid lubrication. In this regard, an urgent task is to determine the range of pressure ratios with a limitation on the operating temperature of non-lubricated seals. The increase of the pressure in one compression stage will significantly improve the efficiency of mobile compressor units, including applied for road construction works.

Materials and methods. Based on the developed mathematical model of concentrated gas parameters, theoretical studies were carried out to determine the temperature of the cylinder-piston seals of the compressor. The article presents simplifying assumptions adopted in the mathematical model and a system of calculation equations, the main among which are the equation of the first law of thermodynamics, the equation of state, the equation of work and the equation for calculating mass flows through leaks in the working chamber and valves.

Results. The diagrams of average temperature change for single-stage machines and for the case of short-term compressor operation were obtained on the basis of theoretical studies. The temperature limit has been set at +200 °C, which is typical for the studied fluoroplastic-based materials.

Discussion and conclusions. Promising results were obtained that showed the possibility of expanding the pressure range in a single-stage machine. In cases where strict conditions for gas temperature are not required, the pressure ratio in such compressors can reach 16. In this case, the receiver volume can be reduced to 44%. The option with short-term compressor operation from 15 to 45 minutes has also studied, where the range of the pressure ratio can be increased to 28 ... 30, but the compressor cooling time must not be less than 1 hour.

KEYWORDS: reciprocating compressor, road construction machines, pressure ratio in the stage, discharge temperature, compressors without lubrication, operation efficiency, periodic compressors, mathematical model, simplifying assumptions, calculation equations

The article was submitted: 27.11.2024; approved after reviewing: 16.01.2025; accepted for publication: 24.02.2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Busarov S.S., Rashchupkina M.A., Marchenko D.R. Study of working processes of reciprocating compressors of road-building machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (1): 26-36. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-26-36>

© Busarov S.S., Rashchupkina M.A., Marchenko D.R., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Сжатый воздух является источником энергии, применяемым в различных отраслях народного хозяйства. Часто сжатый воздух используется для привода различного пневмоинструмента дорожно-строительных машин. Для сжатия атмосферного воздуха чаще другого применяют поршневые компрессоры или винтовые. Параметры работы данного компрессора по давлению нагнетания редко превышают 0,9 МПа, а производительность лежит в пределах 10...50 м³/мин. Такие компрессоры устанавливают на прицепы или автомобильное шасси, приводом в этом случае чаще всего бывают двигатели внутреннего сгорания¹ [1, 2, 3, 4, 5].

Известны примеры передвижных компрессорных станций, установленных на автомобильные шасси с производительностью свыше 10² м³/мин, а также специальные воздушные и азотные автомобильные установки с давлением до 25,0–30,0 МПа).

Пневматические механизмы часто используются при строительстве и ремонте дорог, зданий и сооружений. Пневмопробойники и отбойные молотки применяются для бурения и разработки мерзлого грунта, бетонных и асфальтовых покрытий. Распылители используются для малярных и других строительных работ.

В настоящее время именно повышение давления в ступени компрессора является одним из перспективных направлений по увеличению производительности исполнительных механизмов. Повышение давления наиболее актуально для силовых исполнительных механизмов ударного действия, таких как станки ударно-вращательного бурения, машины для уплотнения грунта, отбойные молотки и многое другое. Поскольку рост давления приводит к увеличению мощности единичного удара, а следовательно, и к увеличению производительности дорожно-строительных машин. К тому же увеличение давления в одной ступени позволит сократить количество ступеней, что снизит стоимость оборудования и повысит его надёжность.

В условиях Сибири и Крайнего Севера, учитывая режимы работы компрессорного оборудования, наиболее перспективными являются конструкции поршневых компрессоров с бессмазочной проточной частью, позволяющие существенно повысить эксплуатационные характеристики компрессорного оборудования, так как отсутствие масла позволяет решить ряд перечисленных проблем. Данные компрессоры получили широкое распространение в различных отраслях техники благодаря высокому качеству сжатого газа, в котором отсутствуют примеси, главным образом масло.

Вопросы мобильности для таких станций являются приоритетными, поскольку снижение массы и габаритов возимого оборудования позволят повысить маневренность станций и несколько снизить расход топлива, что также может уменьшить габариты за счёт снижения массы возимого топлива.

Как известно, рабочий процесс поршневых машин неразрывно связан с наличием самодействующих клапанов, позволяющих работать компрессору на требуемом уровне давлений. Однако периодический выпуск газа из рабочей камеры приводит к непостоянному (пульсирующему) характеру потока сжатого газа. Это требует установки дополнительного оборудования – ёмкостей накопителей (ресиверов) для того, чтобы приводные механизмы работали при постоянном расходе газа.

Снижение массы ресиверов может стать возможным при увеличении давления газа, хранимого в нем, то есть при повышении конечного давления на выходе из компрессора.

Безусловно, ограничение по температуре газа в камере сжатия поршневого компрессора является главным фактором, приводящим к переходу на многоступенчатое сжатие² [6, 7, 8, 9, 10]. По этой причине отношение давлений в одной ступени сжатия поршневого компрессора редко превосходит значения – 5. Чаще всего эти ограничения связаны с наличием масла, для смазки цилиндропоршневой группы.

¹ Юша В.Л. Тенденции совершенствования воздушных и специализированных технологических компрессорных установок на базе автомобильных шасси, предназначенных для эксплуатации в условиях Сибири и Крайнего Севера // Автомобили. Специальные и технологические машины для Сибири и Крайнего Севера: материалы 59-й Международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ). Омск, 2007. С. 296–303.

² Plastinin, P. and Fedorenko, Sergei, "Simulation of Transient Gas-Temperatures in Cylinders of Reciprocating Compressors Using Identification Techniques With a Mathematical Model" (1978). International Compressor Engineering Conference. Paper 295. <https://docs.lib.purdue.edu/icec/295>.

Таблица
Характеристики самосмазывающихся материалов³
Источник: составлено авторами.

Table
Characteristics of self-lubricating materials³
Source: compiled by the authors.

Материал	Давление	Диапазон температур
Тигсон – высоко усовершенствованный фторопласт	Давление до 250 МПа	-200 °С ... +260 °С
Флубон – 20	Давление до 26 МПа	-260 °С ... +260 °С
Ф4К15	Давление до 17 МПа	-60 °С ... +260 °С

С развитием износостойких самосмазывающихся материалов на основе фторопласта – 4, возросло количество компрессорных установок с сухими камерами сжатия. Применение таких материалов в качестве уплотнений между поршнем и цилиндром не требует подачи смазки в цилиндр, что исключает его контакт с горячим газом. Характеристики таких материалов представлены в таблице.

Если принять некоторый запас по температуре и установить его на уровне + 200 °С, можно считать его расчётным для проведения последующих исследований. К тому же достижение тех температур, которыми ограничивается работоспособность уплотнений из фторопластовых композиций, наступает не сразу, а набор температуры происходит с течением времени. На этом принципе основана работа компрессоров периодического действия, что также необходимо учесть в расчётах. Из источников⁴ известно, что температура в зоне трения в данном случае может быть определена по температуре стенки. Все эти данные будут служить исходным материалом для проведения расчётов.

Необходимо также отметить, что данные рассуждения справедливы для компрессоров общего назначения, к которым относятся и агрегаты для дорожно-строительных машин. Для компрессорного оборудования, применяемого, например, в нефтегазовой отрасли, су-

ществуют жёсткие ограничения по температуре нагнетания в соответствии с нормативными документами. Соответственно ГОСТ не предусматривает отклонения, даже при наличии обоснования.

В настоящей работе не рассмотрены изменения геометрии деталей рабочей камеры, связанные с тепловым расширением. На данном этапе предполагаем увеличение и мёртвого пространства, и зазора в цилиндропоршневом уплотнении для компенсации тепловых деформаций металлических деталей.

Цель исследования – анализ работы модернизированных существующих двухступенчатых компрессоров дорожно-строительных машин в качестве одноступенчатых с бессмазочными уплотнениями рабочей камеры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Четырёхцилиндровый поршневой компрессор, диаметр цилиндра первой ступени 80 мм, ход 70 мм, частота вращения коленчатого вала 1500 об/мин, воздушное охлаждение цилиндров, температура всасывания 275...303 К. Сжимаемый газ – атмосферный воздух с температурой 293 К.

Методика численного эксперимента давно применяется для существующих быстроходных компрессоров. Данная методика изложена в работах П.И. Пластинына, Б.С. Хрустале-

³ Федосов А.В., Иванов О.А., Галышев А.А., Безпальчук С.Н. Модернизация испытательного оборудования для проведения трибологических испытаний пар трения, применяемых в судостроении // Повышение износостойкости и долговечности машин и механизмов на водном транспорте: труды V Международного симпозиума по транспортной триботехнике «Транстрибо - 2013». Санкт-Петербург, 2013. С. 261–266.

⁴ Там же.

ва⁵ [11, 12]. Данный метод получил название модели сосредоточенными параметрами газа. Принятые допущения этого метода: рабочее тело является непрерывным единого состава; параметры рабочего тела имеют одинаковое значение по всему контрольному объёму в один момент времени; не учитываются изменения потенциальной и кинетической энергии; пульсации давления в линиях всасывания и нагнетания не учитываются; учитывается только конвективная составляющая теплообмена; коэффициент теплоотдачи, рассчитываемый по рекомендуемым зависимостям, определяется и считается единым для всех внутренних поверхностей камеры сжатия.

Система расчётных уравнений описана в работах [13, 14, 15], в систему входит и уравнение первого закона термодинамики для тела переменной массы, уравнение состояния реального газа, уравнение Ньютона – Рихмана, уравнение массового баланса, уравнения динамики клапанов, уравнения движения массовых потоков через клапаны и зазоры и течения газа через клапаны и зазоры:

$$\frac{dU_j}{d\tau} = \frac{dL_j}{d\tau} - \frac{dQ_j}{d\tau} \pm \frac{dm_j \cdot i_j}{d\tau}, \quad (1)$$

$$P_j = \frac{m_j \cdot R \cdot U_j}{V_j \cdot C_{v,j}}, \quad (2)$$

$$dQ_j = \alpha_{np} (T_j - T_r) F \cdot d\tau, \quad (3)$$

$$U_j = U_0 + \int_0^j \frac{dU_j}{d\tau}, \quad (4)$$

$$m_j = m_0 + \sum_1^j dm_j \quad (5)$$

$$\frac{dL_j}{d\tau} = P_j \cdot S_D \cdot \frac{d^2 x}{d\tau^2}, \quad (6)$$

$$m_{nl} \cdot \frac{d^2 \vec{h}_j}{d\tau^2} = \vec{F}_{e,j} + \vec{F}_{np,j} + \vec{F}_{mp,j} + \vec{G}, \quad (7)$$

$$dm_i = \alpha \cdot \varepsilon_{p,j} \cdot f_j \cdot \sqrt{2\rho_{\Gamma,j} \cdot \Delta P_j} \cdot d\tau. \quad (8)$$

Обозначения в представленной системе уравнений: U – внутренняя энергия газа, Дж; dQ_j – тепловой поток, К; dL_j – работа, совершённая над газом или самим газом, Дж; dm_j – изменение массы газа в рабочей камере, кг; i_j – энтальпия газа, Дж/кг; R – газовая постоянная, Дж/К·кг; V_j – объём газа, м³; $C_{v,j}$ – объёмная теплоёмкость газа, Дж/м³·К; T_r – температура рабочего газа, К; T_j – температура поверхности, К; α_{np} – коэффициент теплоотдачи Вт/м²·К; m_j – текущая масса газа в рабочей камере, кг; α_j – коэффициент расхода; ε_{pj} – коэффициент расширения газа; ΔP_j – разность давлений газа до и после клапана или щели, Па; f_j – площадь проходного сечения в клапане, м²; ρ_j – плотность газа перед клапаном или щелью, кг/м³; m_{nn} – масса запорного элемента клапана, кг; h_j – текущая координата подъёма запорного органа, м; $F_{e,j}$ – газовая сила, Н; $F_{np,j}$ – сила упругости пружины, Н; G – вес запорного элемента клапана, принимаем равным нулю при горизонтальном расположении клапана, Н; $F_{mp,j}$ – сила трения газа, Н; τ – время, с; P_j – давление газа, Па; F – площадь теплопередающей поверхности, м²; S_D – площадь поршня м².

Для снижения влияния мёртвого объёма в конструкцию компрессора введён эластомерный диск, устанавливаемый на поршне [16, 17, 18, 19, 20]. Данная конструкция была испытана на экспериментальном стенде с идентичными параметрами ступени сжатия, повышение производительности составило до 12% в зависимости от режима работы компрессора.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведённые исследования позволили получить данные, представленные на рисунках 1, 2, 3, 4, 5.

⁵Luszczyski M, Cyklis P, Zelasko J. Developed Mathematical Model of the Self-Acting Valves of the Reciprocating Compressor and Its Application for Tongue Valves (1992) International Compressor Engineering Conference Paper 918. <https://docs.lib.purdue.edu/icec/918>.

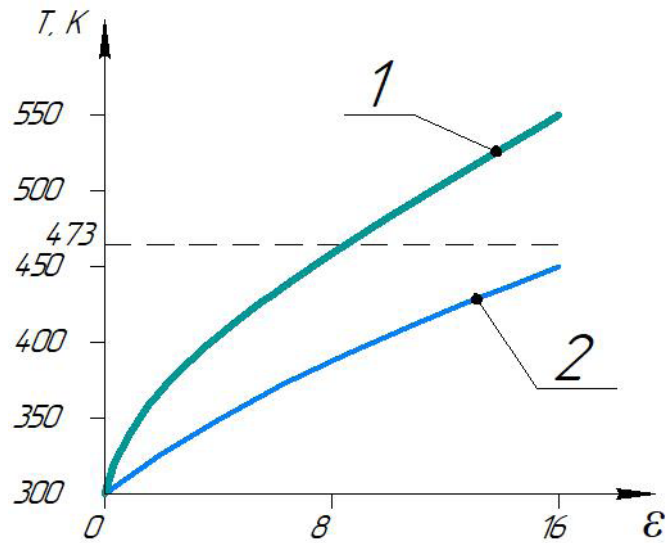


Рисунок 1 – Зависимость температуры газа на нагнетании (1) и зоны трения (2) от отношения давлений в ступени компрессора для температуры всасывания 275 K
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Dependence of the gas temperature at the discharge (1) and friction zone (2) on the pressure ratio in the compressor stage for a suction temperature of 275K
Source: compiled by the authors.

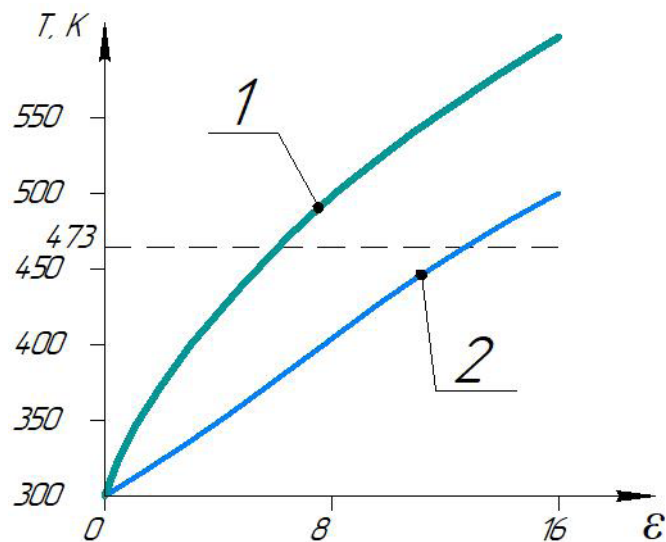


Рисунок 2 – Зависимость температуры газа на нагнетании (1) и зоны трения (2) от отношения давлений в ступени компрессора для температуры всасывания 303 K
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Dependence of the gas temperature at the discharge (1) and friction zone (2) on the pressure ratio in the compressor stage for a suction temperature of 303K
Source: compiled by the authors.

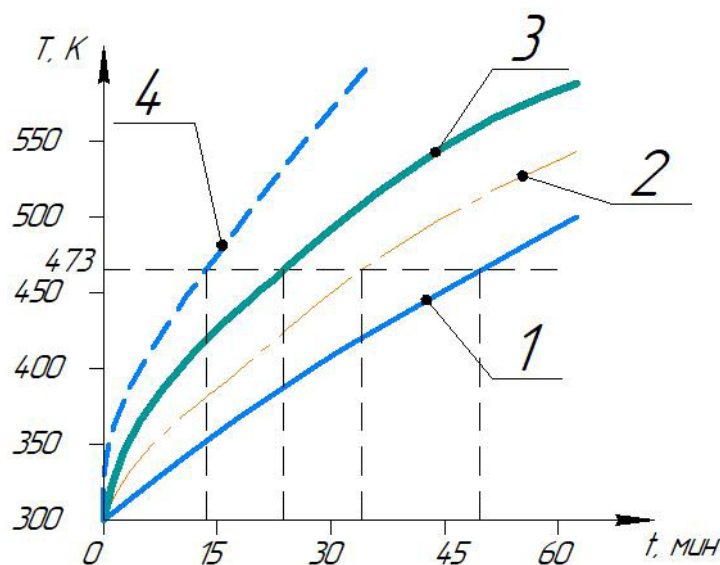


Рисунок 3 – Зависимость температуры газа на нагнетании от времени работы компрессора для температуры всасывания 275 при отношении давлений в ступени компрессора: 1–16; 2–20; 3–24; 4–28
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Dependence of the discharge gas temperature on the compressor operating time for a suction temperature of 275K at a pressure ratio in the compressor stage: 1–16; 2–20; 3–24; 4–28
Source: compiled by the authors.

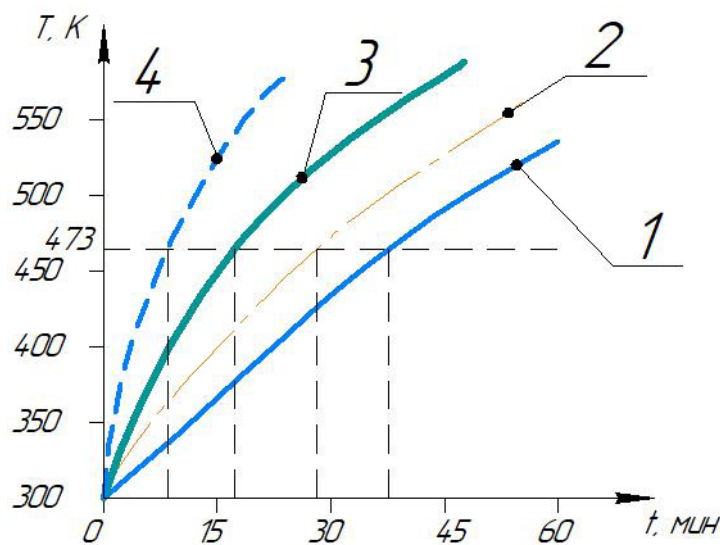


Рисунок 4 – Зависимость температуры газа на нагнетании от времени работы компрессора для температуры всасывания 303 при отношении давлений в ступени компрессора: 1–16; 2–20; 3–24; 4–28
Источник: получено автором.

Figure 4 – Dependence of the discharge gas temperature on the compressor operating time for a suction temperature of 303K at a pressure ratio in the compressor stage: 1–16; 2–20; 3–24; 4–28
Source: compiled by the authors.

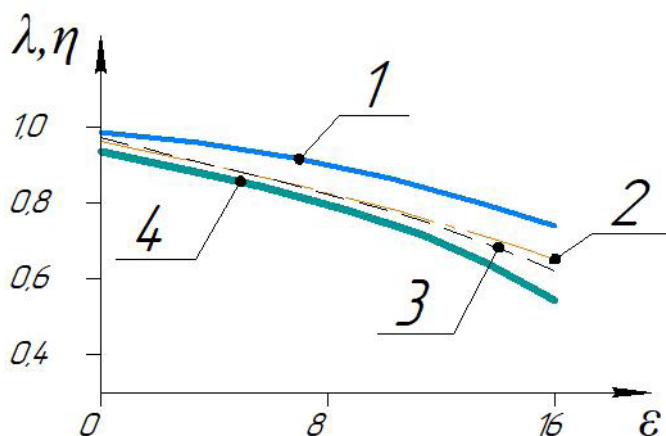


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента подачи (1,2) и индикаторного изотермического КПД (3,4) от отношения давлений в ступени компрессора для температуры всасывания 275 К (1,3) и 303 К (2,4)
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Dependence of the delivery coefficient (1,2) and the indicated isothermal efficiency (3,4) on the pressure ratio in the compressor stage for a suction temperature of 275 K (1,3) and 303 K (2,4)
Source: compiled by the authors.

Представленные графики температур газа и стенки (см. рисунки 1, 2) позволяют по температуре в зоне трения и принятом ограничении (+200 °С) расширить диапазон допустимых отношений давлений газа в одной ступени до 16. Необходимо заметить, что разница по температуре между газом и стенкой может составлять до 80 °С, поэтому применение более сложной модели по сравнению с расчётом, основанном на политропной зависимости, в данном случае обоснованно.

Таким образом, четырёхцилиндровый двухступенчатый компрессор может быть преобразован в одноступенчатый четырёхцилиндровый. Для того чтобы не менять базу, рассмотрим уменьшение диаметра цилиндров. Поскольку новое давление нагнетания составляет 1,6 МПа, а прежнее было 0,9 МПа, соответственно площадь поршня должна быть уменьшена на 44%. При этом вместо двух цилиндров у нас становится четыре, то есть практически при уменьшении диаметров цилиндров производительность не изменится. Поскольку производительность определяется объёмом газа, всасываемым в первую ступень компрессора, то возможно уменьшить диаметры четырёх цилиндров, чтобы обеспечить равноценную производительность по сравнению со схемой, имеющей два цилиндра большего диаметра. При повышении давления нагнетания на 44%, соответственно, в ресивере будет на 44% больше газа.

На рисунках 3, 4 представлена ещё одна возможность дальнейшего повышения давления в ступени при осуществлении кратковременной работы компрессора. Показано, что при непродолжительной работе компрессора, когда он ещё не вышел на стационарный режим работы, отношение давлений в одной ступени может достигать 30 при работе до 15 мин. Время остывания компрессора при этом обычно составляет 1,5–2 ч. Данные компрессоры носят название компрессоры периодического действия.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были также проанализированы показатели, характеризующие эффективность рабочего процесса, такие как коэффициент подачи и индикаторный изотермический КПД (см. рисунок 5). По сравнению с существующими машинами предложенная модернизированная конструкция с расширенным диапазоном отношений давлений несколько уступает по эффективности рабочего процесса. Если за допустимый уровень принять значение – 0,7 [11], то в новой конструкции значения коэффициента подачи и индикаторного не ниже 0,6 при давлении 1,6 МПа.

Проведённые исследования показали возможность расширения диапазона отношения давлений в одной ступени поршневого компрессора при реализации схемы сухой ра-

бочей камеры. Существующие материалы, применяемые для изготовления сухих цилиндропоршневых уплотнений, допускают режимы работы до + 200 °С и выше. Таким образом, при работе компрессоров общего назначения, когда отсутствуют жёсткие ограничения по температуре сжатого газа, давление нагнетания при всасывании из атмосферы может достигать 1,6 МПа. Это позволит на существующих базах и существующих габаритах ресиверов обеспечивать запас газа на 40 ... 45% больше, чем компрессора со смазкой проточной части. При этом падение эффективности рабочего процесса незначительно. Также был рассмотрен вариант работы такого компрессора в краткосрочном режиме (15...45 мин), при этом степень повышения давления может быть увеличена до 20 ... 30.

Проведённые исследования требуют дальнейшего исследования и анализа для разработки рекомендаций по проектированию бессмазочных компрессоров с расширенным диапазоном отношений давлений в ступени компрессора. Данное направление в настоящее время исследуется авторами применительно к компрессорному оборудованию передвижных установок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Котлов А.А., Бураков А.В. Математическое моделирование работы мобильной компрессорной станции при проведении ремонта линейной части МГП // Нефтегаз. 2021. № 3. С. 25–28.
2. Филатов А.А., Велиюлин И.И., Хасанов Р.Р., Шафиков Г.А. Повышение эффективности транспорта газа путем моделирования работы мобильной компрессорной станции // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2018. № 9. С. 62–66.
3. Юша В.Л. Уменьшение массогабаритных параметров теплообменного оборудования мобильных компрессорных установок // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2006. № 4. С. 24–26.
4. Юша В.Л. Системы охлаждения и газораспределения объёмных компрессоров. Новосибирск: Наука, 2006. 286 с.
5. Прилуцкий И.К., Казимиров А.В., Молодова Ю.И., Галяев П.О. Передвижные компрессорные станции. Перспективы развития // Компрессорная техника и пневматика. 2019. № 1. С. 24–30.
6. Юша В.Л. Теоретическая оценка эффективности применения одноступенчатых длинноходовых поршневых компрессоров в холодильной технике и системах сжижения углеводородов // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 1. С. 17–24. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-1-17-24. EDN: SWSUHV.
7. Юша В.Л., Бусаров С.С., Недовенчаный А.В. Анализ температурного режима тихоходной ступени при изменении соотношения времени прямого и обратного хода поршня // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2018. Т. 2, № 4. С. 21–26. DOI: <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2018-2-4-21-28>
8. John MacLaren, F. T., Kerr S.V., Trancheck A.B. "Modelling of compressors and valves / Proceedings Institute of Refrigeration. London/ 1974 – 1975.
9. Прилуцкий И.К., Молодова Ю.И., Галяев П.О., Сназин А.А., Молодов М.А., Иванова И.Л. Особенности процессов теплообмена в ступенях малорасходных машин объёмного действия с различными механизмами движения // Вестник Международной академии холода. 2017. № 4. С. 30–40. DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-4-30-40
10. Котлов А.А. Математический анализ работы двухступенчатого дожимающего компрессора, предназначенного для сжатия метана // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 4. С. 51–60. DOI: 10.18721/JEST.24.
11. Кузнецов Л.Г., Молодова Ю.И., Прилуцкий А.И. Повышение герметичности поршневых компрессоров и детандеров // Холодильная техника. 1999. № 9. С. 24–25.
12. Щерба В.Е., Дорофеев Е.А. Определение диапазонов основных эксплуатационных параметров поршневой гибридной энергетической машины с регенеративным теплообменом // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. № 11. С. 69–77. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-11-69-77.
13. Юша В.Л., Корнеев С.В., Бусаров С.С., Новиков Д.Г. Системы охлаждения компрессорного оборудования дорожно-строительных машин и автотракторной техники для эксплуатации в условиях Сибири и Крайнего Севера // Вестник СибАДИ. 2008. Вып. 7. С. 80–83.
14. Бусаров С.С., Васильев В.К., Бусаров И.С. [и др.] Параметрический анализ рабочих процессов тихоходных длинноходовых бессмазочных поршневых компрессорных ступеней на базе верифицированной методики расчёта // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2017. № 4 (154). С. 40–44.
15. Котлов А.А., Бураков А.В. Сравнительный анализ работы одноступенчатого поршневого компрессора, сжимающего различные газы // Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение». 2019. 3(4). 26–35. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2019-3-4-26-35>.
16. Бусаров С.С., Бакулин К.А. Повышение производительности бессмазочных малорасходных тихоходных поршневых компрессоров среднего и высокого давления // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 1. С. 82–90. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30104>.

17. Busarov S.S., Bakulin K.A., Sinicin N.G. Enhancing the performance of reciprocating compressors // *Chemical and Petroleum Engineering. Chem Petrol Eng* (2024). DOI doi.org/10.1007/s10556-024-01291-z.

18. Бусаров С.С., Синицин Н.Г. Создание многокамерных поршневых компрессоров // *Компрессорная техника и пневматика*. 2024. № 1. С.2–5.

19. Бусаров С.С., Недовенчаный А.В., Синицин Н.Г., Бакулин К.А. Перспективы повышения производительности поршневых компрессоров // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2023. Вып. 11. С. 579–580.

20. Недовенчаный А.В., Бакулин К.А., Синицин Н.Г. Применение многоцилиндровых компрессорных машин на базе малорасходных поршневых компрессорных ступеней на предприятиях непрерывного цикла производства // *Компрессорная техника и пневматика*. 2022. № 4. С.19–22.

REFERENCES

1. Kotlov A.A., Burakov A.V. Mathematical modeling of the operation of a mobile compressor station during repairs of the linear part of the MGP. *Neftegaz*. 2021; 3: 25–28. (in Russ.)

2. Filatov A.A., Veliyulin I.I., Khasanov R.R., Shafikov G.A. Increasing the efficiency of gas transportation by modeling the operation of a mobile compressor station. *Neftegaz*. 2018; 9: 62–66. (in Russ.)

3. Yusha V.L. Reducing the weight and size parameters of heat exchange equipment of mobile compressor units *Chemical and petroleum engineering*. 2006; 4: 24–26. (in Russ.)

4. Yusha V.L. Cooling and gas distribution systems of positive displacement compressors. Novosibirsk: Nauka, 2006: 286. (in Russ.)

5. Prilutsky I.K., Kazimirov A.V., Molodova Yu.I., Galyaev P.O. The stress-deformed state of reciprocating expander stage with non-metallic cylinder body. *Kompressornaja tehnika i pnevmatika*. 2019; 1: 24–30. (in Russ.)

6. Yusha V.L. Theoretical assessment of the effectiveness of application single-stage long-stroke piston compressors in refrigeration and hydrocarbon gas liquefaction systems. *Omsk Scientific Bulletin. Series «Aviation-Rocket and Power Engineering»*. 2024; Vol. 8, No. 1: 17–24. (in Russ.) DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-1-17–24. EDN: SWSUHV.

7. Yusha V.L., Busarov S.S., Nedovenchany A.V. The analysis of temperature regime of low-speed stage with change in ratio of time and return stroke of piston. *Omsk Scientific Bulletin. Series «Aviation-Rocket and Power Engineering»*. 2018; 2, No. 4: 21–26. (in Russ.) DOI: https://doi.org/10.25206/2588-0373-2018-2-4-21-28

8. John MacLaren F.T., Kerr S.V., Trammick A.B. “Modelling of compressors and valves. Proceedings Institute of Refrigeration. London. 1974–1975.

9. Prilutskiy I. K., Molodova Ju. I., Galyaev P. O., Snazin A. A., Molodov M. A., Ivanova I. L. Peculiari-

ties of heat exchange processes in the stages of small-scale machines of volume action with different mechanisms of movement. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2017; 4: 30–40. (in Russ.) DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-4-30-40

10. Kotlov A.A. Mathematical analysis of operation of a two-stage pressurized compressor designed to compress methane. *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*. 2018; 24(04): 51–60. (in Russ.) DOI: 10.18721/JEST.24405.

11. Kuznetsov L.G., Molodova Yu.I., Prilutsky A.I. Increasing the tightness of piston compressors and expanders. *Refrigeration Technology*. 1999; 9: 24–25. (in Russ.)

12. Shcherba V.E., Dorofeev E.A. Determination of the areas of the main operational parameters of a reciprocating hybrid power machine with regenerative heat exchange. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2022; 11: 69–77. (in Russ.) DOI: 10.18698/0536-1044-2022-11-69-77.

13. Yusha V.L., Korneev S.V., Busarov S.S., Novikov D.G. Cooling systems of compressor equipment of road construction machines and automotive equipment for operation in Siberia and the Far North. *Vestnik SibADI*. 2008; 7: 80–83. (in Russ.)

14. Busarov S.S., Vasiliev V.K., Busarov I.S. Parametric analysis of working processes of low-speed long-stroke lubrication-free piston compressor stages based on a verified calculation methodology. *Omsk Scientific Bulletin. Series: Devices, Machines and Technologies*. 2017; 4 (154): 40–44. (in Russ.)

15. Kotlov, A.A., Burakov, A.V. (2019). Comparative analysis of the operation of a single-stage piston compressor compressing various gases. *OMSK SCIENTIFIC BULLETIN. Series “Aviation, Rocket and Power Engineering”*, 3(4), 26–35. https://doi.org/10.25206/2588-0373-2019-3-4-26-35.

16. Busarov S.S., Bakulin K.A. Increasing the performance of lubrication-free, low-flow, low-speed, medium- and high-pressure reciprocating compressors. 2024; 30 (01): 82–90, DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.30104

17. Busarov S.S., Bakulin K.A., Sinicin N.G. Enhancing the performance of reciprocating compressors. *Chemical and Petroleum Engineering. Chem Petrol Eng*. 2024. DOI doi.org/10.1007/s10556-024-01291-z.

18. Busarov S.S., Sinitsin N.G. Creation of multi-chamber piston compressors. *Kompressornaja tehnika i pnevmatika*. 2024; 1: 2–5. (in Russ.)

19. Busarov S.S., Nedovenchany A.V., Sinit-syn N.G., Bakulin K.A. Prospects for increasing the productivity of piston compressors. *Izvestiya Tula State University” (Izvestiya TulGU)*. 2023; 11: 579–580. (in Russ.)

20. Nedovenchany A.V., Bakulin K.A., Sinit-syn N.G. Application of multi-cylinder compressor machines based on low-consumption piston compressor stages at continuous production enterprises *Kompressornaja tehnika i pnevmatika*. 2022; 4: 19–22. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Бусаров С.С. Разработка модели и анализ результатов (35%).

Ращупкина М.А. Разработка модели (35%).

Марченко Д.Р. Проведение обзора (30%).

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Busarov S.S. Development of the model and result analysis (35%).

Rashchupkina M.A. Development of the model (35%).

Marchenko D.R. Conducting the review (30%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бусаров Сергей Сергеевич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» Омского государственного технического университета (ОмГТУ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 11).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8894-0547>

SPIN-код: 4141-3733,

Scopus: 51560987400

e-mail: bssi1980@mail.ru

Ращупкина Марина Алексеевна – канд. техн. наук, доц., заведующая кафедрой «Промышленное и гражданское строительство» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644080, г. Омск, пр. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0643-6353>

SPIN-код: 7204-4378,

Scopus: 57207737192.

Марченко Дмитрий Романович – студент, кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» Омского государственного технического университета (ОмГТУ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 11).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7938-0151>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Busarov Sergey S. – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department “Refrigeration and Compressor Engineering and Technology” Omsk State Technical University (OmSTU) (11, Mira Avenue, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8894-0547>

SPIN-code: 4141-3733,

Scopus: 51560987400

e-mail: bssi1980@mail.ru

Rashchupkina Marina Al. – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department “Industrial and Civil Engineering”, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Mira Avenue, Omsk, 644080).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0643-6353>

SPIN-code: 7204-4378,

Scopus: 57207737192.

Marchenko Dmitry R. – student, Department of “Refrigeration and Compressor Engineering and Technology” Omsk State Technical University (OmSTU) (11, Mira Avenue, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7938-0151>

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT



МУЛЬТИМАРШРУТНЫЙ МЕТОД ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

С.А. Аземша

Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель, Республика Беларусь
s-azemsha@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Степень использования вместимости и времени работы маршрутных транспортных средств определяют эффективность работы пассажирского транспорта регулярного сообщения. Поэтому разработка мероприятий по повышению степени использования вместимости маршрутных транспортных средств, снижению их непроизводительных простоев являются актуальными для повышения окупаемости работы пассажирского транспорта регулярного сообщения и позволяют повысить эффективность его функционирования.

Причиной низкой степени использования вместимости маршрутных транспортных средств, высоких значений их непроизводительных простоев является неравномерность пассажиропотока. Существующий помаршрутный метод организации работы заключается в том, что маршрутные транспортные средства выпускаются на линию для работы на одном маршруте. Их количество, вместимость, интервал движения зависят от пиковых величин пассажиропотока. В межпиковое время, периоды дежурного движения количество пассажиров резко снижается, что приводит к снижению степени использования вместимости маршрутных транспортных средств. Для обеспечения приемлемых значений такой степени использования вместимости операторы перевозок увеличивают интервал движения за счет наращивания продолжительности непроизводительных простоев на конечных пунктах, что негативным образом сказывается на эффективности работы пассажирского транспорта регулярного сообщения.

Цель статьи – разработать новый метод организации работы маршрутных транспортных средств, позволяющий повысить эффективность работы пассажирского транспорта регулярного сообщения.

Материалы и методы. При написании статьи использовались методы анализа и обобщения литературных источников, положения теории графов, формализация и математическая постановка целевой функции и ограничений.

Выводы. Предложен мультимаршрутный метод организации работы маршрутных транспортных средств, заключающийся в оптимальном распределении ездов всех маршрутов рассматриваемой маршрутной сети между парком имеющихся маршрутных транспортных средств, позволяющий снизить их непроизводительные простои и повысить степень использования вместимости за счет наличия возможности работы маршрутных транспортных средств на разных маршрутах, что даст возможность уменьшить затраты на выполнение таких ездов.

Для оптимального распределения ездов всех маршрутов рассматриваемой маршрутной сети между парком имеющихся маршрутных транспортных средств такие ездки представлены в виде вершин аттрибутированного графа, а возможные активности между ездками (простои, порожние пробеги) – в виде дуг. Совокупность вершин и дуг такого графа представляют собой циклы, каждый из них является набором ездов, который должно выполнить маршрутное транспортное средство за время работы. Для выбора совокупности циклов, обеспечивающих минимальные затраты на выполнение всех ездов, была сформулирована соответствующая целевая функция. Для обеспечения соблюдения объективно существующих условий работы маршрутных транспортных средств на целевую функцию наложен ряд ограничений.

Возможность последующего использования результатов научной работы. Полученные результаты представляют собой целевую функцию и ограничения, позволяющие реализовать мультимаршрутный метод организации работы пассажирских транспортных средств. Они могут быть использованы для апробации на маршрутной сети конкретного города для повышения эффективности работы пассажирского транспорта регулярного сообщения за счет снижения затрат на его функционирование без ухудшения качества обслуживания пассажиров.

© Аземша С.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Практическое значение. Приведен мультимаршрутный метод организации работы пассажирских транспортных средств регулярного сообщения, позволяющий снизить себестоимость их работы за счет увеличения степени использования вместимости маршрутных транспортных средств и сокращения их непроизводительных простоев. Применение такого метода не ухудшает качество обслуживания пассажиров, поскольку не предусматривает отмену рейсов и (или) увеличение интервалов движения маршрутных транспортных средств.

Оригинальность. В данной статье предложен новый метод организации работы маршрутных транспортных средств, позволяющий снизить себестоимость их работы без ухудшения качества обслуживания пассажиров. Статья будет полезна для должностных лиц органов управления, ответственных за организацию работы городского пассажирского транспорта регулярного сообщения, а также работников предприятий городского пассажирского транспорта, ученых транспортной отрасли.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: маршрутное транспортное средство, городской пассажирский транспорт регулярного сообщения, пассажиронапряженность, коэффициент пассажиронапряженности, себестоимость перевозки, мультимаршрутный метод

Статья поступила в редакцию 05.12.2024; одобрена после рецензирования 12.12.2024; принята к публикации 24.02.2025.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: 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>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-38-53>

EDN: XJRPEO

MULTI-ROUTE METHOD OF WORK ORGANIZATION FOR TRANSPORT VEHICLES

Sergey A. Azemsha

Belarusian State University of Transport,
Gomel, Republic of Belarus
s-azemsha@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The degree of passenger capacity and operating time of route vehicles' utilization determine the work efficiency of regular passenger transport. Therefore, the development of measures to increase the effectiveness rate of passenger load factor use of route vehicles, to reduce its unproductive downtime is relevant to fasten the payback period of regular passenger transport and allows to enhance the efficiency of its operation.

The reason for low passenger load factor utilization of the route vehicles and high values of its inefficient downtime is the unevenness of passenger flow. The existing route-by-route method of work organization consists in the fact that vehicles go out on the line to one route. Its number, capacity, movement interval depend on peak values of passenger flow. During off-peak times, periods of on-duty traffic, the quantity of passengers decreases sharply, which leads to the declining in the degree of route vehicles' capacity utilization. To ensure the acceptable values of this passenger load factor use, transportation operators increase the traffic interval by extension of unproductive downtime duration at the end points, which affects negatively the efficiency of regular passenger transport.

The aim of the research is to develop a new method of organizing the work of route vehicles, which allows to increase the efficiency of regular passenger transport.

Materials and Methods. Methods of analysis and generalization of literary sources, the principles of graph theory, formalization and mathematical formulation of the objective function and constraints were used while writing.

Conclusions. A multi-route method of the work planning of route vehicles is proposed, which consists in the optimal distribution of trips of all routes of the considered route network between the fleet of available route vehicles, allowing to reduce its unproductive downtime and to increase the effectiveness rate of passenger load capacity

© Azemsha S.A., 2025



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

utilization due to the possibility of route vehicles' use on different routes, which will decrease the cost of such trips. For optimal distribution of trips of all routes of the considered route network between the fleet of available route vehicles, such trips are represented as vertices of the attributed graph, and possible activities between trips (idle time, empty runs) – as arcs. The set of vertices and arcs of such a graph represent cycles, each of which is a set of trips to be performed by a route vehicle during the operation time. In order to select a set of cycles, providing minimum costs for the carrying out all trips, the corresponding objective function was formulated. To ensure conditions objectively existing for route vehicles operation, a number of constraints were imposed on the objective function.

Potential Application of Research Results. The results obtained represent an objective function and constraints that enable the implementation of a multi-route method for organizing public transport vehicles' operation. Results can be applied to a city's transport network to improve the efficiency of regular public transport services by reducing operational costs without deterioration in the quality of the provided services for the passengers.

Practical Significance. The proposed multi-route method of work operation of regular public transport vehicles allows to shorten the operating costs by increasing the effectiveness rate of passenger load factor use and reducing unproductive idle times. This method does not diminish passenger service quality as it does not involve canceling trips and (or) prolongation of the intervals between vehicle routes.

Originality in academic context. This work presents a novel method for organizing the operation of public transport vehicles, which helps to cut the operational costs without compromising the service quality. The article will be useful for public transport governing officials responsible for organizing urban regular public transport, as well as employees of urban public transport enterprises and transport industry researchers.

KEYWORDS: route vehicle, regular urban passenger transport, passenger capacity, passenger load coefficient, transportation cost, multi-route method

The article was submitted: 05.12.2024; approved after reviewing: 12.12.2024¹²; accepted for publication: 24.12.2025.

The author has read and approved the final manuscript.

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

For citation. Azemsha S.A. Multi-route method of work organization for transport vehicles. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (1): 38-53. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-38-53>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время практика организации работы городского пассажирского транспорта регулярного сообщения (ГПТРС) подразумевает закрепление маршрутных транспортных средств (МТС) для работы на линии на каждом маршруте в отдельности. Основной недостаток такого помаршрутного метода организации работы заключается в том, что МТС постоянной вместимости работает в условиях изменяющейся величины пассажиропотока [1]. Компенсировать такую неравномерность приходится увеличением интервала дви-

жения, как правило, за счет роста времени непроизводительного простоя на конечных пунктах. Кроме того, отмеченная неравномерность пассажиропотока приводит к снижению наполняемости МТС, что в итоге негативным образом сказывается на окупаемости работы ГПТРС.

Эффективность функционирования ГПТРС можно оценивать величиной себестоимости оказанных им услуг. Влияние различных факторов на себестоимость выполнения одного пассажира-километра хорошо иллюстрируется выражением¹

$$S_p = \frac{1}{q_p \gamma_n} \left(3_{\text{км}} + 3_{\text{ч}} \left(v_t^{-1} + \frac{m_c t_{\text{оп}} + t_{\text{ок}}}{l_{\text{пс}}} \right) \right), \quad (1)$$

¹ Седюкевич В.Н., Андреев А.Я. Автомобильные перевозки грузов и пассажиров: учебное пособие. Минск: РИВШ, 2020. 328 с.

где q_p – пассажировместимость МТС, пасс.;
 γ_n – коэффициент использования пассажироместимости;
 $З_{км}$ – переменные затраты на 1 км пробега МТС, BYN/км;
 $З_ч$ – постоянные затраты на 1 ч работы МТС, BYN/ч;
 v_t – техническая скорость МТС, км/ч;
 m_c – количество остановочных пунктов;
 $t_{оп}$ – время нахождения МТС на остановочных пунктах, ч;
 $t_{ок}$ – время нахождения ТС на конечных станциях, ч;
 l_{pc} – средняя дальность поездки пассажира, км.

Из выражения (1) видно, что себестоимость перевозки растет с увеличением времени нахождения на конечных остановочных пунктах и снижением коэффициента использования пассажироместимости МТС. Поэтому для повышения эффективности функционирования ГПТРС необходимо разработать мероприятия, направленные на снижение непроизводительных простоев на конечных остановочных пунктах и повышение использования вместимости МТС.

Повышению эффективности работы ГПТРС в научной литературе уделено немало внимания. В работе [2] автор показывает целевую функцию, максимизирующую прибыль от работы МТС на маршруте [2, выражение (5)], и итерационным методом алгоритма Ньютона находит оптимальное значение интервала движения на маршруте, максимизирующее прибыль от перевозки [2, стр. 114]. В работе² авторы полагают, что величина затрат на эксплуатацию МТС зависит от совокупности условий работы на маршруте и фактического состояния МТС. В связи с этим они решают оптимизационную задачу распределения разных МТС по «графикам движения» с учетом сложности условий работы на маршруте и состояния МТС. В работе [3] автор строит модель, позволяющую определить оптимальное количество автобусов для работы на маршруте с точки зрения максимизации прибыли от перевозки [3, рисунок 4]. Для этого получена

формула, при помощи которой можно определить оптимальное, с точки зрения максимизации прибыли, число автобусов, работающих на маршруте [3, формула (15)], обоснована величина тарифа за перевозку [3, рисунки 5, 6]. В работе³ рассмотрена задача повышения эффективности функционирования МТС за счет распределения их разных типов по маршрутам с учетом спроса пассажиров. Авторы выделяют 4 типа МТС: троллейбусы, автобусы среднего класса, автобусы малого класса, автобусы особо малого класса. По результатам проведенного в несколько этапов комплексного обследования пассажиропотоков определяют максимальный суточный спрос пассажиров по каждому из типов МТС. Затем на базе функции полезности определяется перспективный спрос пассажиров на места в МТС каждого типа. После этого при помощи процессов Пуассона гибели и размножения автором определена матрица вероятностей перехода пассажиров между группами МТС. На ее основании определяется необходимое количество МТС каждого типа и их распределение по маршрутной сети с учетом минимизации суммарного пробега порожних мест. В работе [4] показан пример применения графоаналитического метода распределения автобусов разной вместимости для работы на маршруте по различным часам суток в зависимости от мощности пассажиропотока. За счет использования автобусов большой вместимости в пиковое время обеспечивается необходимая провозная возможность, а за счет применения автобусов малой вместимости в период спада пассажиропотока – приемлемый интервал движения. Аналогичный подход применен и в работе [5] для пригородного маршрута в г. Волгограде. В работе [6] также решается задача распределения автобусов разной вместимости по маршрутам их работы. По сути, авторы используют для этого известную транспортную задачу линейного программирования и симплекс-метод ее решения. Полученные результаты позволяют оптимальным образом закрепить автобусы за маршрутами. В работе [7] также решается задача распределения автобусов разной вместимости по маршрутам их работы. Подход,

² Максимов В.А., Крылов Г.А., Хазиев А.А. Учет условий эксплуатации при распределении городских автобусов по маршрутам движения // Сервис, техническая эксплуатация транспортных и технологических машин: межвузовский сборник научных трудов. Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2001. С. 162–166. EDN TPADLV.

³ Власов Ю.Л. Обоснование и рациональное распределение по маршрутам парка городского пассажирского транспорта: специальность 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта»: автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук / Власов Юрий Леонидович. Оренбург, 2006. 18 с. EDN NKHDQF.

предложенный в данной публикации, заключается в определении оптимальной вместимости МТС, работающего на каждом маршруте в каждый период времени, с последующим распределением имеющегося парка по этим маршрутам по критерию минимизации фактической вместимости от оптимальной. Такой подход фактически дублирует описанный в [6]. Схожий подход применен и в [8], где также решается задача распределения автобусов по маршрутам движения, только с учетом вреда окружающей среде. В работе [9] предлагается решением транспортной задачи распределить парк МТС по имеющимся маршрутам для минимизации эксплуатационных затрат на осуществление перевозок с учетом возраста МТС, условий эксплуатации, состояния производственно-технической базы и эффективной работы персонала. Предложенный метод оптимизации очень схож с предложениями [6, 7, 8]. Основные отличия заключаются в иной целевой функции, применяемой при постановке и решении оптимизационной задачи. Целью работы [10] является «удовлетворение спроса населения на перевозки по средствам выполнения минимально необходимой транспортной работы автобусами по городским регулярным маршрутам с использованием суточных планов интервалов движения» [10, с. 42]. Суточный план интервалов движения показывает, с каким интервалом планируется движение автобуса на маршруте по часам суток. Авторы приводят формулы расчета интервала движения на маршруте и необходимого количества автобусов на нем по каждому периоду планирования [10, выражение (1)], формулы максимального и минимального количества автобусов [10, выражение (2)]. Приведенная целевая функция и ограничения [10, выражение (5)] позволяют обеспечить постоянство значений числа автобусов для работы на маршруте. Еще в одной работе автор в комплексе решает ряд актуальных задач: проектирование маршрутов и оптимизацию транспортной сети, определение структуры и использования подвижного состава, нормирование пропускной способности остановочных пунктов, определение пассажирского спроса и моделирование

пассажиропотоков, диспетчерское управление движением⁴. По сути, автор предлагает методику расчета пассажирских корреспонденций, основанную на интеллектуальном анализе данных валидации электронных проездных документов. На основании полученных таким образом данных о корреспонденциях пассажиров автор оптимизирует маршрутную сеть и назначает на работу МТС оптимальной вместимости, а также формулирует предложения по оптимизации вместимости парка МТС. Вместе с тем, например, в [11, стр. 73] показано, что оптимизация приводит к изменению существующей маршрутной сети и, как правило, ущемляет интересы пассажиров на направлениях с малой мощностью пассажиропотока. В конечном счете это приводит к снижению качества обслуживания пассажиров и возможному отказу некоторой их части от пользования услугами ГПТРС. В работах [12, 13, 14, 15, 16, 17] авторы дают понятие непродуктивных затрат предприятий маршрутного пассажирского транспорта как времени непроизводительных простоев МТС на конечных остановочных пунктах⁵. Для снижения непродуктивных затрат авторы предлагают:

- эффективно использовать ресурс рабочего времени водителей в графике работ, режим использования рабочего времени путем реализации секторального метода, который позволяет организовать работу водителей таким образом, что это приводит к снижению непродуктивных затрат, ассоциированных с оплатой сверхурочных часов работ;
- управлять числом водителей, необходимых для выпуска транспортных средств на линию по заданному расписанию, для снижения непродуктивных затрат, ассоциированных с оплатой в повышенном размере работы водителей, привлекаемых к работе для компенсации неравномерности распределения водителей по сменам и числам месяца;
- управлять режимом использования рабочего времени организацией работы транспортных средств на маршрутах с целью минимизации времени дополнительной стоянки на станциях;

⁴ Фадеев А.И. Методология проектирования перевозок и управления наземным пассажирским транспортом общего пользования: дис. ... докт. техн. наук: 05.22.10 / А.И. Фадеев; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». Красноярск, 2021. 418 с.

⁵ Семченков С.С. Организация пассажирских перевозок автотранспортом посредством секторального метода работы водителей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / С.С. Семченков; Белорусский национальный технический университет. Минск, 2023. 26 с.

– управлять незапланированными простоями, связанными с ДТП, с целью снижения их продолжительности за счет создания при перевозчике службы, которая будет наделена полномочиями оформления ДТП без участия сотрудников ГАИ.

В работе [18] авторы предлагают реализовать мультимаршрутное планирование как метод «составления расписания для группы маршрутов с возможностью переключения транспортного средства между маршрутами» [18, с. 56–57].

Анализ таких публикаций позволил выявить:

- а) недостатки в каждой работе, например:
 - не учитывается вместимость работающего на маршруте МТС [2, 12, 13, 14, 15, 16, 17];
 - не учитывается то, что на маршруте могут работать МТС разной вместимости [3, 12, 13, 14, 15, 16, 17];
 - непонятно, как увязать работу МТС между расчетными часами, для которых производилась оптимизация закрепления автобусов за маршрутами [6, 7, 8, 9];
 - представляется, что описанная методика [12, 13, 14, 15, 16, 17] применима тогда, когда суммарное число имеющихся водителе-часов за месяц не меньше имеющихся часов работы за этот же месяц. Если общий месячный фонд рабочего времени водителей составляет, например 16000 ч, то при норме 160 ч в месяц необходимо 100 водителей, чтобы гарантировать возможность выполнения работ без сверхурочных. Если же реально на предприятии, например 90 водителей, то каждый из них в среднем отработает $16000/90 = 177,8$ ч, т.е. суммарная величина сверхурочных работ составит $(177,8-160) \cdot 90 = 1602$ ч. Величина оплаты за сверхурочные будет составлять $1602 \cdot 8 = 12816$ руб, где 8 – стоимость 1 ч сверхурочной работы. И она будет неизменна, от того каждый водитель переработал 17,8 ч за месяц или половина из них переработала 35,6 ч, а остальные вложились в отведенные по законодательству 160 ч в месяц;
 - равенство интервалов движения на маршруте 1 и 2 ($I_1 = I_2$) не может быть гарантией исключения эффекта Верньера, как это утверждают авторы [13, с. 28]. Такой гарантией может быть равенство интервалов движения между пассажирскими транспортными средствами, в том числе разных маршрутов, проходящих по одному и тому же участку, как это показано в [19];

– формализованное описание мультимаршрутного метода в [18] авторами не представлено;

б) общие недостатки для всех работ:

- не решается задача закрепления МТС за нулевыми рейсами;
- не учтены суточные колебания пассажиропотока, т.е. оптимизация производится для какого-то известного набора данных о пассажиропотоках, полученного за конечный период наблюдения (как правило, один день);
- не учтены в полной мере, а зачастую и вовсе, действующие нормы времени труда и отдыха водителей;
- рассматриваются отдельные маршруты и оптимизация работы на них, а не на всей маршрутной сети. Это позволит достигнуть локального экстремума целевой функции для каждого маршрута, но не гарантирует достижения глобального экстремума для всей маршрутной сети.

Для повышения эффективности работы ГПТРС в работе [20] показана необходимость разработки научного инструментария для оптимизации закрепления МТС за рейсами с учетом пассажиронапряженности на них и ее колебаний, а также других ограничений. В качестве такого инструментария предполагается использовать мультимаршрутный метод.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При написании статьи использовались методы анализа и обобщения литературных источников, положения теории графов, формализация и математическая постановка целевой функции и ограничений.

Для описания и формализации мультимаршрутного метода использованы следующие условные обозначения:

Множества.

V – множество вершин графа (всех ездов);

$V1$ – множество возможных первых нулевых ездов;

$V2$ – множество ездов с пассажирами;

$V3$ – множество возможных вторых нулевых ездов;

$V = V1 + V2 + V3, |V1| = |V2| = |V3|$;

D – множество дуг графа (вариантов перехода между ездами МТС);

A – атрибуты вершин графа;

B – атрибуты дуг графа;

M – множество рассматриваемых маршрутов работы МТС;

H – множество начальных пунктов рассматриваемой маршрутной сети, а также место постоянной дислокации (МПД) МТС;

K – множество конечных пунктов рассматриваемой маршрутной сети, а также МПД МТС;

T – множество МТС;

P – множество простых цепей графа G .

Переменные.

v, u – вершины графа;

d – дуга графа;

m – номер маршрута работы МТС;

t_n – время начала ездки (отправления с начального пункта маршрута);

t_k – время окончания ездки (прибытия на конечный пункт маршрута);

Π – пассажиронапряженность, пасс;

L – расстояние, км;

$v_{\text{эт}}$ – эксплуатационная скорость движения МТС между начальными (конечными) пунктами маршрутов без остановок на промежуточных остановочных пунктах $v_{\text{эт}} = 30$ км/ч;

t_3 – время запаса. Рассчитывается как разница во времени отправления МТС с начального пункта и временем его прибытия в этот начальный пункт ($t_3 = 0,1$ ч);

t – МТС;

C – вместимость МТС;

k – количество дуг в цепи P графа G ;

$S_{\text{км}}$ – себестоимость 1 км пробега МТС, руб. / км;

$S_{\text{ч}}$ – себестоимость 1 ч простоя МТС, руб. / ч;

i, e, a – индексы;

$K_{\text{пр}}$ – коэффициент приведения себестоимости часа простоя МТС к себестоимости часа его в движении;

Тр – режим труда и отдыха водителя (продолжительность рабочего дня, наличие и продолжительность обеденных перерывов и отстоев на конечных пунктах и т.д.);

Тз – режимы труда и отдыха, соответствующие *требованиям законодательства*;

– максимально допустимый коэффициент использования вместимости на участке с наи-

большей мощностью пассажиропотока. Рекомендуются.

Рисунок 1 показывает график работы МТС на трех маршрутах:

– маршрут 1 – нитки движения МТС обозначены черным цветом;

– маршрут 2 – нитки движения МТС обозначены красным цветом;

– маршрут 3 – нитки движения МТС обозначены синим цветом.

На каждом маршруте работает три МТС, нитки движения которых обозначены линиями различного типа – сплошного, штрихового, штрих-пунктирного. При этом рисунок 1, а показывает график работы МТС при существующем (помаршрутном) методе организации работы МТС, а рисунок 1, б – при предлагаемом (мультимаршрутном) методе.

Видно (см. рисунок 1, б), что при мультимаршрутном методе организации работы МТС 2 на маршруте 1 заканчивает езду в 7:22. Следующая ездка этого МТС в обратном направлении на этом маршруте в 7:32. Вместо 10-минутного ожидания такой ездки, данное МТС выполнит езду на маршруте 2, предусмотренную для выполнения МТС 3. Время начала этого рейса в 7:29, т.е. выполнение с одного и того же конечного пункта ездки на другом маршруте позволяет исключить непроизводительный простой, равный 3 мин. Далее, выполнив езду по маршруту 2 (окончание в 8:02), МТС не ожидает начала следующей ездки на этом маршруте (8:10), а выполняет с этого же конечного пункта езду на маршруте 3, которая начинается в 8:03, что позволяет сэкономить 7 мин. После этого МТС выполняет езду в обратном направлении на этом же маршруте, прибыв на конечный пункт в 8:59. Следующая ездка на этом маршруте для данного МТС (МТС 2) предусмотрена расписанием движения в 9:14, что предполагает 15-минутное ее ожидание. Поэтому МТС 2 выполняет езду на этом же маршруте 3, предназначенную для МТС 1, началом в 9:00 (экономия 14 мин).

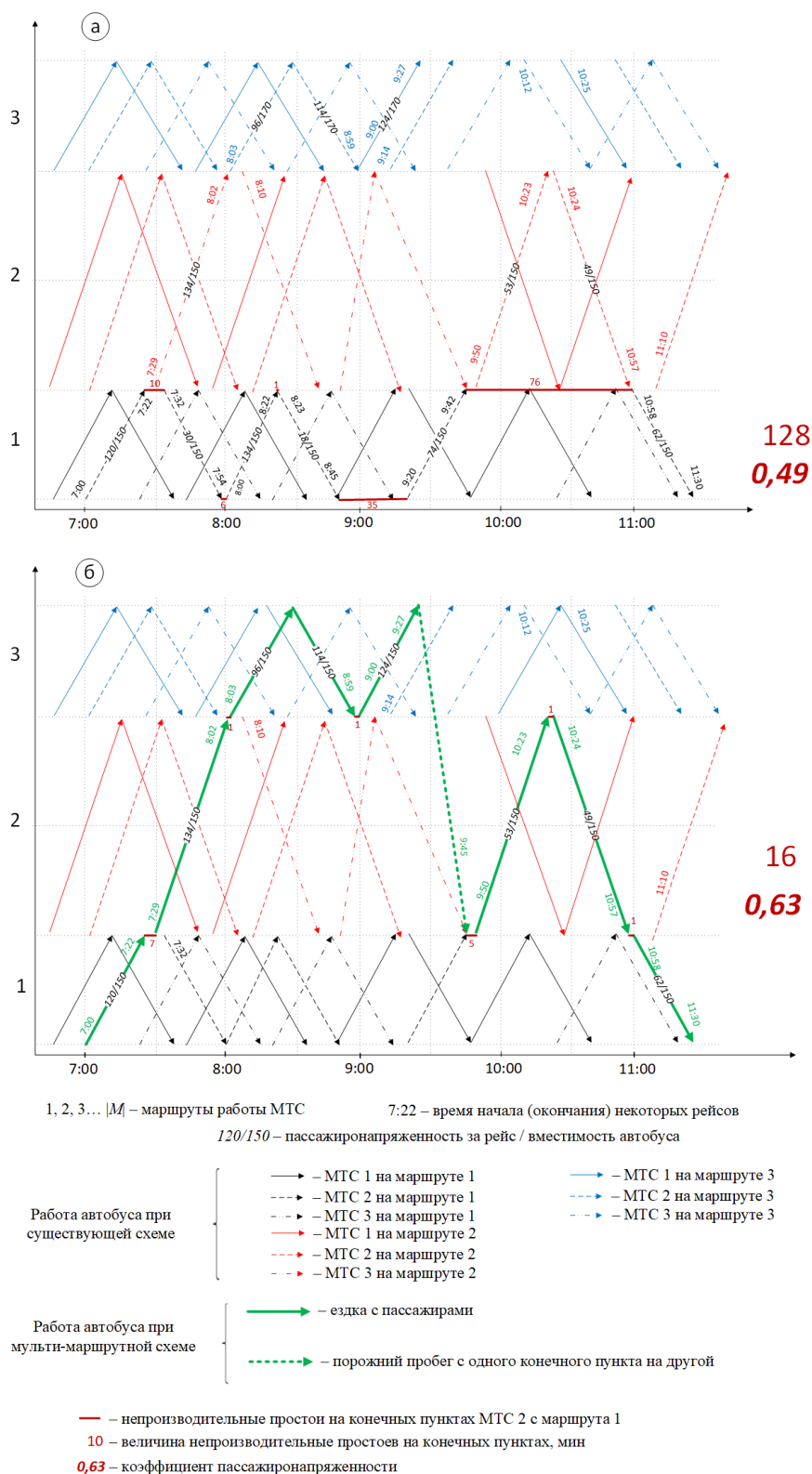


Рисунок 1 – Описание мультимаршрутного метода организации работы МТС:
 а – существующий помаршрутный; б – предлагаемый мультимаршрутный метод
 Источник: составлено автором.

Figure 1 – Description of the multi-route method of transport vehicles' operation:
 а – existing route-by-route method; б – proposed multi-route method
 Source: compiled by the author.

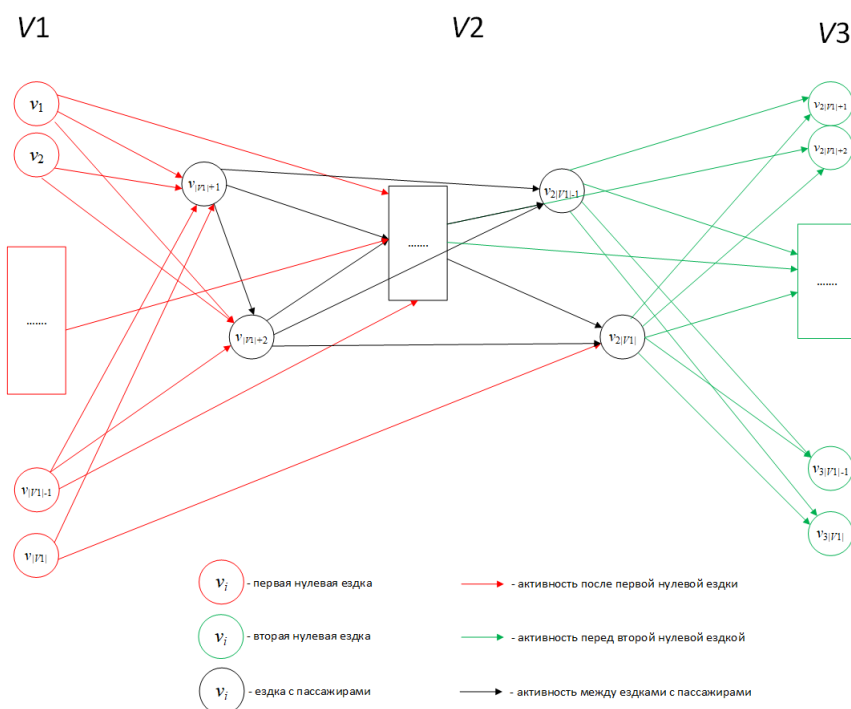


Рисунок 2 – Постановка задачи мультимаршрутного планирования
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Statement of the multi-route planning problem
Source: compiled by the author.

Такая ездка заканчивается в 9:27. Следующая ездка с этого конечного пункта предусмотрена в 10:12. Для исключения продолжительного простоя в ожидании этой ездки МТС в порожнем состоянии направляется на другой конечный пункт. Прибывает оно туда в 9:45, а в 9:50 выполняет ездку МТС 2 по маршруту 2. Начало ездки в 9:50, окончание в 10:23. После этого выполняется ездка в обратном направлении на этом же маршруте. Окончание ездки в 10:57. Следующая ездка на этом маршруте предусмотрена в 11:10, то есть для МТС 2 на маршруте 1 ездка началом в 10:58. Его и выполняет МТС, работающее по мультимаршрутному методу. Таким образом, при существующем методе организации работы МТС 2 маршрута 1 (см. рисунок 1, а, черная прерывистая линия) начинает работать в 7:20, а оканчивает в 11:30, т.е. рабочее время составляет 4 ч и 10 мин. Общее время простоя в ожидании начала очередного рейса при этом составляет 128 мин. Коэффициент пассажиронапряженности при этом равен 0,49 (см. рисунок 1, а). Это же МТС, работающее по заданию, полученному мультимаршрутным методом, начинает и оканчивает работу в то же

самое время, но при этом суммарный простой в ожидании начала очередной ездки составит 16 мин, а коэффициент пассажиронапряженности при этом равен 0,63 (см. рисунок 1, б).

Конечно, приведенный пример является иллюстративным и на практике необходимо учитывать определенные ограничения, связанные с достаточностью вместимости МТС, соблюдением режимов труда и отдыха, целесообразностью выполнения порожних пробегов между конечным и начальным пунктами и др. Для этого необходимо сформулировать рассматриваемую задачу в математическом виде.

Постановка задачи мультимаршрутного метода организации работы МТС с применением аппарата теории графов

Имеется непланарный, взвешенный, ориентированный, атрибутированный граф $G(V, D, A, B)$, где V – множество вершины графа, D – множество дуг графа, $A(v)$ – атрибуты вершины v , $B(d)$ – атрибуты дуги d (рисунок 2).

Каждая вершина представляет собой ездку. Совокупность вершин графа представляет собой совокупность упорядоченных по времени начала (слева направо на рисунок 2) всех

ездок за день на всех маршрутах, в том числе – нулевых ездок. Множество вершин V делится на три подмножества ($V=V1 \cup V2 \cup V3$):

– $V1=\{v_1, v_2, \dots, v_{|V1|}\}$ – множество возможных порожних ездок МТС с МПД на начальный пункт (первых нулевых ездок). Эти вершины являются истоками;

– $V2=\{v_{|V1|+1}, v_{|V1|+2}, \dots, v_{2|V1|}\}$ – множество ездок МТС с пассажирами по установленным регулярным маршрутам;

– $V3=\{v_{2|V1|+1}, v_{2|V1|+2}, \dots, v_{3|V1|}\}$ – множество возможных порожних ездок МТС с конечного пункта последнего рейса до МПД (вторых нулевых ездок). Эти вершины являются стоками.

Количество вершин $V2$ равно количеству всех ездок за день на всех маршрутах $|V2|$. Количество вершин $V1$ равно количеству возможных вариантов первых нулевых ездок $|V1|$, а $V3$ – количеству возможных вариантов вторых нулевых ездок $|V3|$. Очевидно, что $|V1|=|V2|=|V3|$ и общее число вершин графа равно $3|V1|$ или $3|V2|$, или $3|V3|$.

Каждая вершина $v \in V$ ассоциирована с набором следующих атрибутов:

$$A(v) = \{i_v, m_v, H_v, K_v, t_{nv}, t_{kv}, \Pi_v\}, \quad (2)$$

где i_v – порядковый номер вершины v графа V (порядковый номер ездки v), $i_v = 1 \dots 3|V1|$;

m_v – номер маршрута, на котором выполняется ездка v , $m_v = \{m_1, m_2, \dots, m_{|M|}\}$, где M – множество рассматриваемых маршрутов работы;

H_v – начальный пункт при выполнении ездки v . $H_v = \text{МПД}$, $\forall v \in V1$; $H_v \in (H - \text{МПД})$, $\forall v \in V2$; $H_v \in (K - \text{МПД})$, $\forall v \in V3$, где H – множество начальных пунктов рассматриваемой маршрутной сети; K – множество конечных пунктов рассматриваемой маршрутной сети;

K_v – конечный пункт при выполнении ездки v ; $K_v \in (H - \text{МПД})$, $\forall v \in V1$; $K_v \in (K - \text{МПД})$, $\forall v \in V2$; $K_v = \text{МПД}$, $\forall v \in V3$;

t_{nv} – время начала ездки v (ездки с номером i_v), т.е. время отправления от начального остановочного пункта H_v , $t_{ni_v} \geq t_{n(i_v-1)}$;

t_{kv} – время окончания ездки v , т.е. время прибытия на конечный остановочный пункт K_v ;

Π_v – пассажиронапряженность (максимальная наполненность МТС) при выполнении ездки v .

Время начала ездки v (время отправления от начального остановочного пункта H_v):

$$t_{nv} = \begin{cases} t_{nu} - \left(\frac{L_{\text{МПД}, H_u}}{v_{\text{эт}}} + t_3 \right), & v \in V1, u \in V2 \\ \text{определяется действующим расписанием движения,} & v \in V2, u \in V2 \\ t_{ku}, & v \in V3, u \in V2 \end{cases} \quad (3)$$

где $L_{\text{МПД}, H_u}$ – расстояние между МПД и начальным пунктом ездки u , км;

$v_{\text{эт}}$ – эксплуатационная скорость движения МТС между начальными (конечными) пунктами маршрутов без остановок на промежуточных остановочных пунктах $v_{\text{эт}} = 30$ км/ч;

t_3 – время запаса. Рассчитывается как разница во времени отправления МТС с начального пункта и временем его прибытия в этот начальный пункт ($t_3 = 0, 1$ ч).

Время окончания ездки v (время прибытия на остановочный пункт K_v):

$$t_{kv} = \begin{cases} t_{nu} - t_3, & v \in V1, u \in V2 \\ \text{определяется действующим расписанием движения,} & v \in V2, u \in V2 \\ t_{ku} + \frac{L_{u, \text{МПД}}}{v_{\text{эт}}}, & v \in V3, u \in V2 \end{cases} \quad (4)$$

Пассажиронапряженность при выполнении ездки v :

$$\Pi_v = \begin{cases} 0, & v \in V1, v \in V3 \\ \text{определяется прогнозированием или обследованием пассажиропотоков,} & v \in V2 \end{cases} \quad (5)$$

Каждая дуга $d(v, u) \in D$ представляет собой оценку активности МТС между вершинами v и u (действий, которые необходимо совершить после ездки v , чтобы выполнить ездку u). Совокупность всех дуг $d(v, u)$ графа представляет собой следующие возможные комбинации активностей МТС между ездками:

1. При $v \in V1, u \in V2$ – активность МТС между нулевой ездкой и первой ездкой с пассажирами (см. рисунок 2, дуги красного цвета), т.е. активность после первой нулевой ездки. Такая активность заключается в простое на протяжении времени t_3 в ожидании начала ездки u . При этом каждая вершина v будет соединена дугой с каждой вершиной u , т.е. из каждой вершины v будет исходить $|V1|$ дуг, и в каждую вершину u будет входить $|V1|$ дуг. Общее количество дуг между вершинами v и u будет равно $|V1| \cdot |V1|$.

2. При $v \in V2, u \in V2$ – активность МТС между ездками с пассажирами по установленным маршрутам регулярного сообщения. Такая активность может заключаться в:

- ожидании начала ездки u после окончания выполнения ездки v (при $K_v = H_u, t_{kv} \leq t_{nu} - t_3$). При $t_{kv} > t_{nu} - t_3$ МТС после выполнения ездки v не успевает на ездку u и дуги $d(v, u)$ не существует;
- порожнем пробеге МТС с конечного пункта K_v к начальному пункту H_u с возможным ожиданием начала рейса u после окончания выполнения рейса v (при $K_v \neq H_u, t_{kv} \leq t_{nu} - L_{v,u} / v_{\text{эт}} - t_3$), где $L_{v,u}$ – расстояние между K_v и H_u , км. При $t_{kv} > t_{nu} - L_{v,u} / v_{\text{эт}} - t_3$ МТС после выполнения ездки v не успевает на ездку u и дуги $d(v, u)$ не существует. Количество дуг от каждой вершины v равно количеству ездок, на которые будет успевать МТС после окончания выполнения ездки v ($|D| = |\{d \in D \mid t_{kv} \leq t_{nu} - L_{v,u} / v_{\text{эт}} - t_3\}|$).

3. При $v \in V2, u \in V3$ – активность МТС между заключительной ездкой с пассажирами и порожней ездкой до МПД. Закончив выполнение последней ездки МТС, сразу следует в МПД, поэтому какая-либо активность в этом случае будет отсутствовать. Дуга $d(v, u)$ в данном случае будет показывать связь между последней ездкой с пассажирами и вторым нулевым пробегом. При этом каждая вершина v будет соединена дугой с каждой вершиной u , т.е. из каждой вершины v будет исходить $|V1|$ дуг, и в каждую вершину u будет входить $|V1|$ дуг. Общее количество дуг между вершинами v и u будет равно $|V1| \cdot |V1|$.

Каждая дуга $d(v, u) \in D$ ассоциирована с набором атрибутов

$$B(d) = \{v, u, t_{\text{ожд}}(v, u), t_{\text{двд}}(v, u)\}, \quad (6)$$

где v – вершина графа (ездки), из которой выходит дуга $d(v, u) \in D, v \in (V1 + V2)$;

u – вершина графа (ездки), в которую входит дуга $d(v, u) \in D, u \in (V2 + V3)$;

$t_{\text{ожд}}(v, u)$ – продолжительности активности, связанной с ожиданием начала ездки u после окончания выполнения ездки v , мин;

$t_{\text{двд}}(v, u)$ – продолжительности активности, связанной с порожним побегом из K_v в H_u , мин.

Продолжительности активности, связанной с ожиданием начала ездки u после окончания ездки v :

$$t_{\text{ожд}}(v, u) = \begin{cases} t_3, \forall v \in V1, u \in V2; \\ t_{nu} - t_3 - t_{kv}, \forall v \in V2, u \in V2, i_v < i_u, K_v = H_u \text{ (рисунок 3, а)}; \\ t_{nu} - t_3 - t_{kv} - \frac{L_{v,u}}{v_{\text{эт}}}, \forall v \in V2, u \in V2, i_v < i_u, K_v \neq H_u \text{ (рисунок 3, б)}; \\ 0, \forall v \in V2, u \in V3 \end{cases} \quad (7)$$

МТС выполняет ездку между начальным остановочным пунктом H_v и конечным остановочным пунктом K_v , началом в 6: 40 и окончанием в 7: 20 (рисунок 3). Такая ездка представлена вершиной v с атрибутами $A(v) = \{i_v, H_v - K_v, H_v, K_v, 6:40, 7:20, 34\}$. Вторая ездка может быть представлена атрибутами (см. выражение (2)):

1. $A(u) = \{i_u, "H_u - K_u", H_u, K_u, 7:30, 8:05, 16\}$ (см. рисунок 3, а)

2. $A(u) = \{i_u, "H_u - K_u", H_u, K_u, 7:50, 8:25, 20\}$ (см. рисунок 3, б).

В первом случае (см. рисунок 3, а) $K_v = H_u$, тогда $t_{\text{ожд}}(v, u) = t_{nu} - t_3 - t_{kv} = 7:30 - 6 \text{ мин} - 7:20 = 4 \text{ мин}$. Во втором случае (см. рисунок 3, б) $K_v \neq H_u$, тогда $t_{\text{ожд}}(v, u) = t_{nu} - t_3 - t_{kv} - \frac{L_{v,u}}{v_{\text{эт}}} = 7:50 - 6 \text{ мин} - 7:20 - \frac{5}{30} \text{ ч} = 23,8 \text{ мин}$.

В случаях, когда $t_{\text{ожд}}(v, u) < 0$ МТС, после выполнения ездки v не успевает на выполнение ездки u . Так, например, если бы порожний пробег из конечного пункта K_v в начальный пункт H_u был равен не 5, а 15 км (см. рисунок 3, б), то $t_{\text{ожд}}(v, u) = t_{nu} - t_3 - t_{kv} - \frac{L_{v,u}}{v_{\text{эт}}} = 7:50 - 6 \text{ мин} - 7:20 - \frac{15}{30} \text{ ч} = -6 \text{ мин}$, т.е. после выполнения ездки v МТС не успеет выполнить ездку u .

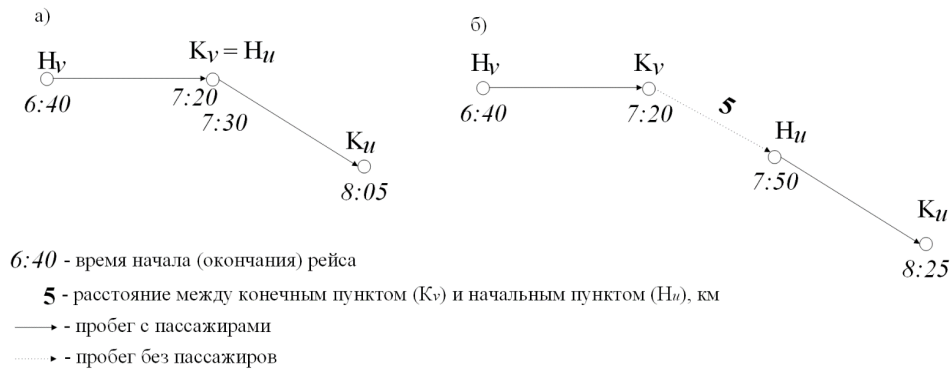


Рисунок 3 – Расчет $t_{ожд(v,u)}$: а – в случае, когда конечный пункт ездки v совпадает с начальным пунктом ездки u ($K_v = H_u$); б – в случае, когда $K_v \neq H_u$
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Calculation of $t_{ожд(v,u)}$: а – in the case when the final trip destination v coincides with the initial trip destination u ($K_v = H_u$); б – in the case when $K_v \neq H_u$
Source: compiled by the author.

Продолжительности активности, связанной с порожней ездой из v :

$$t_{двд(v,u)} = \begin{cases} \frac{L_{МПД,u}}{v_{эТ}}, \forall v \in V1, u \in V2; \\ 0, \forall v \in V2, u \in V2, i_v < i_u, K_v = H_u \text{ (см. рисунок 3, а);} \\ \frac{L_{v,u}}{v_{эТ}}, \forall v \in V2, u \in V2, i_v < i_u, K_v \neq H_u \text{ (см. рисунок 3, б);} \\ \frac{L_{v,МПД}}{v_{эТ}}, \forall v \in V2, u \in V3. \end{cases} \quad (8)$$

Дано также множество МТС, которые могут быть задействованы для выполнения ездов, изображенных на графе (см. рисунок 2) :

$$T = \{t_1, t_2, \dots, |T|\}, \quad (9)$$

где t_e – МТС с номером e , $e=1,2,\dots,|T|$.

Для каждого МТС t_e известна его вместимость C_e .

Граф G можно рассматривать как множество простых цепей $P_a = (v_{a,0}, d_{a,1}, v_{a,1}, d_{a,2}, v_{a,2}, \dots, d_{a,k_a}, v_{a,k_a})$, где k_a – количество дуг в цепи P_a ; $v_{a,0}, v_{a,1}, \dots, v_{a,k_a} \in V$ – последовательность вершин для цепи P_a , причем $v_{a,0} \in V1$, $v_{a,k_a} \in V3$, $(v_{a,1}, v_{a,2}, \dots, v_{a,(k-1)a}) \in V2$; $d_{a,1}, d_{a,2}, \dots, d_{a,k_a} \in D$ – последовательность дуг графа G , вошедших в цепь P_a (последовательность ребер цепи P_a). Каждая цепь P_a показывает возможный вариант выполнения ездов МТС t_e , для которого $C_e \geq \max(\Pi_{a,1}, \Pi_{a,2}, \dots, \Pi_{a,k_a-1})$ (рисунок 4).

Необходимо найти такое множество простых цепей P_a графа G , которое будет обеспечивать выполнение всех имеющихся ездов с минимальными затратами на их осуществление.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Целевая функция в этом случае может быть записана следующим образом:

$$\sum_{a=1}^{|P|} \sum_{e=1}^{|T|} C_e \left[(t_{kv_{a,0}} - t_{hv_{a,0}}) x_{a,e,0} + \sum_{i=1}^{k_a-1} (t_{kv_{a,i}} - t_{hv_{a,i}+1} + t_{двд(v_{a,i}, v_{a,i+1})} + K_{пре} t_{ожд(v_{a,i}, v_{a,i+1})}) x_{a,e,i} \right] \rightarrow \min, \quad (10)$$

где $K_{пре}$ – коэффициент приведения себестоимости часа простоя МТС t_e пассажировместимостью C_e к себестоимости часа его пробега. $K_{пре} = f(C_e)$; $x_{a,e,i} = 1$ если для вершины $v_{a,i}$ (дуги $d(v_{a,i}, v_{a,i+1})$) цепи P_a назначается МТС t_e пассажировместимостью C_e , $x_{a,e,i} = 0$ – в противном случае. Именно $x_{a,e,i}$ будет являться переменной в целевой функции (10).

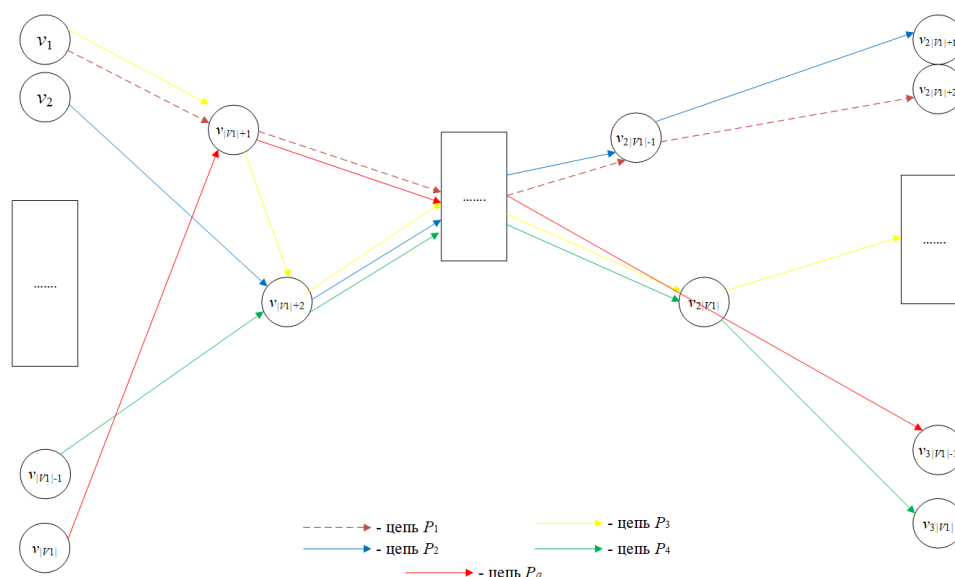


Рисунок 4 – Цепи графа
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Graph chains
Source: compiled by the author.

Для определения $K_{пр}$ взяты данные о зависимости переменной и постоянной составляющей себестоимости пассажирских перевозок от вместимости МТС [1, с. 131]:

$$S_{км} = 0,26 + 0,003C, \text{ руб/км};$$

$$S_{ч} = 8,15 + 0,03C, \text{ руб/ч}.$$

Затем значения себестоимости 1 ч простоя было поделено на значение себестоимости пробега за 1 ч с учетом скорости движения:

$$\frac{8,15 + 0,03C}{20(0,26 + 0,003C) + 8,15 + 0,03C},$$

где 20 – эксплуатационная скорость движения МТС, км/ч.

После упрощения можно получить искомую зависимость

$$K_{пре} = \frac{0,03C_e + 8,15}{0,09C_e + 13,35}. \quad (11)$$

При этом на переменные накладываются следующие ограничения:

1. Каждая цепь начинается в истоке ($v_{a,0} \in V1, \forall P_a, a \in 1 \dots |P|$):

$$\sum_{v \in V1} x_{a,v} = 1, \forall a \in [1 \dots |P|]. \quad (12)$$

2. Каждая цепь заканчивается в стоке ($v_{a,k_a} \in V3, \forall P_a, a \in 1 \dots |P|$):

$$\sum_{v \in V3} x_{a,v} = 1, \forall a \in [1 \dots |P|]. \quad (13)$$

3. Каждый исток может быть использован максимум один раз:

$$\sum_{a=1}^{|P|} x_{a,v} \leq 1, \forall v \in V1. \quad (14)$$

4. Каждый сток может быть использован максимум один раз:

$$\sum_{a=1}^{|P|} x_{a,v} \leq 1, \forall v \in V3. \quad (15)$$

5. Каждая вершина $v \in V2$ должна быть только в одной цепи:

$$\sum_{a=1}^{|P|} x_{a,v} = 1, \forall v \in V2. \quad (16)$$

6. В каждой цепи будут только те вершины, на которые МТС успевает

$$x_{a,v} + x_{a,u} \leq 1, \text{ если } t_{\text{ожд}}(v,u) < 0, \forall v \in V2, u \in V2, a \in [1 \dots |P|]. \quad (17)$$

7. Вместимость МТС, назначенного на цепь, будет не меньше пассажиронапряженности этой цепи с учетом допустимого коэффициента использования вместимости:

$$\gamma C_e \geq \max (P_v x_{a,e,v}), \quad (18)$$

$$\forall v \in P_a, \forall a \in [1 \dots |P|], \forall e \in [1 \dots |T|],$$

где γ – максимально допустимый коэффициент использования вместимости на участке с наибольшей мощностью пассажиропотока. Рекомендуется $\gamma=0,8^6$;

$\max (P_{v,a,e,v})$ – наибольшее значение пассажиропотока за рейс (пассажиронапряженность)⁷

$x_{a,e,v}=1$ означает, что МТС t_e выполняет езду v в цепи P_a .

8. На всю цепь назначено одно и тоже МТС:

$$\sum_{e=1}^{|T|} x_{a,e,v} = 1, \forall v \in P_a, \forall a \in [1, 2, \dots, |P|]. \quad (19)$$

9. Для каждого МТС будут соблюдены требования законодательства, регламентирующего продолжительность труда и отдыха водителя:

$$T_{pa} \in T_3, \forall a \in [1, 2, \dots, |P|], \quad (20)$$

где T_{pa} – режим труда и отдыха водителя на a -й цепи (продолжительность рабочего дня, наличие и продолжительность обеденных перерывов и отстоев на конечных пунктах и т.д.);

T_3 – режимы труда и отдыха, соответствующие требованиям законодательства.

Решение выражения (10) с учетом ограничений (11)–(20) позволит назначать МТС на рейсы разных маршрутов с учетом их вместимости и пассажиронапряженности, а также минимизации непроизводительных простоев на конечных остановочных пунктах, что окажет положительное влияние на значения параметров $q_p, \gamma_n, Z_{km}, Z_c, t_{ok}$ выражения (1). Это в свою очередь приведет к снижению себестоимости работы МТС и росту окупаемости такой работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная статья посвящена разработке нового подхода к организации работы ГПТРС, направленного на повышение эффективности использования вместимости МТС и сокращение их непроизводительных простоев. На основе анализа существующих методов и моделей предложен мультимаршрутный метод организации работы, который основан на применении аппарата теории графов и позволяет оптимально распределить парк МТС по

рейсам с учетом величины пассажиронапряженности, требований к режиму труда и отдыха водителей и других ограничений для цели снижения стоимости оказания транспортных услуг. Основное преимущество мультимаршрутного метода заключается в сокращении времени непроизводительных простоев МТС между рейсами, использовании МТС необходимой вместимости, что позволяет сократить стоимость перевозок без отмены рейсов и (или) увеличения интервалов движения.

В перспективе внедрение мультимаршрутного метода на практике может привести к значительному снижению стоимости работы ГПТРС, обеспечив более гибкое и эффективное управление работой МТС на маршрутах с учетом динамичных изменений пассажиропотока, требований законодательства и других эксплуатационных факторов.

Таким образом, представленное исследование вносит вклад в развитие методов оптимизации работы ГПТРС и может служить основой для дальнейших исследований и практических рекомендаций по улучшению городской транспортной инфраструктуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аземша С.А., Янкович С.Ю. Оценка эффективности ежесуточного управления парком модульных пассажирских транспортных средств на городских регулярных маршрутах // Недропользование и транспортные системы. 2024. 14(1). 4–17. DOI: <https://doi.org/10.18503/SMTS-2024-14-1-4-17>
2. Корягин М.Е. Поиск оптимального интервала движения автобусов по маршруту в условиях случайного потока пассажиров // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2005. № 3(47). С. 113–114. EDN: PXHEBJ.
3. Трегубов В.Н. Модели синхронизации интересов сторон при выборе тарифа и обосновании потребного количества автобусов на городском маршруте // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. Т. 4, № 1(42). С. 247–253. EDN: KZTMFD.
4. Рябов И.М., Кашманов Р.Я. Совершенствование организации обслуживания пассажиров на маршруте путем использования автобусов разной вместимости // Вестник СибАДИ. 2019; 16(3): 264–275. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-264-275>

⁶ Спирин И.В. Перевозки пассажиров городским транспортом: справочное пособие. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 413 с.

⁷ Аземша С.А. Определение статистической связи между параметрами пассажиропотока и маршрута при городских перевозках пассажиров в регулярном сообщении // Логистический аудит транспорта и цепей поставок: материалы II Международной научно-практической конференции, Тюмень, 26 апреля 2019 года / отв. редактор С. А. Эртман. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. С. 8–15. EDN WEEZBG.

5. Куликов А.В., Ткаченко Я.О. Совершенствование организации работы общественного транспорта малой и большой вместимости на маршрутной сети г. Волгограда // Инновационная наука, образование, производство и транспорт: Техника и технологии. Сер. Институт морехозяйства и предпринимательства. 2018. С. 58–79. DOI: 10.30888/978-617-7414-51-2.0-016. EDN: POGDCJ.

6. Ломтадзе В.В., Базюк Т.Ю. Оптимизация распределения пассажирского транспорта по маршрутам // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 2(49). С. 96–99. EDN: NDJXBF.

7. Скирковский С.В., Седюкевич В.Н., Пегин П.А. Методика повышения эффективности перевозок пассажиров городским маршрутизированным транспортом // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2017. № 1. С. 69–77. EDN: YIALQP.

8. Корчагин В.А., Гринченко А.В. Распределение автобусов по маршрутам движения с учетом вреда окружающей среде // Аграрный научный журнал. 2015. № 9. С. 40–43. EDN: UJURPN.

9. Рациональное распределение автобусов по маршрутам движения с учетом их возраста, условий эксплуатации, состояния ПТБ и эффективной работы персонала / В.А. Максимов, И.М. Юрковский, А.А. Хазиев [и др.] // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2017. № 3(50). С. 52–61. EDN: ZEFUUF.

10. Якунина Н.В., Якунин Н.Н., Паршакова К.А., Янучков М.Р. Методика разработки суточных планов интервалов движения пассажирских автотранспортных средств по городским регулярным маршрутам // Транспорт Урала. 2024. № 1(80). С. 41–47. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-41-47. EDN: UHAWCU.

11. Аземша С.А. Обоснование оптимальной вместимости модуля в составе пассажирского транспортного средства для регулярных городских перевозок // Транспорт Урала. 2023. № 2(77). С. 71–78. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-71-78. EDN: RMSUJJ.

12. Семченков С.С., Капский Д.В. Снижение непродуктивных затрат маршрутного пассажирского транспорта секторальным методом // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2022. № 3. С. 85–90. EDN: LHDJOS.

13. Semchenkov S., Kapsky D., Czerepicki A. Application of the sectoral method to improve the efficiency of route passenger transport. WUT Journal of Transportation Engineering. (2022); 134(null): 17–33. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.0376>.

14. Семченков С.С., Капский Д.В. Разработка рациональных графиков работ водителей маршрутного пассажирского транспорта при использовании секторального метода // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2022. № 10. С. 64–72.

15. Капский Д.В., Саражинский Д.С., Семченков С.С. Подход к решению задачи формиро-

вания секторов при организации работы водителей на предприятиях маршрутного пассажирского транспорта на основе псевдодулевой оптимизации // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2023. № 1(47). С. 77–81. DOI: 10.52928/2070-1616-2023-47-1-77-81. EDN: WMSUBC.

16. Kapski D., Semchenkov S., Khmel'nitskaya L. Measures to Improve the Operation of Passenger Transport and Urban Mobility // *Komunikacie*. 2023. Vol. 25, No. 1. P. A14–A25. DOI: 10.26552/com.c.2023.007. EDN: GQUPFC.

17. Семченков С.С., Капский Д.В. Повышение эффективности работы предприятий маршрутного пассажирского транспорта в современных условиях // Новости науки и технологий. 2022. № 1(60). С. 16–26. EDN: CABOOL.

18. Морозов А.С., Таубкин Г.В., Черников А.А. Формирование городской транспортной политики на основе расчета объективных показателей качества перевозок // Транспорт Российской Федерации. 2014. № 4(53). С. 54–59. EDN: SLSQQP.

19. Аземша С.А. Обоснование целесообразности выравнивания интервалов движения пассажирских транспортных средств регулярного сообщения на дублирующих участках // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2023. № 3(65). С. 40–47. EDN: LYGXBC.

20. Аземша С.А. Совершенствование технологии работы городского пассажирского транспорта регулярного сообщения // Вестник СибАДИ. 2024; 21(3): 396–411. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-396-411>. EDN: FIDYXY.

REFERENCES

1. Azemsha S., Yankovich S. Daily Management Efficiency Evaluation of the Modular Passenger Vehicles Fleet on Urban Regular Routes. *Subsurface Management and Transportation Systems*. 2024; Vol.14, No.1: 4–17. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18503/SMTS-2024-14-1-4-17>

2. Koryagin M.E. Search for the Optimal Bus Interval on a Route Under Random Passenger Flow Conditions. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2005; No. 3(47): 113–114. (in Russ.) EDN: PXHEBJ.

3. Tregubov V.N. Interested parties interests synchronization models at a rate choice and necessary buses quantities substantiation on a city route. *Vestnik of Saratov State Technical University* ("Vestnik SSTU"). 2009; Vol. 4, No. 1(42): 247–253. (in Russ.) EDN: KZTMFD.

4. Ryabovbov I.M., Kashmanov R.Ya. Improving the organization of passenger service on the route by using buses of different capacity. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019; 16(3): 264–275. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-264-275>

5. Kulikov A.V., Tkachenko Y.O. Improving the organization of public transport of small and large capacity on the route network of Volgograd. *Innovative science, education, production and transport: Engi-*

neering and technology. Ser. Institute of marine economy and entrepreneurship. 2018: 58–79. (in Russ.) DOI: 10.30888/978-617-7414-51-2.0-016. EDN: POGDCJ.

6. Lomtadze, V.V., Bazyuk T.Yu. Optimization of route distribution of passenger transport. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011; No. 2(49): 96–99. (in Russ.) EDN: NDJXBF.

7. Skirkovsky S.V., Sedyukovich V.N., Pegin P.A. Methodology for Improving the Efficiency of Passenger Transportation by Urban Route-Operated Transport. *Intellect. Innovations. Investments*. 2017; No. 1: 69–77. (in Russ.) EDN: YIALQP.

8. Korchagin V.A., Grinchenko A.V. Distribution of Buses on Routes Considering Environmental Damage. *Agrarian Scientific Journal*. 2015; No. 9: 40–43. (in Russ.) EDN: UJURPN.

9. Maximov V.A., Yurkovsky I.M., Khaziev A.A. [et al.] Rational Distribution of Buses on Routes Considering Their Age, Operating Conditions, Technical Condition, and Effective Personnel Work. *Vestnik of Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)*. 2017; No. 3(50): 52–61. (in Russ.) EDN: ZEFUUF.

10. Yakunina N.V., Yakunin N.N., Parshakova K.A., Yanuchkov M.R. Methodology for the development of daily interval plans for passenger vehicles on urban regular routes. *Transport of the Urals*. 2024; No. 1(80): 41–47. (in Russ.) DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-41-47. EDN: UHAWCU.

11. Azemsha S.A. Substantiation of the optimal capacity of a module as part of a passenger vehicle for scheduled urban transportation. *Transport of the Urals*. 2023; No. 2(77): 71–78. (in Russ.) DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-71-78. EDN: RMSUJJ.

12. Semtchenkov S.S., Kapsky D.V. Reduction of unproductive costs of route passenger transport by the sectoral method. *Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied Sciences*. 2022; (3): 85–90. (in Russ.) EDN: LHDJOS.

13. Semtchenkov S., Kapsky D., Czerepicki A. Application of the Sectoral Method to Improve the Efficiency of Route Passenger Transport. *WUT Journal of Transportation Engineering*. 2022; 134(null): 17–33. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.0376>.

14. Semtchenkov S.S., Kapsky D.V. Development of rational work schedules for drivers of route passenger transport using the sectoral method. *Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied Sciences*. 2022; (10): 64–72. (in Russ.)

15. Kapsky D., Sarazhinsky D., Semtchenkov S. Approach to solving the problem of sector formation in organizing the work of drivers at the enterprises of route passenger transport based on pseudoboolean

optimization. *Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied Sciences*. 2023; (1): 77–81. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.52928/2070-1616-2023-47-1-77-81>

16. Kapski D., Semtchenkov S., Khmel'nitskaya L. Measures to Improve the Operation of Passenger Transport and Urban Mobility. *Komunikacije*. 2023; Vol. 25, No. 1: A14-A25. DOI: 10.26552/com.c.2023.007. EDN: GQUPFC.

17. Semtchenkov S.S., Kapsky D.V. Improving the Efficiency of Route Passenger Transport Enterprises in Modern Conditions. *News of Science and Technology*. 2022; No. 1(60): 16–26. (in Russ.) EDN: CABOOL.

18. Morozov A.S., Taubkin G.V., Chernikov A.A. Formation of Urban Transport Policy Based on the Calculation of Objective Indicators of Transportation Quality. *Transport of the Russian Federation*. 2014; No. 4(53): 54–59. (in Russ.) EDN: SLSQQP.

19. Azemsha S.A. Substantiation of the expediency of equalizing intervals of regular passenger transport vehicles on the duplicate sections. *Technico-technologicheskie problemy servisa*. 2023; No. 3(65): 40–47. (in Russ.) EDN: LYGXBC.

20. Azemsha S.A. Technology of regular urban passenger transportation operation improvement. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(3): 396–411. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-396-411>. EDN: FIDYXY

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Аземша Сергей Александрович – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Управление автомобильными перевозками и дорожным движением» Белорусского государственного университета транспорта (246653, г. Гомель, ул. Кирова, д. 34).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9368-8910>,

SPIN-код: 6898-2383,

e-mail: s-azemsha@yandex.ru

INFORMATION ABOUT AUTHOR

Sergei A. Azemsha – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor, the Head of the Department «Road Transportation and Traffic Regulation Management», Belarusian State University of Transport (34, Kirov str., Gomel, 246653).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9368-8910>,

SPIN-code: 6898-2383,

e-mail: s-azemsha@yandex.ru

Научная статья
УДК 656.072
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-54-67>
EDN: DKMSWH



ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНО-ОБЩЕСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА «ПРИВОКЗАЛЬНЫЙ» В Г. ОМСКЕ

А.П. Жигаadlo, П.В. Орлов, А.Ю. Шонин, И.А. Эйхлер ✉

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

✉ ответственный автор
vaniaeichler@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассмотрена необходимость комплексной оценки качества транспортных услуг в области регулярных пассажирских перевозок, обоснованная изменением как положений законодательства Российской Федерации, так и требований основного потребителя данных услуг – пассажиров. Предложено рассмотреть вопросы повышения безопасности и комфортности на крупных транспортно-пересадочных узлах. В качестве примера выбрана территория у железнодорожного вокзала Омской области.

Материалы и методы. В работе использованы актуальные нормативно-правовые акты федерального и регионального уровней в области транспортного обслуживания населения, данные социологического опроса пассажиров, результаты замеров на конечных точках действующей маршрутной сети Омской области, действующие реестры межмуниципальных и муниципальных маршрутов.

Использованы следующие методы исследования: анализ, опрос, формализация.

Результаты. На основе анализа статистической информации и данных натурных наблюдений определены показатели суточного количества отправляемых пассажиров и транспортных средств с территории, расположенной у железнодорожного вокзала г. Омска. Полученные данные позволили сделать вывод о том, что при втором по мощности объеме пассажиропотока на исследуемой территории полностью отсутствует инфраструктура, обеспечивающая комфортность и безопасность осуществления пересадки с муниципального транспорта на межмуниципальные маршруты. На основе утвержденных норм определена структура и площадь транспортно-общественного комплекса, позволяющего устранить выявленные недостатки.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости организации транспортно-общественного комплекса и возможности его расположения на территории у железнодорожного вокзала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: транспортно-общественный комплекс, показатели качества транспортных услуг, межмуниципальные перевозки, управление пассажирскими автомобильными перевозками

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. А.П. Жигаadlo – главный редактор журнала «Вестник СибАДИ». Журнал «Вестник СибАДИ» не освобождает от рецензирования рукописи ученых вне зависимости от их статуса.

Статья поступила в редакцию 14.01.2025; одобрена после рецензирования 18.02.2025; принята к публикации 24.02.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Жигаadlo А.П., Орлов П.В., Шонин А.Ю., Эйхлер И.А. Оценка целесообразности организации транспортно-общественного комплекса «Привокзальный» в г. Омске // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 1. С. 54-67. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-54-67>

© Жигаadlo А.П., Орлов П.В., Шонин А.Ю., Эйхлер И.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-54-67>
EDN: DKMSWH

ASSESSMENT OF THE ORGANIZATION EXPEDIENCY OF THE PUBLIC TRANSPORT COMPLEX "PRIVOKZAL'NYI" IN OMSK CITY

Alexander P. Zhigadlo, Pavel V. Orlov, Anatoly Yu. Shonin, Ivan A. Eychler ✉
The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia
✉ corresponding author
vaniaeichler@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. The article considers the need for a comprehensive assessment of the quality of transport services in the field of regular passenger transportation, justified by changes in both the provisions of the legislation of the Russian Federation and the requirements of the main consumer of these services – passengers. It is proposed to consider the issues of improving safety and comfort at large transport transfer hubs. The territory near the Omsk region railway station is chosen as an example.

Materials and Methods. The work uses current regulatory legal acts of the federal and regional levels in the field of public transport services, data from the sociological survey of passengers, the results of measurements at the endpoints of the current route network of the Omsk region, existing registers of inter-municipal and municipal routes. The following research methods were used: analysis, survey, formalization.

Results. Based on the analysis of statistical information and field observation data, the daily number of passengers and vehicles departing from the territory located near the Omsk railway station were determined. The obtained data allowed us to conclude that the studied territory with the second largest volume of passenger flow has absolutely no infrastructure that ensures the comfort and safety of transferring from municipal transport to inter-municipal routes. Based on the approved standards, the structure and area of the public transport complex have been determined, which makes it possible to eliminate the identified shortcomings.

Discussion and conclusions. The obtained results suggest the need to organize a public transport complex and the possibility of its location on the territory near the railway station.

KEYWORDS: public transport complex; quality indicators of transport services; inter-municipal transportation; management of passenger automobile transportation

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest. Zhigadlo A.P., the editor-in-chief of "The Russian Automobile and Highway Industry Journal". The Journal does not exempt scientists from reviewing the manuscript, regardless of their status.

The article was submitted: 14.02.2025; approved after reviewing: 18.02.2025; accepted for publication: 24.02.2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Zhigadlo A.P., Orlov P.V., Shonin A.Y., Eychler I.A. Assessment of the organization expediency of the public transport complex "Privokzal'nyi" in Omsk city. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (1): 54-67. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-54-67>

© Zhigadlo A.P., Orlov P.V., Shonin A.Y., Eychler I.A., 2025



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

ВЕДЕНИЕ

Одними из ключевых направлений развития пассажирского транспорта, закрепленных в Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом до 2035 г., утвержденной распоряжением правительства Российской Федерации № 3363-р от 27.11.2021 г., являются:

- повышение качества транспортных услуг в части комфортности и безопасности перевозок с минимизацией негативного воздействия на окружающую среду при сохранении ценовой доступности перевозок;

- создание транспортной инфраструктуры для развития внутреннего туризма.

В рамках Российского законодательства мониторинг группы параметров «Комфортность» разделен на несколько взаимосвязанных показателей – «Комфортность регулярных перевозок пассажиров в части ожидания», «Комфортность регулярных перевозок пассажиров в части передвижения» и «Комфортность регулярных перевозок пассажиров в части пересадок», что закреплено Постановлением Правительства РФ от 8 декабря 2023 г. № 2086.

Теоретические аспекты повышения качества регулярных перевозок пассажиров определены в части оплаты проезда за счет эффективного планирования транспортных систем и рассматриваются в работах И.В. Спирина¹ [1, 2]. Общие вопросы, связанные с внесением изменений в действующие стандарты, вызванные изменением требований пассажиров как основных потребителей услуги, описаны в работах И.С. Сенина, Г.Г. Скворцова, К.В. Синютич [3, 4, 5].

Общие критерии оценки качества транспортной услуги и обоснование используемого при их оценке инструментария приведены в работах В.Ю. Ланцевой, К.А. Луконькиной, А.С. Пятаковой [6, 7, 8]. Тенденции изменений, приведших к необходимости внесения изменений, рассматриваются в статьях [9, 10]. Региональные особенности организации транспортного обслуживания представлены в работах [11, 12, 13, 14]. Подходы к организации эффективных систем транспортного обслуживания населения на основе данных о транспортной работе подвижного состава на маршрутах планирования расписания изучены в [15, 16].

Авторы указанных работ определяют необходимость комплексного повышения качества оказываемых транспортных услуг. С нашей точки зрения, одной из ключевых проблем организации транспортного обслуживания является отсутствие комплексного подхода к организации пересадок с межмуниципального транспорта на муниципальный: сейчас ввиду необходимости повышения экономической эффективности происходит отказ от достаточно дорогих в обслуживании автовокзалов и автостанций, вместе с тем населению не предоставляется альтернативных вариантов. Также в городах при отсутствии должного планирования маршрутов возникают крупные транспортно-пересадочные узлы, у которых нет необходимой для обеспечения безопасности и комфортности пассажиров инфраструктуры. Это приводит к увеличению неудовлетворенности пассажиров сложившейся транспортной системой региона, что отражается на спросе на транспортную услугу. В работе предложено рассмотреть один из таких узлов – площадь у железнодорожного вокзала г. Омска.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В 2022 г. СибАДИ были проведены исследования количества отправляемых пассажиров с узловых точек по межмуниципальным маршрутам регулярных перевозок, находящихся в г. Омске, полученные результаты отражены на рисунке 1. Данное исследование позволило определить места концентрации пассажиров, использующих межмуниципальные маршруты.

Одним из таких мест концентрации является территория, расположенная вокруг железнодорожного вокзала, включающая в себя остановочные пункты «Железнодорожный вокзал» и «ДК им. Лобкова». Согласно проведенному исследованию, это второй по объёму отправляемых пассажиров узловой пункт маршрутной сети межмуниципальных перевозок: общее количество пассажиров, отправленное с остановочных пунктов «Железнодорожный вокзал», «ДК им. Лобкова» составил 3783 чел. в сут (313 отправок транспортных средств), средняя наполняемость подвижного состава на данном узловом пункте маршрутной сети – 12 чел. за рейс. Данные в разрезе маршрутов и направлений представлены в таблице 1.

¹ Spirin I.V., Matantseva Yu.O., Grishaeva Y.M., Savosina M.I. Planning of passenger transportation in the cities of Russia on the basis of sustainable development // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. 632 (1). 012053.

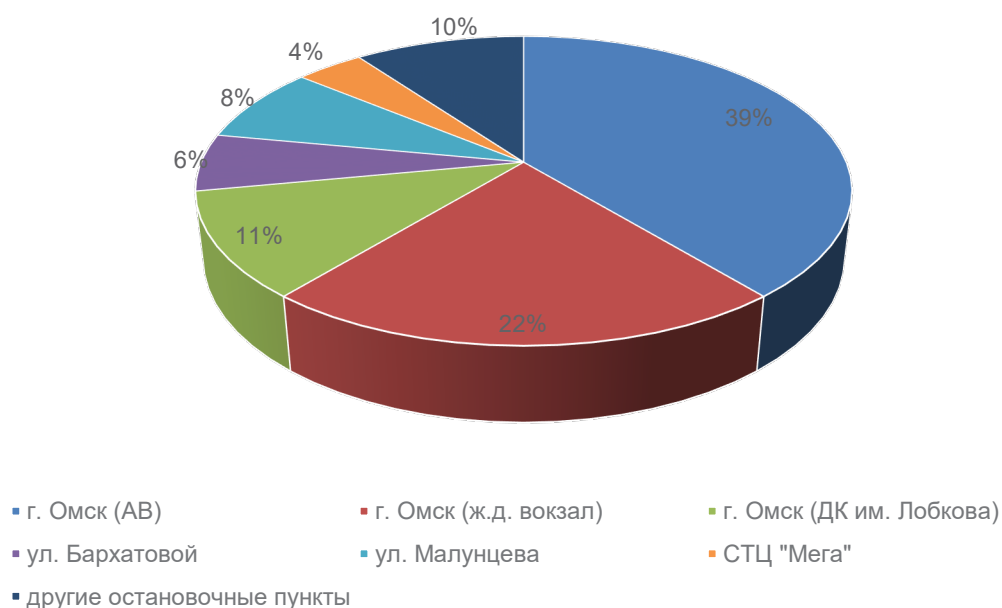


Рисунок 1 – Среднесуточное количество отправленных пассажиров
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The average daily number of passenger's departure
Source: compiled by the authors.

Таблица 1
Оценка количества отправок пассажиров и транспортных средств с обследуемой территории
Источник: составлено авторами.

Table 1
Estimation of the number of passenger's and vehicle's departures from the surveyed area
Source: compiled by the authors.

Порядковый номер маршрута	Наименование маршрута регулярных перевозок	Отправления с исследуемой территории по дням недели							Среднее количество пассажиров на одно отправление	Среднее количество перевезенных пассажиров за день	Коэффициент использования вместимости	Списочное количество подвижного состава на маршруте
		Пн	Вт	Ср	Чт	Пт	Сб	Вс				
308	г. Омск – с. Сосновское – р.п. Таврическое	9	9	9	9	9	10	10	12	33	0,75	6
1021	Омск – Зеленое Поле	5	5	5	5	5	3	3	8	35	0,50	3
1022	г. Омск – с. Прииртышье – с. Пристанское	9	9	9	9	9	9	9	12	108	0,75	6
1162	Омск – Северное	2				2	2	2	8	16	0,35	2
318	ДК им. Лобкова – Черниговка	3	3	3	3	3	3	3	12	23	0,27	1
1171	г. Омск – с. Победитель	2	2	2	2	2	2	2	10	20	0,53	1
323	ДК им. Лобкова – Розовка – ДРСУ-3	5	15	5	15	5	5	5	12	42	0,31	4

Продолжение таблицы 1

Порядковый номер маршрута	Наименование маршрута регулярных перевозок	Отправления с исследуемой территории по дням недели							Среднее количество пассажиров на одно отправление	Среднее количество перевезенных пассажиров за день	Коэффициент использования вместимости	Списочное количество подвижного состава на маршруте
		Пн	Вт	Ср	Чт	Пт	Сб	Вс				
325	ДК Лобкова – Ачаир	3	3	3	3	3	3	3	17	28	0,25	4
326	ДК им. Лобкова – Речной	2	2	2	2	2	2	2	8	16	0,21	1
327	ДК им. Лобкова – Иртышский	6	6	6	6	6	5	5	15	60	0,11	3
334	ДК им. Лобкова – Нива	0	2	0	2	0	2	2	8	9	0,21	1
1390	г. Омск (ДК им. Лобкова) – пос. Красная Тула	1	1	1	1	1	1	1	11	11	0,48	1
507	ДК им. Лобкова – Ачаирский	4	4	4	4	4	4	4	9	18	0,13	4
1392	ДК им. Лобкова – Николенко	1	0	2	0	2	0	1	8	7	0,35	1
1393	ДК им. Лобкова – Санаторий «Меркурий»	2	2	2	2	2	2	2	7	14	0,10	2
1700	Омск – Таврическое – Карповка	5	5	5	5	5	5	5	8	40	0,35	2
509	р.п. Таврическое (АС) – с. Харламово (СНТ «Портовик, СНТ «Харламово») – г. Омск (ж.д. вокзал)	3	3	3	3	3	3	3	11	26	0,48	2
1803	Черлак – г. Омск	4	4	4	4	4	4	4	15	60	0,65	2
123	ж.д. вокзал – с. Лузино	10	10	10	10	10	10	10	33	99	0,48	2
132	ул. Лобкова – микрорайон Черемуховское	14	14	14	14	14	14	14	23	48	0,19	2
9026	Марьяновка (АС) – г. Омск (ж.д. вокзал)	7	7	7	7	7	2	2	16	89	0,53	5
9040	Любимировка – Таврическое – г. Омск	3	3	3	3	3	3	3	8	24	0,35	2
9044	Омск – Русская Поляна	11	11	11	11	11	11	11	18	198	0,78	8
9048	г. Омск (ж.д. вокзал) – с. Цветнопожье	6	6	6	6	6	6	6	8	48	0,35	3
9051	г. Омск – г. Калачинск (АВ)	24	24	24	24	24	24	24	16	384	1,00	12
9052	г. Омск (ж.д. вокзал) – р.п. Оконешиково (АС)	10	10	10	10	10	10	10	10	100	0,83	6
905	ДК им. Лобкова – Ачаир	38	38	38	38	38	38	38	14	372	0,47	11

Окончание таблицы 1

Порядковый номер маршрута	Наименование маршрута регулярных перевозок	Отправления с исследуемой территории по дням недели							Среднее количество пассажиров на одно отправление	Среднее количество перевезенных пассажиров за день	Коэффициент использования вместимости	Списочное количество подвижного состава на маршруте
		Пн	Вт	Ср	Чт	Пт	Сб	Вс				
807	г. Омск – Таврическое (АС)	41	41	41	41	41	41	41	17	523	0,25	13
819	г. Омск (ж.д. вокзал) – Звонарев Кут	4	4	4	4	4	4	4	12	48	0,18	1
803	с. Азово (АС) – г. Омск (ж.д. вокзал)	51	51	51	51	51	51	51	10	462	0,50	14
9007	г. Омск (ж.д. вокзал) – р.п. Москаленки (АС)	4	4	3	4	4	3	3	17	61	0,94	4
1172	г. Омск – д. Ефимовка	2	2	2	2	2	2	2	8	16	0,44	2
ИТОГО южное направление		291	300	289	300	292	284	285	-	3040	-	131
328	ж.д. вокзал – Калинино	4	4	4	4	4	4	4	21	59	0,26	1
ИТОГО Северо-восточное направление		4	4	4	4	4	4	4	-	58,8	-	1
904	г. Омск (ж.д. вокзал) – Лузино	97	97	97	97	97	97	97	37	558	0,52	20
163	ж.д. вокзал – д. Гауф	17	17	17	17	17	17	17	37	126	0,48	8
ИТОГО Северо-западное направление		114	114	114	114	114	114	114	-	684	-	28
ИТОГО по исследуемой территории		409	418	407	418	410	402	403	-	3783	-	160

Согласно действующему реестру для трасс 36 межмуниципальных маршрутов территория у железнодорожного вокзала является начальным-конечным остановочным пунктом. Представленные на рисунке 2 маршруты связывают Азовский, Калачинский, Исилькульский, Кормиловский, Марьяновский, Москаленский, Нововаршавский, Одесский, Оконешниковский, Омский, Русско-Полянский, Таврический и Черлакский муниципальные районы.

Также согласно результатам проведенного исследования стало определение мест посадки пассажиров на автотранспортные средства (рисунки 3).

В результате проведенных обследований работы межмуниципальных маршрутов на данной территории было определено, что при большом потоке пассажиров отсутствуют комфортные и безопасные условия пересадки пассажиров с муниципального на межмуниципальный транспорт: отправления происходят с различных мест, отсутствует расписание отпавлений, не созданы условия для отдыха пассажиров и т.п. Учитывая размещение мест

посадки, отсутствие на части территорий, используемых перевозчиками для осуществления посадки пассажиров, павильонов ожидания и нахождения части мест посадки на необорудованной территории, было отмечено, что при такой организации работы нет возможности обеспечения параметров безопасности и комфортности для пассажиров, а также нарушаются требования СП 396.1325800.2018 «Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования»; ОДМ 218.2.007–2011 «Методические рекомендации по проектированию мероприятий по обеспечению доступа инвалидов к объектам дорожного хозяйства».

Отметим, что в цокольном этаже здания железнодорожного вокзала сегодня действует автокасса, обслуживающая в основном международные перевозки в Республику Казахстан, но площадь зала ожидания, ее удаленность от мест посадки пассажиров не позволяет расширить ее функционал для обслуживания всех действующих на данной территории маршрутов.

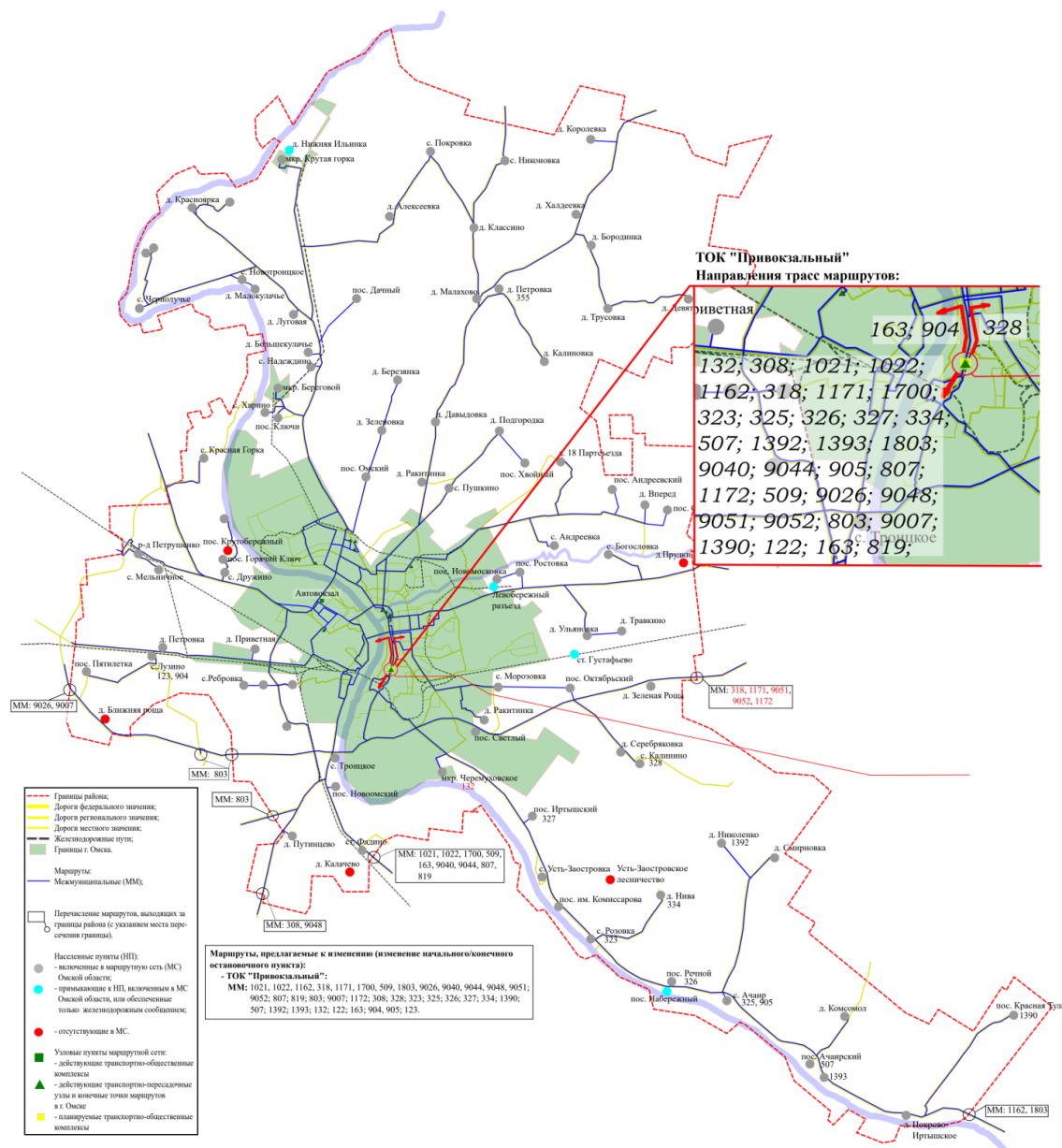


Рисунок 2 – Направления трасс маршрутов, проходящих через остановочные пункты «Железнодорожный вокзал» и «ДК им. Лобкова»
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – The directions of the routes passing through the stops "Railway station" and "Palace of Culture named after Lobkov".
Source: compiled by the authors.

Одним из решений, позволяющих обеспечить комфортность и безопасность пассажиров на исследуемой территории, является организация транспортно-общественного комплекса. Согласно Постановлению Правительства РФ от 1 октября 2020 г. № 1586 «Об утверждении правил перевозок пассажиров и

багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом» и проведенной оценки количества отправок, можно сделать вывод о необходимости организации такого пункта в виде автовокзала (так как среднесуточное количество отправок с указанной территории более 1000 чел.).



Рисунок 3 – Места посадки пассажиров, расположенные на исследуемой территории
 ○ – места прибытия пассажиров;
 ■ – места посадки пассажиров
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Passenger boarding points located in the research area.
 ○ – passenger arrival locations;
 ■ – passenger boarding points
 Source: compiled by the authors.

Предлагаемое решение также подтверждается и преимуществами рассматриваемой территории как с точки зрения организации маршрутов регулярных перевозок, так и с точки зрения места притяжения пассажиропотоков:

- близость к границе города в направлениях автомобильных дорог Р-254 «Иртыш», Черлакского тракта, Русско-Полянского тракта дает возможность формирования трасс маршрутов в объезд центральной части города;

- данная территория является узловым пунктом маршрутной сети г. Омска и Омской области, обслуживая межмуниципальные, межрегиональные и международные передвижения пассажиров с использованием железнодорожного транспорта, что с точки зрения пассажиров позволяет не совершать дополнительную поездку на городском транспорте;

- исследуемая территория связана муниципальными маршрутами пассажирского транспорта со всеми административными округами г. Омска – Советским, Центральным, Кировским, Октябрьским.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Планирование строительства крупного инфраструктурного объекта на территории железнодорожного вокзала в г. Омске требует проведения оценки необходимых площадей.

Состав обязательных помещений и площади территории автовокзала в Российской Федерации определяется на основе Приказа Минтранса России от 02.10.2020 № 406 «Об утверждении минимальных требований к оборудованию автовокзалов и автостанций». Согласно данному законодательному акту, обязательными элементами автостанции являются: билетная касса или автомат для продажи билетов, зал ожидания, комната матери и ребенка, туалет, камера хранения вещей или места для хранения вещей, пункт общественного питания, здравпункт, комната отдыха водителей с местами для сидения, перроны (площадки) для посадки пассажиров в автобусы, перроны (площадки) для высадки пассажиров из автобусов. Также обязательными требованиями являются:

- оснащение перронов для посадки и высадки пассажиров, а также залов ожидания

системами громкой связи и информационными табло;

- обеспечение условий доступности для инвалидов перевозок автомобильным транспортом (городским наземным электрическим транспортом) и иных услуг наравне с другими пассажирами;

- размещение технических средств организации дорожного движения для транспортных средств и пассажиров.

Ключевые параметры, влияющие на требуемые для организации автовокзала площади:

- среднесуточное количество отправок пассажиров, на основе которого определяется количество обязательных помещений в здании проектируемого объекта и требуемая площадь;

- максимальное количество одновременно находящихся на территории автовокзала транспортных средств, на основе которого определяется необходимая площадь под стоянку;

- максимальное количество одновременно находящихся у перронов транспортных средств и осуществляющих посадку пассажиров, на основе которых определяется количество перронов.

Оценка первого параметра для проектируемого объекта транспортной инфраструктуры была осуществлена на основе натурного наблюдения. По результатам исследования среднесуточное количество отправок с территории планируемого автовокзала составило 3783 чел. Определение количества одновременно находящихся на территории автовокзала транспортных средств производилось на основе составления сводного расписания планируемого транспортно-общественного комплекса с учетом действующего реестра межмуниципальных маршрутов регулярных перевозок. Согласно требованиям Приказа Минтранса России от 02.10.2020 № 406 время, необходимое для осуществления посадки пассажиров для автобусов малого и среднего классов, должно составлять не менее 10 мин, для автобусов большого и особо большого классов – не менее 15 мин. Итоги исследования были сведены в виде рисунка 4.

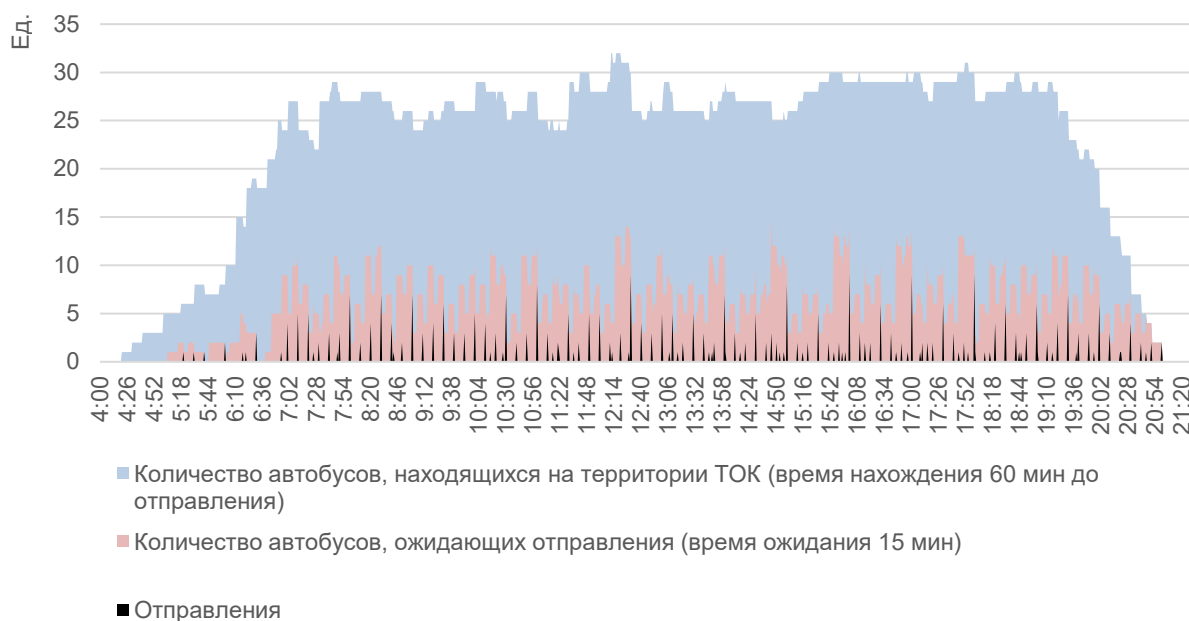


Рисунок 4 – Оценка количества транспортных средств, одновременно находящихся на территории планируемого комплекса
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Estimation of the number of vehicles simultaneously located on the territory of the planned complex
Source: compiled by the authors.

Итоги расчета параметров проектируемого транспортно-общественного комплекса приведены в таблице 2.

Таблица 2
Определение параметров транспортно-общественного комплекса
Источник: составлено авторами.

Table 2
Determination of the parameters of the public transport complex
Source: compiled by the authors.

Показатель	Значение
Отправлений в сут с ТОК, ед.	418
Максимум одновременных отправок, ед.	9
Максимум автобусов, ожидающих отправления на перронах ТОК, ед.:	
при нахождении на перроне 15 мин (для всех ТС)	15
при нахождении на перроне 10 мин (для всех ТС)	13
при нахождении на перроне 15 мин (для классов БК; СК)	7
при нахождении на перроне 10 мин (для класса МК)	9
максимум находящихся на территории ТОК автобусов, ед.:	
при нахождении на территории ТОК 20 мин	17
при нахождении на территории ТОК 60 мин	32
Потребность в площадях для стоянки на территории ТОК ПС, м ²	2 660
Потребность в перронах, ед.	13
Площадь, отводимая под посадку пассажиров, м ²	2 340
Суточное количество отправляемых пассажиров с ТОК, чел. (по результатам обследования)	3783
Расчетное значение площади строений ТОК, м ² :	
На оборудование специальных помещений (билетные кассы, зал ожидания, хранение и др.)	300
Общая площадь здания ТОК	600

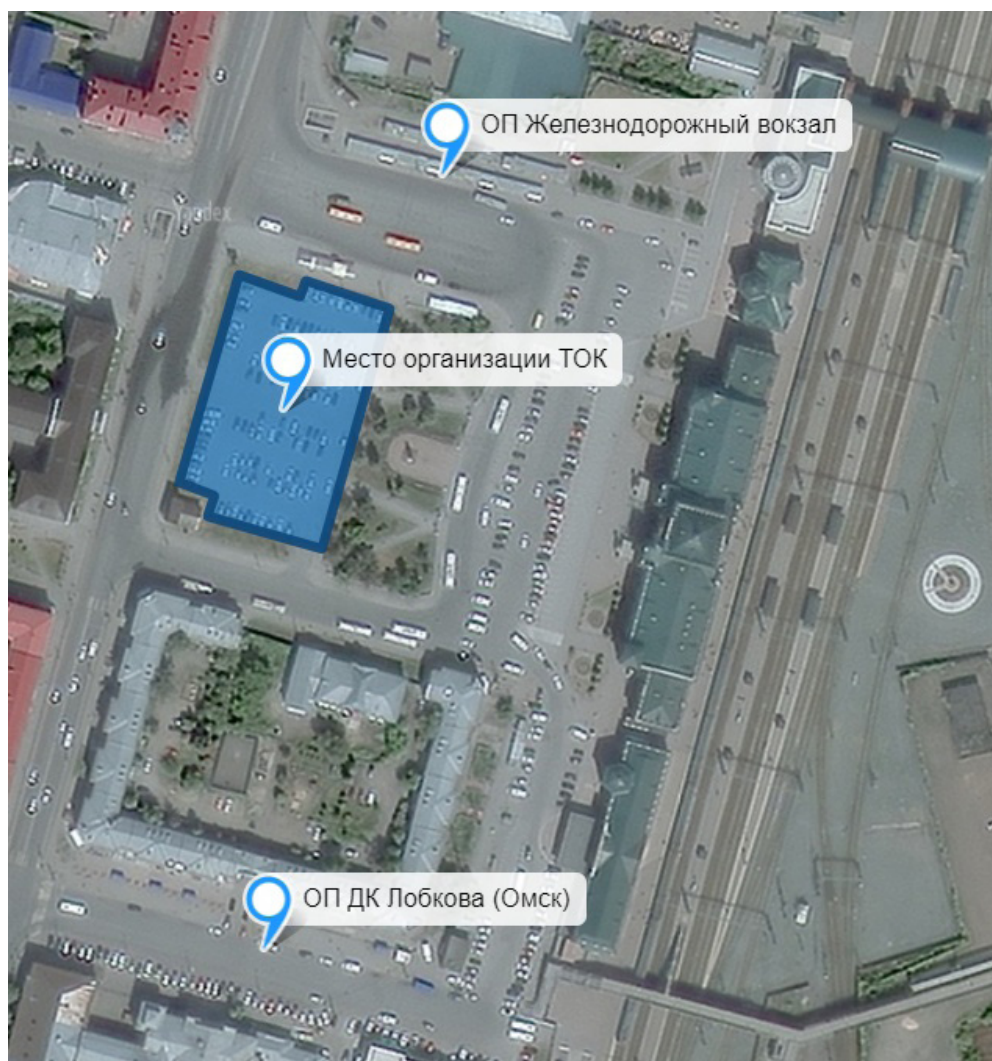


Рисунок 5 – Планируемое место организации транспортно-общественного комплекса «Привокзальный»
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – The planned location of the public transport complex «Privokzal'nyi»
Source: compiled by the authors.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемое местоположение организации мест стоянки автотранспортных средств и перронов для посадки пассажиров транспортно-общественного комплекса «Привокзальный» представлено на рисунке 5.

Общая площадь планируемого участка – 4600 м², что достаточно для организации стоянки и размещения необходимого количества перронов в планируемом варианте. Преимуществом организации ТОК в данном месте

является повышение безопасности и комфортности услуг по межмуниципальным перевозкам для пассажиров за счет локализации мест посадки, а также организации удобного пешеходного перемещения к местам остановки общественного транспорта. С точки зрения владельцев легкового автотранспорта, вывод парковочного места площадью 4600 м² не повлияет на количество парковочных мест, так как сопоставимая площадь высвободится на основной парковке у железнодорожного вокзала и ДК им. Лобкова.

Оценочная площадь павильона автостанции с учетом требований Приказа Минтранса России от 02.10.2020 № 406 при максимальном количестве отправляемых пассажиров в сутки до 4000 чел. составит 250 м², отводимых на оборудование обязательных помещений. Общая площадь предполагаемого здания должна быть не меньше 500 м².

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аредова А.К., Гришаева Ю.М., Матанцева О.Ю., Спирин И.В. Перевозки пассажиров транспортом общего пользования по регулируемым тарифам // Вестник РМАТ. 2021. № 4. С. 33–39.
2. Матанцева О.Ю., Белогребень А.А., Спирин И.В. Совершенствование порядка определения начальной (максимальной) цены контракта при осуществлении закупок в сфере регулярных пассажирских перевозок автомобильным и городским наземным электрическим транспортом при переходе на брутто-модель взаимодействия с перевозчиками // Научный вестник автомобильного транспорта. 2021. № 2. С. 5–15.
3. Сенин И.С., Замбрыцкая А.А. Особенности формирования регионального стандарта транспортного обслуживания населения // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2024. № 2. С. 83–85.
4. Скворцова Г.Г. Стандарт транспортного обслуживания как основа повышения качества пассажирских перевозок транспортом общего пользования // Russian Journal of Management. 2023. Т. 11, № 4. С. 58–68.
5. Синютин К.В. Актуализация существующих стандартов в сфере транспортного обслуживания населения общественным транспортом Республики Беларусь // Vestnik of Brest State Technical University. Civil Engineering and Architecture. 2022. № 2 (128). С. 182–185.
6. Ланцева В.Ю., Восканян А.А. Критерии качества и доступности транспортных услуг, оказываемых населению // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова. 2023. № 2 (43). С. 118–120.
7. Лукошкина К.А., Гусев С.И., Епифанов В.В. Мониторинг качества транспортных услуг в системе межрегионального пассажирского автомобильного транспорта (на примере Ульяновской области) // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2019. № 3 (87). С. 58–61.
8. Пятакова А.С., Горяев Н.К., Мячков К.Ю. Оптимизация параметров оценки муниципальных пассажирских перевозок // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: экономика и менеджмент. 2018. № 4(12). С. 182–187.
9. Капельюк З.А., Попова Я.В. Тенденции развития транспортных услуг // Научно-теоретический журнал «Вестник СибУПК». 2020. № 2 (32). С. 30–34.
10. Фадеев А.И., Ильянков А.М. Управление транспортным предложением на регулярных междугородных автобусных линиях // Вестник СибАДИ. 2023; 20(5): 632–648. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-632-648>. EDN: WMBMDI
11. Курохтина А.О., Фирсова В.П., Польшгалова О.В., Прокофьева О.С. Исследование регулярных перевозок пассажиров на примере г. Иркутска // Молодежный вестник ИрГТУ. 2024. Т. 14, № 1. С. 45–50.
12. Чебокичина Н.М., Капсаргина С.А. Организация транспортного обслуживания населения в Таштыпском районе // Аграрное и земельное право. 2024. № 3 (231). С. 52–55. DOI: https://doi.org/10.47643/1815-1329_2024_3_52
13. Назаров М.И., Омонтурдиев А.М. Территориальная организация транспортного обслуживания населения Сурхандарьинской области // Экономика и социум. 2024. № 5-1 (120). С. 1459–1473.
14. Жигадло А.П., Шонин А.Ю., Эйхлер И.А. Методика оценки состояния транспортного обслуживания населения субъекта Российской Федерации на примере Омской области // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 882–899. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-6-882-899
15. Якимов М.Р. Подходы к формированию эффективной маршрутной сети крупных городов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2022. Т.22, № 3. С. 107–113. DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-107-113
16. Якунин Н.Н., Якунина Н.В., Любимов И.И. Региональные пассажирские автотранспортные системы: постановка задачи, первые результаты оценивания // Вестник СибАДИ. 2023; 20(6): 748–761. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-748-761>

REFERENCES

1. Aredova A.K., Grishaeva Ju.M., Matanceva O. Ju., Spirin I.V. Transportation of passengers by public transport at regulated tariffs. *Vestnik RIAT*. 2021; 4: 33–39. (In Russ).
2. Matantseva O.YU., Belogreben A.A., Spirin I.V. Improving the procedure for determining the initial (maximum) contract price when purchases in the field of regular passenger transportation by road and urban ground electric transport in the transition to the gross model interaction with carriers. *The bulletin of road transport research*. 2021; 2: 33–39. (In Russ).
3. Senin I.S., Zambrzhitskaya A.A. Features of the formation of a regional standard of transport services for the population. *SCIENCE. ENGINEERING. TECHNOLOGY (polytechnical bulletin)*. 2024; 2: 83–85. (In Russ).
4. Skvorcova G. Transport service standard as the basis for improving the quality of passenger transportation by public transport. *Russian Journal of Management*. 2023; 11 (4): 58–68. (In Russ).

5. Siniutsich K.V. Updating existing standards in the sphere of transport service of the population by public transport of the republic of Belarus. *Vestnik of Brest State Technical University. Civil Engineering and Architecture*. 2022; 2 (128): 182–185. (In Russ.).

6. Lantseva V.Yu., Voskanyan A.A. Criteria for the quality and availability of transport services provided to the population. *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F.F. Ushakova*. 2023; 2 (43): 118–120. (In Russ.).

7. Lukonkina C.A., Gusev S.I., Epifanov V.V. Monitoring the quality of transport services in the system of interregional passenger road transport (on the example of Ulyanovsk region). *Vestnik Ul'janovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019; 3 (87): 58–61. (In Russ.).

8. Pyatakova A.S., Goryaev N.K., Myachkov K.Yu. Optimization of parameters for the assessment of municipal passenger transportation. *Vestnik juzhno-ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. seriya: jekonomika i menedzhment*. 2018; 4(12): 182–187. (In Russ.).

9. Kapelyuk Z.A., Popova Y.V. Trends in the development of transport services. *Nauchno-teoreticheskij zhurnal «Vestnik SibUPK» [Scientific-theoretical journal Bulletin Siberian University of Consumer Cooperation]*. 2020; 2 (32): 30–34. (In Russ.).

10. Fadeev A.I., Ilyankov A.M. Transport supply management on regular intercity bus lines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(5): 632–648. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-632-648>. EDN: WMBMDI

11. Kurokhtina A.O., Firsova V.P., Polygalova O.V., Prokofieva O.S. Research of regular passenger transportation in the case of Irkutsk. *Molodezhny jvestnik Ir GTU*. 2024; 14(1): 45–50. (In Russ.)

12. Chebokchinova N.M., Kapsargina S.A. Organization of public transport services in the Tashypsky district // *Law and state: theory and practice*. 2024; 3(231): 52–55. (in Russ) DOI: http://doi.org/10.47643/1815-1329_2024_3_52

13. Nazarov M.I., Omonturdiv A. M. Territorial organization of transport services for the population of Suruhanjaya region. *Ekonomika i socium*. 2024; 5-1 (120): 1459–1473. (In Russ.).

14. Zhigadlo A.P., Shonin A.Yu., Eychler I.A. Methodology for assessing the state of transport services for the population of the subject of the Russian Federation on the example of the Omsk region. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(6): 882–899. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-882-899>. EDN: HAVOZZ

15. Yakimov M. R. Approaches to formation of an effective route network of large cities // *Herald of the ural state university of railway transport*. 2022; 3(55): 107–113. (in Russ) DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-107-113

16. Yakunin N.N., Yakunina N.V., Lyubimov I.I. Regional passenger motor transport systems: prob-

lem statement, first estimation results. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(6): 748–761. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-748-761>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Жига́дло А.П. Концептуализация, валидация.

Орлов П.В. Методология, ресурсы.

Шонин А.Ю. Методология, исследования, ресурсы, подготовка первоначального проекта, обзор и редактирование.

Эйхлер И.А. Методология, исследования, ресурсы, курирование данных, подготовка первоначального проекта, обзор и редактирование.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Zhigadlo A.P. Conceptualization, validation.

Orlov P.V. Methodology, resources.

Shonin A.Yu. Methodology, research, resources, initial draft preparation, review and editing.

Eichler I.A. Methodology, research, resources, data curation, initial draft preparation, review and editing.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жига́дло Александр Петрович – канд. техн. наук, д-р пед. наук, проф., ректор Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СиБАДИ) (644080, г. Омск, пр. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8883-3167>,

SPIN-код: 6598-1490,

Scopus Author ID 57202984669,

Researcher ID N-6758-2017.

Орлов Павел Викторович – канд. техн. наук, начальник научно-исследовательского отдела Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СиБАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, д. 5).

ORCID: 0000-0002-9363-0735,

SPIN-код: 2413-6194.

Шонин Анатолий Юрьевич – канд. экон. наук, доц., начальник научно-исследовательского управления Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СиБАДИ) (644080, г. Омск, пр. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6229-3371>,

e-mail: antex@bk.ru

Эйхлер Иван Андреевич – канд. экон. наук, доц. кафедры «Экономика, логистика и управление качеством», институт «Информационные системы, экономика и управление» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СиБАДИ) (644080, г. Омск, просп. Мира, 5).

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

SPIN-код: 7562-4729,

Scopus Author ID 57728886700,

e-mail: vaniaeichler@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhigadlo Alexander P. – *Cand. of Sci. (Eng.), Dr. of Sci. (Pedagogy), Associate Professor, rector Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644080).*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8883-3167>,

SPIN-код: 6598-1490,

Scopus Author ID 57202984669,

Researcher ID N-6758-2017.

Orlov Pavel V. – *Cand. of Sci. (Eng.), Head of the Research Department Siberian State Automobile and Road University (SibADI) (644050, Omsk, ave. Mira, 5).*

ORCID: 0000-0002-9363-0735;

SPIN-код: 2413-6194.

Shonin Anatoly Yu. – *Cand. of Sci. (Economic.), Associate Professor, Head of Research Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644080).*

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6229-3371>,

e-mail: antex@bk.ru

Eychler Ivan A. – *Cand. of Sci. (Economic.), Associate Professor of the “Economics, Logistics and Quality Management” department, Institute “Information Systems, Economics and Management”, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644080).*

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

SPIN-код: 7562-4729,

Scopus Author ID 57728886700,

e-mail: vaniaeichler@gmail.com

Научная статья
УДК 656.13
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-68-77>
EDN: XVCWDWQ



ИНДЕКСЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ В РЕГИОНАХ

И.Е. Ильина¹, Е.Е. Витвицкий² ✉

¹Пензенский государственный аграрный университет,
г. Пенза, Россия

²Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия

✉ ответственный автор
vitvitsky_ee@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Существующая проблема состояния безопасности дорожного движения (БДД), заключающаяся главным образом в ухудшении демографической ситуации в Российской Федерации (РФ), диктует необходимость в значительном усилении государственной деятельности в повышении уровня безопасности дорожного движения. Для оценки уровня безопасности дорожного движения пользуются системой показателей, основанных на анализе количества дорожно-транспортных происшествий (ДТП) с учетом плотности транспортного потока, уровня автомобилизации, количества населения и т.д. Восемьдесят процентов дорожно-транспортных происшествий происходит в населенных пунктах и подавляющее большинство из них в субъектах регионов РФ. При этом около 90% ДТП происходит по причине нарушения правил дорожного движения водителями, 10% – пешеходами. На сегодняшний день среди 89 регионов РФ существует значительная неоднородность, определяемая целым рядом показателей, связанных с территориальным положением, экономическими, социальными и климатическими условиями, обуславливающими те или иные действия человека (человеческий фактор) как участника дорожного движения на улично-дорожной сети.

Цель проведения исследования. Определение индексов для сопоставления городов в рейтинге безопасности дорожного движения.

Материалы и методы. Методологической основой исследования являются математические и статистические методы оценки.

Результаты обсуждения. Основным результатом стало определение параметров, влияющих на состояние безопасности дорожного движения. Сгруппированы восемь индексов, характеризующих уровень безопасности дорожного движения, учитывающих параметры человеческого фактора. Определен важнейший параметр безопасности дорожного движения, рассматривающий человеческий фактор в системе «человек – автомобиль – дорога – среда».

Заключение. Предложена новая методика оценки уровня безопасности дорожного движения в условиях городской среды. Выявление субъектов РФ наиболее целесообразно для принятия первоочередных управленческих решений, направленных на повышение состояния безопасности дорожного движения с учетом человеческого фактора. Методика позволит оценить эффективность решения ключевых задач по предупреждению дорожно-транспортных происшествий, выполнения федеральных целевых программ и стратегий в сфере обеспечения безопасности дорожного движения в регионах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: безопасность дорожного движения, человеческий фактор, участники дорожного движения, система «человек – автомобиль – дорога – среда»

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

Статья поступила в редакцию 02.01.2025; одобрена после рецензирования 27.01.2025; принята к публикации 24.02.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Ильина И.Е., Витвицкий Е.Е., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Ильина И.Е., Витвицкий Е.Е. Индексы для оценки уровня безопасности дорожного движения в регионах // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 1. С. 68-77. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-68-77>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-68-77>

EDN: XVCDWQ

INDICES FOR ASSESSING ROAD SAFETY LEVELS IN THE REGIONS OF RUSSIA

Irina E. Ilyina¹, Evgeny E. Vitvitsky² ✉

¹Penza State Agrarian University,
Penza, Russia

²Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia

✉ corresponding author
vitvitsky_ee@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The current problem of road safety state (RTS), which appears mainly in the deterioration of the demographic situation in the Russian Federation (RF), results in the need for a significant strengthening of state activities in increasing the level of road safety. To assess the level of road safety, a system of indicators is used based on the analysis of the number of road accidents with traffic flow density, motorization level, the number of people, etc. taken into account. 80 per cent of road accidents occur in populated areas, the vast majority of them taking place in the subjects of Russian regions. At the same time, about 90 per cent of accidents occur due to violation of traffic rules by drivers, 10 per cent – by pedestrians. Today, among 89 regions of the Russian Federation, there is significant heterogeneity, determined by a number of indicators related to the territorial location, economic, social and climatic conditions that affect certain human actions (human factor) as related to a participant in street and road traffic.

The purpose of the study is to determine indices for comparing cities in the road safety rating.

Materials and methods. The methodological basis of the research is mathematical and statistical assessment methods.

Results and discussion. The main result has been determination of parameters affecting the state of road safety. Eight indices have been grouped that characterize the level of road safety taking into account parameters of the human factor. A most important road safety parameter has been established, by considering the human factor in the “man – car – road – environment” system.

Conclusion. A new methodology for assessing the level of road safety in urban environment is proposed. Identifying the subjects of the Russian Federation is most appropriate for making priority management decisions aimed at improving road safety, taking into account the human factor. The methodology will make it possible to assess the effectiveness of solving key tasks related to the prevention of road accidents, the implementation of federal targeted programs and strategies in the field of road safety in the regions of Russia.

KEYWORDS: road safety, road users, human-vehicle-road-environment system

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest. Vitvitsky E.E. 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: 02.01.2025; approved after reviewing: 27.01.2025; accepted for publication: 24.02.2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Ilyina I.E., Vitvitsky E.E. Indices for assessing road safety levels in the regions of Russia. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (1): 68-77. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-68-77>

© Ilyina I.E., Vitvitsky E.E., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в Российской Федерации официальная статистика использует следующие основные показатели состояния безопасности дорожного движения, выражающиеся в абсолютных значениях: количество дорожно-транспортных происшествий, пострадавших в них граждан, водителей транспортных средств; нарушителей правил дорожного движения, административных правонарушений и уголовных преступлений в области дорожного движения и вспомогательные показатели, отражающие состояние безопасности дорожного движения и результаты деятельности по ее обеспечению, выражающиеся в относительных значениях: число лиц, погибших в ДТП на 10 тыс. транспортных средств (транспортный риск), число погибших в ДТП на 100 тыс. населения (социальный риск), количество погибших на 100 травмированных в ДТП (тяжесть последствий), абсолютный показатель к показателю прошлого года (АППГ)^{1,2}.

В системе Европейской экономической комиссии Организации Объединенных Наций (ЕЭК ООН) используется риск гибели в дорожном движении. Этот показатель учитывает количество населения в различных странах и регионах.

Графическое представление абсолютных показателей аварийности и относительных показателей состояния БДД показывает цикличность. Увеличение показателей (до 1990 г.), их снижение (до 1997 г.), постепенный рост (до 2007 г.). В дальнейшем шаг цикла уменьшается. Снижение (до 2010 г.), увеличение (до 2013 г.), стабильное снижение показателей аварийности до 2022 г. С 2023 г. вновь наблюдается рост показателей аварийности³.

Все процессы жизнедеятельности непосредственно связаны с экономическими про-

цессами, а те, в свою очередь, подчиняются строгим законам цикличности. В данном случае в период до 2007 г. изменение динамики подчинялось экономическому циклу Жюгляра (7–11 лет), с 2008 г. произошли изменения на более короткий лаг – 3–4 года, что соответствует экономическому циклу Китчина [1]. Типичным примером цикла Китчина является краткосрочный экономический подъем между не менее краткосрочными спадами финансово-экономического кризиса (2008–2010) и валютным кризисом в России (2014–2015), в совокупности укладывающиеся в периодичность циклов Жюгляра и являющиеся его подфазой. Это в целом совпадает с динамикой аварийности и состояния безопасности⁴.

Целью государственной политики в области БДД является достижение показателя транспортного риска к 2030 г. (2,44 ед.)⁵, что позволит улучшить показатели демографического состояния. Текущие результаты деятельности по достижению целевого показателя уже изучаются и предлагаются адресные программы по повышению БДД, учитывающие региональную специфику процессов формирования дорожно-транспортной аварийности [2, 3, 4].

Задача оценки качества городской среды с позиции БДД является важной. Учет социальных, экономических и транспортных показателей развития регионов позволит повысить эффективность мероприятий по улучшению состояния БДД [5, 6, 7, 8, 9].

В Российской Федерации 75 крупных городов, в которых проживает около 53 млн чел. Именно такие города на сегодняшний день являются центрами транспортного сосредоточения и притяжения населения⁶, что в свою очередь предъявляет повышенные требования к обеспечению БДД [10, 11, 12]. Международный опыт показывает, что состояние

¹ О безопасности дорожного движения: федеральный закон от 10.12.1995 N 196-ФЗ (ред. от 30.07.2019) // Собрание законодательства РФ. 1995. № 50. Ст. 4873.

² Об утверждении Концепции федеральной целевой программы «Повышение безопасности дорожного движения в 2013–2020 годах»: распоряжение Правительства РФ от 27.10.2012 № 1995-р // Собрание законодательства РФ. 2012. № 45. Ст.6282.

³ Показатели состояния безопасности дорожного движения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://stat.gibdd.ru/> (дата обращения: 13.11.2024)

⁴ О федеральной целевой программе «Повышение безопасности дорожного движения в 2006–2012 годах»: постановление Правительства РФ от 20 февраля 2006 г. N 100 // Собрание законодательства РФ. 2006. № 9. Ст. 1020.

⁵ Об утверждении Стратегии безопасности дорожного движения в Российской Федерации на 2018–2024 годы: распоряжение Правительства РФ от 08.01.2018 N 1-р // Собрание законодательства РФ. 2018. № 5. Ст. 774.

⁶ Анализ факторов, влияющих на безопасность движения транспортных средств на маршруте / И.Х. Хасанов, В.И. Рассоха, Р.Р. Ибраев, М.В. Литвинов // XVIII Международная научно-практическая конференция: Прогрессивные технологии в транспортных системах. Оренбург. 2023. С. 479–482.

БДД оценивается всевозможными способами с применением различных методик, в основе которых лежит общий подход – использование в разных комбинациях абсолютных и относительных показателей тяжести последствий ДТП [13, 14, 15.]

Таким образом, очевидна необходимость разработки методики, основанной на сопоставлении городов по различным параметрам состояния БДД в зависимости от конкретных целей сопоставления. Основой разработки методики послужили приказы Министерства регионального развития и Министерства строительства и ЖКХ^{7,8}.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является состояние безопасности дорожного движения.

Цель исследования заключается в определении критериев для сопоставления городов в рейтинге безопасности дорожного движения.

Задачи исследования. 1. Провести анализ многочисленных показателей, связанных с условиями улично-дорожной сети, транспортной инфраструктуры, уровнем автомобилизации. 2. Провести расчет показателей на основании статистических и математических методов. 3. Учитывая статистические показатели определить интегральные показатели, необходимые для объективного сопоставления городов.

Метод интегральной оценки и набор показателей позволяют выявить преимущества и недостатки в обеспечении БДД в условиях городов.

Разработка аналитической базы, представляющей интерес для органов исполнительной власти различных уровней, помогает оценить ситуацию и принять верное решение. Рейтинг является базой для создания комплексных и отраслевых стратегий обеспечения и повышения состояния БДД, а также основой создания региональных программ.

Для сопоставления многочисленных свойств, измеряемых в разных по диапазону и размерности шкалах, используется относительный безразмерный показатель K , отражающий степень приближения абсолютного показателя свойства Q_i к максимальному $Q^{\max}$ и минималь-

ному $Q^{\min}$ показателям. Относительный показатель описывается зависимостью $K=f(Q^{\min}...Q_i...Q^{\max})$, которая может быть представлена нормирующей функцией

$$K = \frac{Q_i - Q^{\min}}{Q^{\max} - Q^{\min}}, \quad (1)$$

где Q_i – абсолютный показатель параметра;

$Q^{\min}$ – минимальный показатель параметра;

$Q^{\max}$ – максимальный показатель параметра.

Для сопоставления по относительной важности всех показателей используются безразмерные коэффициенты весомости β_{ij} . Вес определяется по методу многофакторной регрессии.

Таким образом, количественная оценка состояния БДД K_k выражается с помощью формулы

$$K_k = \sum_{i=1}^n k_i \beta_i, \quad (2)$$

где k_i – количественное значение параметра;

β_i – коэффициент весомости параметра.

Ключевая проблема отбора минимальной совокупности свойств (параметров), которые образуют качество объекта, решается за счет функционально-типологического анализа, основанного на рассмотрении качества как системы объективных свойств, а также исходя из объема исходной информации (статистической и открытых источников).

Таким образом, группы параметров, образующие индексы, полностью удовлетворяют требованиям достаточности и независимости.

Оценка состояния БДД городов осуществлялась по следующим параметрам: влияние водителя с учетом его возраста, стажа, пола, гражданства и категории водительского удостоверения; влияние человека как участника дорожного движения; влияние ребенка как участника дорожного движения; влияние транспортной инфраструктуры, ее доступности и характеристик внешней среды. Данные параметры сформированы на основании изучения трудов по оценке влияния человеческого фактора на состояние безопасности дорожного движения как отечественных специ-

⁷ Об утверждении методики оценки качества городской среды проживания: приказ Министерства регионального развития РФ от 9 сентября 2013 года № 371

⁸ Об утверждении Методики определения индекса качества городской среды муниципальных образований Российской Федерации: Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 31 октября 2017 года № 1494/пр.

алистов В.И. Рассохи⁹, Ю.В. Трофименко [16], С.С. Евтюкова¹⁰ [17], Л.С. Трофимовой [18], И.П. Энглези [19], Е.И. Железнова [20], Е.В. Куракиной [21], Е.В. Агеева [22], В.С. Волкова [23], В.Н. Баскова [24], И.Е. Ильиной [25], так и зарубежных Vaa T. [26], Reason J.¹¹

Для оценки состояния БДД отобраны параметры (32), которые в свою очередь объединены в 8 индексов.

Индексы, отражающие основные направления в оценке состояния БДД:

K_1 – состояние БДД в зависимости от возраста водителя;

K_2 – состояние БДД в зависимости от стажа управления водителем;

K_3 – состояние БДД в зависимости от гендерного признака водителя;

K_4 – состояние БДД в зависимости от гражданства водителя;

K_5 – состояние БДД в зависимости от категории водительского удостоверения водителя;

K_6 – состояние БДД в зависимости от категории участника дорожного движения;

K_7 – состояние БДД в зависимости от категории участника ребенка;

K_8 – характеристики среды.

Состояние БДД в зависимости от возраста водителя:

$$K_1 = \sum_{i=1}^8 Q_{1i}, \quad (3)$$

где Q_{1i} – количество ДТП со смертельным исходом по вине водителя в зависимости от его возраста, ед.

$$Q_{1i} = \frac{1}{8} \left(\frac{Q_{11} - Q_{11}^{\min}}{Q_{11}^{\max} - Q_{11}^{\min}} + \frac{Q_{12} - Q_{12}^{\min}}{Q_{12}^{\max} - Q_{12}^{\min}} + \frac{Q_{13} - Q_{13}^{\min}}{Q_{13}^{\max} - Q_{13}^{\min}} + \frac{Q_{14} - Q_{14}^{\min}}{Q_{14}^{\max} - Q_{14}^{\min}} + \frac{Q_{15} - Q_{15}^{\min}}{Q_{15}^{\max} - Q_{15}^{\min}} + \frac{Q_{16} - Q_{16}^{\min}}{Q_{16}^{\max} - Q_{16}^{\min}} + \frac{Q_{17} - Q_{17}^{\min}}{Q_{17}^{\max} - Q_{17}^{\min}} + \frac{Q_{18} - Q_{18}^{\min}}{Q_{18}^{\max} - Q_{18}^{\min}} \right), \quad (4)$$

где Q_{11} – возраст водителя от 18 до 21 года, ед.;

Q_{12} – возраст водителя от 21 до 25 лет, ед.;

Q_{13} – возраст водителя от 25 до 30 лет, ед.;

Q_{14} – возраст водителя от 30 до 40 лет, ед.;

Q_{15} – возраст водителя от 40 до 50 лет, ед.;

Q_{16} – возраст водителя от 50 до 60 лет, ед.;

Q_{17} – возраст водителя от 60 до 70 лет, ед.;

Q_{18} – возраст водителя старше 70 лет, ед.

Состояние БДД в зависимости от стажа управления водителем

$$K_2 = \sum_{i=1}^5 Q_{2i}, \quad (5)$$

где Q_{2i} – количество ДТП со смертельным исходом по вине водителя в зависимости от стажа управления водителем, ед.

$$Q_{2i} = \frac{1}{5} \left(\frac{Q_{21} - Q_{21}^{\min}}{Q_{21}^{\max} - Q_{21}^{\min}} + \frac{Q_{22} - Q_{22}^{\min}}{Q_{22}^{\max} - Q_{22}^{\min}} + \frac{Q_{23} - Q_{23}^{\min}}{Q_{23}^{\max} - Q_{23}^{\min}} + \frac{Q_{24} - Q_{24}^{\min}}{Q_{24}^{\max} - Q_{24}^{\min}} + \frac{Q_{25} - Q_{25}^{\min}}{Q_{25}^{\max} - Q_{25}^{\min}} \right), \quad (6)$$

где Q_{21} – стаж водителя до 2 лет, ед.;

Q_{23} – стаж водителя от 2 до 5 лет, ед.;

Q_{24} – стаж водителя от 5 до 10 лет, ед.;

Q_{25} – стаж водителя от 10 до 15 лет, ед.;

Q_{26} – стаж водителя свыше 15 лет, ед.

Состояние БДД в зависимости от гендерного признака водителя:

$$K_3 = \sum_{i=1}^2 Q_{3i}, \quad (7)$$

где Q_{3i} – количество ДТП со смертельным исходом по вине водителя в зависимости от гендерного признака, ед.

$$Q_{3i} = \frac{1}{2} \left(\frac{Q_{31} - Q_{31}^{\min}}{Q_{31}^{\max} - Q_{31}^{\min}} + \frac{Q_{32} - Q_{32}^{\min}}{Q_{32}^{\max} - Q_{32}^{\min}} \right), \quad (8)$$

Q_{31} – пол водителя «мужчина», ед.;

Q_{32} – пол водителя «женщина», ед.

Состояние БДД в зависимости от гражданства водителя:

$$K_4 = \sum_{i=1}^2 Q_{4i}, \quad (9)$$

⁹Рассоха В.И., Никитин Н.И. Безопасность велосипедистов на кольцевых пересечениях: краткий обзор и анализ литературы // XVI Международная научно-практическая конференция: Прогрессивные технологии в транспортных системах. Оренбург. 2021. С. 369–376.

¹⁰Евтюков С.С., Брылев И.С., Блиндер М.М. Пути повышения безопасности дорожного движения немеханических транспортных средств в г. Санкт-Петербурге // Международная научно-практическая конференция: Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте. Липецк. 2022. С. 39–48.

¹¹Reason, J. Human error: models and management / J. Reason // BMJ 320 (7237).2000. pp. 768–770

где Q_{4i} – количество ДТП со смертельным исходом по вине водителя в зависимости от гендерного признака, ед.

$$Q_{4i} = \frac{1}{2} \left(\frac{Q_{41} - Q_{41}^{\min}}{Q_{41}^{\max} - Q_{41}^{\min}} + \frac{Q_{42} - Q_{42}^{\min}}{Q_{42}^{\max} - Q_{42}^{\min}} \right), \quad (10)$$

где Q_{41} – водитель – гражданин СНГ, ед.;

Q_{42} – водитель – гражданин иностранного государства, ед.

Состояние БДД в зависимости от категории водительского удостоверения водителя:

$$K_5 = \sum_{i=1}^4 Q_{5i}, \quad (11)$$

где Q_{5i} – количество ДТП со смертельным исходом по вине водителя в зависимости от категории водительского удостоверения, ед.

$$Q_{5i} = \frac{1}{4} \left(\frac{Q_{51} - Q_{51}^{\min}}{Q_{51}^{\max} - Q_{51}^{\min}} + \frac{Q_{52} - Q_{52}^{\min}}{Q_{52}^{\max} - Q_{52}^{\min}} + \frac{Q_{53} - Q_{53}^{\min}}{Q_{53}^{\max} - Q_{53}^{\min}} + \frac{Q_{54} - Q_{54}^{\min}}{Q_{54}^{\max} - Q_{54}^{\min}} \right), \quad (12)$$

Q_{51} – категория «В», ед.;

Q_{52} – категория «С», ед.;

Q_{53} – категория «Д», ед.;

Q_{54} – категория «А», ед.;

Q_{54} – категория «А», ед.

Состояние БДД в зависимости от категории участника дорожного движения:

$$K_6 = \sum_{i=1}^3 Q_{6i}, \quad (13)$$

где Q_{6i} – количество ДТП со смертельным исходом в зависимости от категории участника дорожного движения, ед.

$$Q_{6i} = \frac{1}{3} \left(\frac{Q_{61} - Q_{61}^{\min}}{Q_{61}^{\max} - Q_{61}^{\min}} + \frac{Q_{62} - Q_{62}^{\min}}{Q_{62}^{\max} - Q_{62}^{\min}} + \frac{Q_{63} - Q_{63}^{\min}}{Q_{63}^{\max} - Q_{63}^{\min}} \right), \quad (14)$$

Q_{61} – участник дорожного движения «водитель», ед.;

Q_{62} – участник дорожного движения «пешеход», ед.;

Q_{63} – участник дорожного движения «пассажир», ед.

Состояние БДД в зависимости от категории участника ребенка:

$$K_7 = \sum_{i=1}^4 Q_{7i}, \quad (15)$$

где Q_{7i} – количество ДТП со смертельным исходом с участием детей, ед.

$$Q_{7i} = \frac{1}{4} \left(\frac{Q_{71} - Q_{71}^{\min}}{Q_{71}^{\max} - Q_{71}^{\min}} + \frac{Q_{72} - Q_{72}^{\min}}{Q_{72}^{\max} - Q_{72}^{\min}} + \frac{Q_{73} - Q_{73}^{\min}}{Q_{73}^{\max} - Q_{73}^{\min}} + \frac{Q_{74} - Q_{74}^{\min}}{Q_{74}^{\max} - Q_{74}^{\min}} + \frac{Q_{75} - Q_{75}^{\min}}{Q_{75}^{\max} - Q_{75}^{\min}} \right), \quad (16)$$

Q_{71} – ребенок «пассажир», ед.;

Q_{72} – ребенок «пешеход», ед.;

Q_{73} – ребенок «велосипедист», ед.;

Q_{74} – ребенок «водитель механического транспортного средства», ед.;

Q_{75} – ребенок «водитель средства индивидуальной мобильности», ед.

Характеристики среды:

$$K_8 = \sum_{i=1}^4 Q_{8i}, \quad (17)$$

где Q_{8i} – индексы, характеризующие среду жизнедеятельности человека.

$$Q_{8i} = \frac{1}{4} \left(\frac{Q_{81} - Q_{81}^{\min}}{Q_{81}^{\max} - Q_{81}^{\min}} + \frac{Q_{82} - Q_{82}^{\min}}{Q_{82}^{\max} - Q_{82}^{\min}} + \frac{Q_{83} - Q_{83}^{\min}}{Q_{83}^{\max} - Q_{83}^{\min}} + \frac{Q_{84} - Q_{84}^{\min}}{Q_{84}^{\max} - Q_{84}^{\min}} \right), \quad (18)$$

Q_{81} – суровость погоды;

Q_{82} – доходность населения;

Q_{83} – транспортный индекс.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице указаны результаты математических расчетов весовых коэффициентов. Определены наиболее значимые индексы. Уровень доходов населения и покупательская способность имеют прямо пропорциональную зависимость. Увеличение благосостояния, т.е. наличие денежных средств у населения, приводит к росту автомобилизации, что ухудшает состояние БДД. Весовой коэффициент транспортного индекса β_{83} составляет 0,612.

Фактические показатели аварийности наглядно позволяют показать истинное состояние БДД. Рост уровня автомобилизации подтверждает значимость индекса «водитель». Важнейшим параметром при определении уровня БДД в населенном пункте является водитель-мужчина (β_{61}, β_{31}) возрастом от 30 до 40 лет (β_{14}) со стажем управления более 15 лет (β_{25}), управляющий легковым транспортным средством (β_{51}) (см. таблицу).

Таблица
Определяющие индексы и их вес
Источник: составлено авторами.

Table
Defining indices and their weights
Source: compiled by the authors.

Индекс	Вес
Состояние БДД, характеризующееся возрастом водителя от 30 до 40 лет	$\beta_{14} = 0,419$
Состояние БДД, характеризующееся стажем управления водителем. Стаж водителя свыше 15 лет	$\beta_{25} = 0,332$
Состояние БДД, характеризующееся гендерным признаком водителя – мужчина	$\beta_{31} = 0,81$
Состояние БДД, характеризующееся гражданством водителя – водитель гражданин иностранного государства	$\beta_{42} = 3,216$
Состояние БДД, характеризующееся категорией водительского удостоверения водителя – категория «В»	$\beta_{51} = 0,851$
Состояние БДД, характеризующееся категорией участника дорожного движения – участник дорожного движения «водитель»	$\beta_{61} = 0,862$
Состояние БДД, характеризующееся категорией участника ребенка – ребенок «пешеход»	$\beta_{72} = 0,677$
Характеристики среды жизнедеятельности – транспортный индекс	$\beta_{83} = 0,612$

Дети-пешеходы β_{72} (всегда являлись и являются самыми незащищенными участниками дорожного движения в силу отсутствия навыков и элементарных знаний безопасного поведения на улично-дорожной сети.

ОБСУЖДЕНИЕ

Снижение аварийности на автомобильном транспорте, повышение безопасности дорожного движения является приоритетной задачей государства. Ежегодно в дорожно-транспортных происшествиях гибнут и получают ранения тысячи людей трудоспособного возраста. Это имеет непосредственное влияние на состояние демографии. Административно-территориальные образования Российской Федерации имеют различные климатические условия и географическое положение, социально-экономические показатели, бюджетные ресурсы и уровень собственных доходов.

В настоящее время состояние безопасности дорожного движения оценивают по абсолютным и относительным показателям аварийности. Существующие программы повышения безопасности дорожного движения имеют общие рекомендации и не учитывают

многочисленные особенности регионов. Проведенные исследования основаны на изучении отдельных показателей системы «человек – автомобиль – дорога – среда». Большое количество исследований посвящено изучению взаимодействия подсистем «человек – автомобиль», «автомобиль – дорога» и определению значимых параметров в них.

Разработанная методика позволит сравнить населенные пункты с одинаковым уровнем безопасности дорожного движения, а также определить основные проблемы, связанные с растущей автомобилизацией и подвижностью населения и выявить города с лучшей практикой организации мероприятий по предупреждению ДТП.

Методика является универсальной. Можно применить для определения значимых индексов в отношении населенного пункта с любым количеством жителей. Полученные результаты подтверждаются статистическими данными аварийности по Российской Федерации. Методика одновременно учитывает влияние 32 показателей. Является объективным инструментом для оценки состояния безопасности дорожного движения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, мониторинг рассматривается как один из видов управленческой деятельности, представляющей собой сбор информации об управляемых объектах с целью проведения оценки их состояния и прогнозирования дальнейшего развития. Не является исключением и обеспечение БДД, где мониторинг необходим, прежде всего, для выявления субъектов РФ, требующих финансовой поддержки по конкретным направлениям деятельности в области безопасности дорожного движения и обоснования финансового механизма стимулирования тех субъектов РФ, где наблюдается положительная динамика.

Рейтинг регионов по указанным параметрам представляется наиболее целесообразным для принятия первоочередных управленческих решений и финансирования мероприятий, направленных на повышение состояния безопасности дорожного движения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Korotayev A.V., Tsire, S.V. Spectral analysis of the dynamics of the global gross domestic product (GDP): Kondratiev Waves, Kuznets Fluctuations, Jaglar and Kitchin cycles in global economic development and 2008-2009, A economic crisis. Structure and dynamics. 2010. vol. 4.1. pp. 3–57.
2. Плотников А.М., Жанказиев С.В., Гурин Д.О. О текущих результатах деятельности по достижению целевого уровня безопасности дорожного движения в регионах России // Транспорт Российской Федерации. 2019. № 5(84). С. 45–49.
3. Петров А.И. Динамика и прогноз обеспечения безопасности дорожного движения в России до 2030 г. // Проблемы прогнозирования. 2024 № 5 (206). С. 152–164. DOI: 10.47711/0868-6351-206-152-164
4. Новиков А.Н., Еремин С.В., Ломакин Д.О. Оценка уровня безопасности дорожного движения на региональном уровне // Мир транспорта и технологических машин. 2020. № 3 (70). С. 72–79. DOI: 10.33979/2073-7432-2020-70-3-72-79
5. Сильянов В.В., Капитанов В.Т., Мони-на О.Ю., Чубуков А.Б. Прогноз числа погибших в ДТП на основе социально-экономических показателей // Наука и техника в дорожной отрасли. 2017. № 4. С. 4–6.
6. Новиков И.А., Кравченко А.А., Шевцова А.Г., Васильева В.В. Научно-методологический подход к снижению аварийности на дорогах Российской Федерации // Мир транспорта и технологических машин. 2019. № 3(66). С. 58–65. DOI: 10.33979/2073-7432-2019-66-3-58-64
7. Кравченко П.А., Олещенко Е.М. Системный подход в управлении безопасностью дорожного движения в Российской Федерации // Транспорт Российской Федерации. 2018. № 2 (75). С. 14–18.
8. Ильина И.Е., Витвицкий Е.Е. Методология стратификации субъектов РФ по состоянию безопасности дорожного движения // Мир транспорта и технологических машин. 2022. № 3-3 (78). С. 76–82. DOI: 10.33979/2073-7432-2022-3(78)-3-76-82
9. Фаттахов Р.В., Низамутдинов М.М., Орешников В.В. Ранжирование регионов России по демографической ситуации с учетом уровня развития социальной инфраструктуры // Мир новой экономики. 2020; 14(4): 96–109. DOI: <https://doi.org/10.26794/2220-6469-2020-14-4-96-109>
10. Зедгенизов А.В., Брянских Т.Б. Оценка интенсивности движения индивидуального транспорта к жилым объектам высокой этажности в г. Иркутске // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 3 (98). С. 97–104. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-3-97-104
11. Евтюков С.С., Брылев И.С., Блиндер М.М. Оценка влияния велосипедной инфраструктуры города на безопасность дорожного движения велосипедистов // Мир транспорта и технологических машин. 2022. № 3-2 (78). С. 76–84. DOI: 10.33979/2073-7432-2022-2(78)-3-76-84
12. Агуреев И.Е., Ахромешин А.В. Подходы к формализации понятия транспортного поведения населения городских агломераций // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2021. № 2. С. 60–70. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-2-60.
13. Кравченко П.А., Олещенко Е.М. Системность, компетентность, ответственность – ключевые факторы обеспечения безопасности дорожного движения в России // Транспорт Российской Федерации. 2016. № 4 (65). С. 22–27.
14. Новиков И.А., Шевцова А.Г., Бахарев Г.А. Оценка динамики аварийности на дорогах Российской Федерации и меры по её снижению // Техника и технологии строительства. 2015. № 4 (4). С. 5–10.
15. Ильина И.Е. Приемы оценки безопасности дорожного движения: обзор // Транспорт Российской Федерации. 2020. № 1 (86). С. 22–25.
16. Трофименко Ю.В., Шашина Е.В. Влияние человеческого фактора на обеспечение безопасности дорожного движения // Безопасность жизнедеятельности. 2016. № 1(181). С. 24–27.
17. Евтюков С.С., Голов Е.В., Коломеец А.А. Роль человеческого фактора при возникновении дорожно-транспортного происшествия // Транспортное дело России. 2018. № 2. С. 196–199.
18. Для цитирования: Бебинов С.Е., Трофимова Л.С. Теоретическое обоснование для разработки показателей совершенствования подготовки и переподготовки персонала пассажирского автомобильного транспорта // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 1. С. 48–61. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-1-48-61>
19. Энглез И.П. Определение вероятности возникновения ДТП на участках сети дорог с учётом человеческого фактора // Наука и техника в дорожной отрасли. 2017. № 4. С. 9–11.
20. Железнов Е.И., Казьмина Е.В. Влияние стажа и возраста водителя на безопасное управление автомобилем // Известия ВолгГТУ. 2012. Т. 5, № 2(89). 2012. С. 64–66.

21. Куракина Е.В., Складорова А.А. Повышение уровня безопасности дорожного движения в системе «участник дорожного движения – транспортное средство – дорога – внешняя среда» // Вестник СибАДИ. 2020; 17 (4): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-488-499>

22. Агеев Е.В., Виноградов Е.С. Методология прогнозирования ошибок кандидатом в водители при анализе дорожных ситуаций // Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 1-1 (84). С. 63–72. DOI: 10.33979/2073-7432-2024-1-1(84)-63-72

23. Волков В.С., Лебедев Е.Г. Влияние качества подготовки водительского состава на безопасность движения // Воронежский научно-технический вестник. 2023. № 2(44). С. 81–87.

24. Басков В.Н., Игнатов А.В. Оценка работоспособности водителя и ее влияние на эффективность и безопасность перевозочного процесса // Мир транспорта и технологических машин. 2022. №1 (76). С. 78–85. DOI: 10.33979/2073-7432-2022-76-1-78-85

25. Ильина И.Е. Выявление и оценка влияния человеческого фактора в возникновении дорожно-транспортного происшествия // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2020. № 9. С. 59–61.

26. Vaa T. Cognition and emotion in driver behaviour models: some critical viewpoints // Institute of Transport Economics. Oslo. 2007. pp. 48–59

REFERENCES

1. Korotayev A.V., Tsire S.V. Spectral analysis of the dynamics of the global gross domestic product (GDP): Kondratiev Waves, Kuznets Fluctuations, Jaglar and Kitchin cycles in global economic development and 2008-2009, A economic crisis. *Structure and dynamics*. 2010; 4.1: 3–57

2. Plotnikov A.M., Zhankaziev S.V., Gurin D.O. On the current results of activities aimed at achieving the target level of road safety in the regions of Russia. *Transport of the Russian Federation*. 2019; 5 (84): 45–49. (in Russ.) DOI: 10.47711/0868-6351-206-152-164

3. Petrov A.I. Dynamics and Forecast of Road Traffic Safety Management in Russia until 2030. *Studies on Russian Economic Development*. 2024; Vol. 35. No. 5: 716–724. DOI: 10.1134/S1075700724700254

4. Novikov A.N., Eremin S.V., Lomakin D.O. Assessment of road safety at the regional level. *World of transport and technological machines*. 2020; 3 (70): 72–79. (in Russ.) DOI: 10.33979/2073-7432-2020-70-3-72-79

5. Sil'yanov V.V., Kapitanov V.T., Monina O.Yu., Chubukov A.B. Forecast of road traffic fatalities based on socio-economic indicators. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2017; 4: 4–6. (in Russ.)

6. Novikov I.A., Kravchenko A.A., Shevtsova A.G., Vasileva V.V. Scientific methodological approach to reduce accidents on the roads of the Russian Federation. *World of transport and technological machines*. 2019; 3(66): 58–65. (in Russ.) DOI: 10.33979/2073-7432-2019-66-3-58-64

7. Kravchenko P.A., Oleshchenko E.M. System approach to road safety management in the Russian Federation. *Transport Rossijskoj Federacii*. 2018; 2 (75): 14–18. (in Russ.)

8. Ilyina I.E., Vitvitsky E.E. Methodology of stratification of the subjects of the Russian Federation on the state of road safety. *World of transport and technological machines*. 2022; 3-3 (78): 76–82. (in Russ.) DOI: 10.33979/2073-7432-2022-3(78)-3-76-82

9. Fattakhov R.V., Nizamutdinov M.M., Oreshnikov V.V. Ranking of Regions of Russia by the Demographic Situation Considering the Level of Development of Social Infrastructure. *The world of new economy*. 2020; 14(4): 96–109. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26794/2220-6469-2020-14-4-96-109>

10. Zedgenizov A.V., Bryanskiy T.B. Assessment of the intensity of individual transport traffic to high rise residential buildings in the city of Irkutsk. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers* 2023; 3 (98): 97–104. (In Russ.) DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-3-97-104

11. Evtyukov S.S., Brylev I.S., Blinder M.M. Assessment of the impact of the cycling infrastructure of the city on the road safety of cyclists. *The world of new economy*. 2022; 3-2 (78): 76–84. (In Russ.) DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-3-97-104

12. Agureev I.E., Akhromeshin A.V. Approaches to formalizing the concept of transport behavior of the population of urban agglomerations. *Intellect. Innovations. Investments*. 2021; Vol. 2: 60–70. (In Russ.) DOI: 10.25198/2077-7175-2021-2-60.

13. Kravchenko P.A., Oleshchenko E.M. Systemicity, competence, responsibility - key factors in ensuring road safety in Russia. *Transport Rossijskoj Federacii*. 2016; 4 (65): 22–27. (In Russ.)

14. Novikov I.A., Shevcova A.G., Baharev G.A. Assessment of dynamics of accident rate on roads Russian federation and measure for its decrease. *Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva*. 2015; 4 (4): 5–10. (In Russ.)

15. Il'ina I.E. Road safety assessment techniques: a review. *Transport Rossijskoj Federacii*. 2020; 1 (86): 22–25. (In Russ.)

16. Trofimenko Yu.V., Shashina E.V. Influence of the human factor in road-traffic safety. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2016; 1(181): 24–27. (In Russ.)

17. Evtyukov S.S., Golov E.V., Kolomeec A.A. The role of human factors in road traffic crashes. *Transport business of Russia*. 2018; 2: 196–199. (In Russ.)

18. Bebinov S.E., Trofimova L.S. Theoretical basis for development of indicators for improving training and retraining of specialists and passenger road transport personnel. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (1): 48–61. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-1-48-61>

19. Englezi I.P. Determining the probability of accidents on road network sections taking into account the human factor. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2017; 4: 9–11. (in Russ.)

20. Zheleznov E.I., Kaz'mina E.V. Influence of driver's experience and age on safe driving behavior

ior. *Izvestiya VolgGTU*. 2012; T. 5. No 2(89): 64–66. (in Russ.)

21. Kurakina E.V., Sklyarova A.A. Road safety improvement in road traffic participant – vehicle – road – external environment system. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (4): 488–499. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-488-499>

22. Ageev E.V., Vinogradov E.S. Methodology for predicting errors by a candidate driver in the analysis of road situations. *World of transport and technological machines*. 2024; 1-1 (84): 63–72. (in Russ.) DOI: [10.33979/2073-7432-2024-1-1\(84\)-63-72](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-1-1(84)-63-72)

23. Volkov V.S., Lebedev E.G. Influence of quality of preparation of driving composition on non-hazards of movement. *Voronezhskij nauchno-tekhnicheskij vestnik*. 2023; 2(44): 81–87. (in Russ.)

24. Baskov V.N., Ignatov A.V. Performance assessment of the driver and its impact on the efficiency and safety of the transport process. *World of transport and technological machines*. 2022; 1 (76): 78–85. (in Russ.) DOI: [10.33979/2073-7432-2022-76-1-78-85](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2022-76-1-78-85)

25. Il'ina, I.E. Identifying and assessing the influence of human factors in the occurrence of a road traffic accident. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyj informacionnyj sbornik*. 2020; 9: 59–61. (in Russ.)

26. Vaa T. Cognition and emotion in driver behaviour models: some critical viewpoints. *Institute of Transport Economics*. Oslo. 2007: 48–59

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Витвицкий Е.Е. Формирование направления, цели и задач исследования, теоретических положений; анализ нормативной документации, регуливающей обеспечение безопасности дорожного движения в РФ; корректировка статьи.

Ильина И.Е. Анализ трудов отечественных и зарубежных ученых по оценке влияния человеческого фактора на состояние безопасности дорожного движения; подготовка, написание статьи; математический расчет весовых коэффициентов параметров.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Vitvitsky E.E. Concept design, defining goals and objectives of the research, theoretical provisions, analysis of regulatory documentation in the sphere of road safety in the Russian Federation, correction of the manuscript.

Ilina I.E. Analysis of the works of domestic and foreign scientists related to the influence of the human factor on road safety, writing of the manuscript, mathematical calculations of weighting coefficients of parameters.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Витвицкий Евгений Евгеньевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Организация перевозок и безопасность движения» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644080, г. Омск, просп. Мира, 5), член-эксперт Комиссии по вопросам цифровой и низкоуглеродной трансформации отрасли, ускоренному внедрению новых технологий Общественного совета Минтранса России.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0155-8941>,

SPIN-код: 7136-0475,

e-mail: vitvitsky_ee@mail.ru

Ильина Ирина Евгеньевна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Технический сервис машин» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный аграрный университет» (440014, г. Пенза, ул. Ботаническая, 30), инженер 1-й категории отдела построения и развития интеллектуальной транспортной системы Государственного бюджетного учреждения Пензенской области «безопасный регион» (440031, г. Пенза, ул. Окружная, стр. 3Б).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0261-7824>,

SPIN-код: 9817-8690,

e-mail: iie.1978@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vitvitsky Evgeny E. – Dr. of Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Transport Organization and Traffic Safety Transportation, the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644080), expert member of the Commission on Digital and Low Carbon Transformation of the Industry, Accelerated Implementation of New Technologies of the Public Council of the Russian Ministry of Transport.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0155-8941>,

SPIN-code: 7136-0475,

e-mail: vitvitsky_ee@mail.ru

Ilina Irina Evgenievna – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of "Technical Service of Machines", the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Penza State Agrarian University" (440014, Penza region, Penza, Botany St., 30), 1st category engineer of the Department of Construction and Development of the intelligent Transport system of the Penza Region State Budgetary Institution "Safe region" (440031, Penza, Okruzhnaya St., p. 3B).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0261-7824>,

SPIN-код: 9817-8690,

e-mail: iie.1978@yandex.ru

Научная статья
УДК 656.13: 621.333]: 338.47: 502.1
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-78-89>
EDN: YRNYAK



ФОРМИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Е.Г. Кеян¹ ✉, А.Н. Мельников¹, О.А. Тамошина²

¹Оренбургский государственный университет,

²Филиал РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в г. Оренбурге,
г. Оренбург, Россия

✉ ответственный автор
keyan1959@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Цель работы – формирование параметра, характеризующего условия эффективной эксплуатации автомобилей с электрическим приводом. В процессе работы было установлено, что использование электромобилей связано не только с достижением экологических показателей, сокращением материальных затрат на эксплуатацию, но и с ограничением мобильности индивидуальных владельцев легковых автомобилей и владельцев коммерческого автомобильного транспорта. Ограничения связаны как со стоимостью новых автомобилей, так и с техническими пределами – запасом хода, продолжительностью зарядки тяговых батарей и развитостью зарядной инфраструктуры. При этом необходимо учитывать условия эксплуатации, влияющие на запас хода, а следовательно, на количество и продолжительность зарядных операций, что сказывается на продолжительности эксплуатационного цикла и цикла обслуживания автомобилей с электроприводом. В работе представлена математическая модель эффективности эксплуатации автомобилей с электроприводом, учитывающая взаимосвязь технических характеристик автомобилей, зарядной инфраструктуры с назначением и условиями эксплуатации автомобилей.

Материалы и методы. Представлены результаты опроса автовладельцев об условиях применения электромобилей, моделирования эксплуатации автомобилей с электроприводом, использованы классификации. Дано описание результатов и рекомендаций по технической эксплуатации автомобилей с электроприводом в зависимости от назначения и параметров эксплуатации.

Результаты. В качестве промежуточных результатов проводимого исследования получены граничные значения параметра эффективности использования автомобилей с электроприводом, позволяющие обосновать режимы их эксплуатации.

Обсуждение. Отмечено, что подход, реализуемый при формировании параметра эффективности эксплуатации автомобилей с электроприводом, позволяет обоснованно проводить мероприятия по развитию как парка электромобилей, так и инфраструктуры, обеспечивающей эффективную их эксплуатацию.

Заключение. В качестве обобщающего вывода отмечено, что предложенный параметр эффективности позволит оценить перспективы применения автомобилей с электроприводом в зависимости от сферы деятельности и условий эксплуатации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электромобили, зарядная инфраструктура, сокращение вредных выбросов, жизненный цикл электромобилей, эффективность эксплуатации электромобилей

Статья поступила в редакцию 09.11.2024; одобрена после рецензирования 23.12.2024; принята к публикации 24.02.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: 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>

© Кеян Е.Г., Мельников А.Н., Тамошина О.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-78-89>
EDN: YRNYAK

DETERMINATION OF AN EFFICIENCY PARAMETER FOR THE USE OF ELECTRIC VEHICLES

Ervand G. Keyan¹ ✉, Aleksey N. Melnikov¹, Olga A. Tamoshina²

¹Orenburg State University,

²The Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NRU) Branch in Orenburg
Orenburg, Russia

✉ corresponding author
keyan1959@mail.ru

ADSTRACT

Introduction. The main purpose of the work is to determine a parameter characterizing conditions for effective operation of electrically powered vehicles. It has been found that the use of electric vehicles is associated not only with environmental performance, reducing operation costs, but also with limited mobility of both individual owners of passenger cars and owners of commercial vehicles. The limitations are related to the cost of new cars and technical characteristics – power reserve, charging time of traction batteries and charging infrastructure. At the same time, it is necessary to take into account the operating conditions that affect the power reserve, and therefore the number and time of charging operations, which affect the operating cycle length and the maintenance cycle of electric vehicles. The paper presents a mathematical model for efficient operation of electric vehicles, taking into account the relationship of the technical characteristics of cars, charging infrastructure with the purpose and operating conditions of cars.

Materials and methods. The results of a survey into opinions of car owners about the conditions of electric vehicles operation, modeling of electric vehicles operation, and classifications have been used. The results and recommendations for the technical operation of electric vehicles are described, depending on the purpose and operating parameters.

Results. As intermediate results of the conducted research, the boundary values of the parameter of the efficiency of using electric vehicles were obtained, which makes it possible to justify their operating modes.

Discussion. It is noted that the approach implemented in determining the efficiency parameter for electric vehicle operation makes it possible to reasonably carry out measures to develop both the fleet of electric vehicles and the infrastructure that ensures their efficient operation.

Conclusion. It has been concluded that the efficiency parameter proposed will make it possible to assess the prospects for the use of electric vehicles, depending on the field of activity and operating conditions.

KEYWORDS: electric vehicles, charging infrastructure, reduction of harmful emissions, life cycle of electric vehicles, efficiency of operation of electric vehicles

The article was submitted: 09.11.2024; **approved after reviewing:** 23.12.2024; **accepted for publication:** 24.02.2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Keyan E.G., Melnikov A.N., Tamoshina O.A. Determination of an efficiency parameter for the use of electric vehicles. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (1): 78-89. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-78-89>

© Keyan E.G., Melnikov A.N., Tamoshina O.A., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Одним из современных направлений развития автомобильного транспорта является использование транспортных средств на электрической тяге – электромобилей.

Электромобиль имеет ряд видимых преимуществ по сравнению с моделями, оснащенными двигателем внутреннего сгорания, – отсутствие выбросов отработавших газов в процессе работы двигателя и шумового загрязнения окружающей среды. При этом имеются и существенные недостатки эксплуатации таких автомобилей, связанные как с экологическими аспектами, так и с экономическими.

Сравнительная характеристика электромобилей и автомобилей с традиционными двигателями возможна при анализе жизненного цикла данных транспортных средств.

Жизненный цикл автомобиля включает следующие стадии:

- производство – изготовление узлов, деталей, сборка автомобиля, строительство инженерных сооружений;
- использование (эксплуатация) – выполнение транспортной работы в период нормативного срока службы;
- восстановление работоспособности;
- проведение технического обслуживания (содержания) и ремонта автомобиля с восстановлением деталей, узлов, агрегатов, выработавших ресурс и их замена;
- утилизация отслужившего срок автомобиля;
- разборка (ликвидация), переработка непригодных к восстановлению деталей и узлов, повторное использование конструкционных, строительных и эксплуатационных материалов на предыдущих этапах жизненного цикла автомобиля или в других сферах деятельности, а также захоронение отходов.

Рассматривая вопросы увеличения доли автомобилей с электроприводом, необходимо учитывать взаимосвязь факторов, влияющих на эффективность их эксплуатации. При этом для формирования параметра эффективности эксплуатации электромобилей важно учитывать цель их приобретения и использования. Также нужно учитывать, что как существующие владельцы, так и частные лица и предприниматели, планирующие в настоящее время приобрести автомобили с электроприводом, уже сопоставили возможности электромобилей со своими потребностями. В то же время значительная часть автовладельцев испытывает определенные опасения, связанные с отказом от автомобилей с традиционными

двигателями внутреннего сгорания и переходом на эксплуатацию электромобилей. Если индивидуальные владельцы для принятия решения исходят из субъективных предпочтений и возможностей, то для предприятий, организаций и предпринимателей использование электромобилей не должно сопровождаться рисками невозможности выполнения своих функций или снижения эффективности их выполнения.

При выполнении работы проведен анализ научных исследований, связанных с разнообразными аспектами существования электромобилей на различных этапах их жизненного цикла.

В работах [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] приведена характеристика экологических аспектов развития автотранспорта с электроприводом, проанализированы направления развития рынка электромобилей в России, анализ выбросов CO₂ на этапе жизненного цикла электромобилей и сравнение стоимости их эксплуатации. Так, в работе [1] авторы исследуют настроения общественности, связанные с приобретением и использованием электромобилей. При этом не учитываются какие-либо технические параметры автотранспортных средств с электроприводом, цели и условия эксплуатации, развитость зарядной инфраструктуры. В трудах [2, 3, 4, 5, 6, 7] авторы рассматривают развитие как российского, так и мирового рынка электромобилей сквозь призму проблем глобального потепления, декарбонизации с позиции автопроизводителей, государства. Недостатком следует считать отсутствие учета потребностей конечных пользователей этих автомобилей.

В статьях [8, 9, 10, 11, 12, 13] представлены направления и перспективы развития электромобилей в Российской Федерации, энергетические и неэнергетические аспекты, препятствующие распространению автотранспортных средств с электроприводом. Авторами [8, 9, 10, 11, 12] рассматриваются экономические аспекты эксплуатации автомобилей с электроприводом, делается заключение о достижении положительного экономического эффекта от эксплуатации грузовых электромобилей с увеличением объемов их производства, снижения цен на тяговые аккумуляторные батареи, развития сети зарядных и сервисных станций. При этом не приводятся какие-либо критерии, позволяющие установить границы эффективности использования такого рода транспортных средств. В работе [13] автор проводит сравнительный анализ эффективности эксплуатации автомобилей с различными

источниками энергии, не приводя каких-либо параметров эффективности эксплуатации электромобилей.

Исследования [14, 15, 16, 17, 18] направлены на изучение влияния зарядной инфраструктуры на развитие электротранспорта. В данных работах авторы анализируют динамику развития парка электромобилей в России, мировой опыт, рассматривают проблематику роста парка электромобилей с позиции государства, энергоснабжающих компаний. Исследования посвящены формированию технических требований к зарядным станциям, их размещению, а также мерам государственного стимулирования продаж электромобилей.

Труды [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25], а также полученные результаты оценки работы автомобилей с электроприводом¹ посвящены исследованию экономической эффективности электромобилей на этапах жизненного цикла. Данные исследования направлены на установление суммарных затрат на всех этапах жизненного цикла автотранспортных средств с разными энергетическими установками на различных энергоносителях. При этом авторы ставят под сомнение эффективность эксплуатации электромобилей с существующими в настоящее время технико-экономическими параметрами.

В работах [26, 27] представлены аспекты обеспечения мобильности населения на основе использования индивидуальных транспортных средств. Авторы отмечают мобильность населения как один из важнейших показателей качества жизни. В этой связи важно установить способность автомобилей с электроприводом удовлетворять разнообразные потребности населения в автомобильных перевозках.

Содержание результатов исследований, посвященных проблематике эксплуатации электромобилей, позволило сформулировать требования к подсистемам производства, эксплуатации, утилизации электромобилей, а также к параметрам инфраструктуры, обеспечивающей эксплуатацию автомобилей с электроприводом.

Анализ содержания рассмотренных научных работ позволил выявить факторы, не нашедшие достаточного отражения при формировании критериев эффективности эксплуатации автомобилей с электрическим приводом. Большинство исследователей от-

мечены вопросы экологии – сокращения вредных выбросов в окружающую среду, а также экономической эффективности эксплуатации электромобилей на этапах жизненного цикла. Ряд исследований посвящен изучению взаимосвязи зарядной инфраструктуры и динамики развития парка электромобилей. При этом не нашли достаточного отражения вопросы взаимосвязи параметров эффективности эксплуатации автомобилей с электроприводом с потребностями владельца автомобиля.

Цель работы – обоснование параметра эффективности эксплуатации автомобилей с электроприводом. Предмет исследования – взаимосвязь параметра эффективности эксплуатации автомобилей с электроприводом с потребностями владельца автомобиля.

Для достижения поставленной цели необходимо решение ряда задач:

- провести литературный обзор в области, определяемой тематикой исследования;
- разработать методику оценки эффективности эксплуатации автомобилей с электроприводом с потребностями владельцев в конкретных условиях эксплуатации;
- разработать практические рекомендации к конструкции электромобилей и зарядной инфраструктуры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Актуальность темы исследования обусловлена общемировой тенденцией производства и эксплуатации экологически чистого автомобильного транспорта с электроприводом. Прирост парка автомобилей с электроприводом в мире составляет 8,6%, при этом в странах ЕС наблюдается максимальный прирост в 28,7%, в КНР – 12,9%, в США – 4,5% [25].

Несмотря на высокие показатели прироста парка электромобилей, в России по состоянию на начало 2024 г., по данным агентства «Автостат», насчитывается 37,8 тыс. автомобилей с электроприводом.

Рассматривая структуру парка по целевому использованию, на долю автомобилей индивидуальных владельцев, применяющих транспортные средства в личных целях, приходится 84,1% всех автотранспортных средств, на долю коммерческого автотранспорта, автомобилей предприятий и организаций – 15,9% [25].

¹ Истягин В.М., Губарь С.А. Комплексная оценка эффективности электромобиля // Материалы секционных заседаний 60-й студенческой научно-практической конференции ТОГУ: материалы конференции. В 2 томах, Хабаровск, 26–30 апреля 2020 года / Редколлегия: И.Н. Пугачев (отв. редактор) [и др.]. Том 1. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2020. С. 87–91. EDN: TUWKPH.

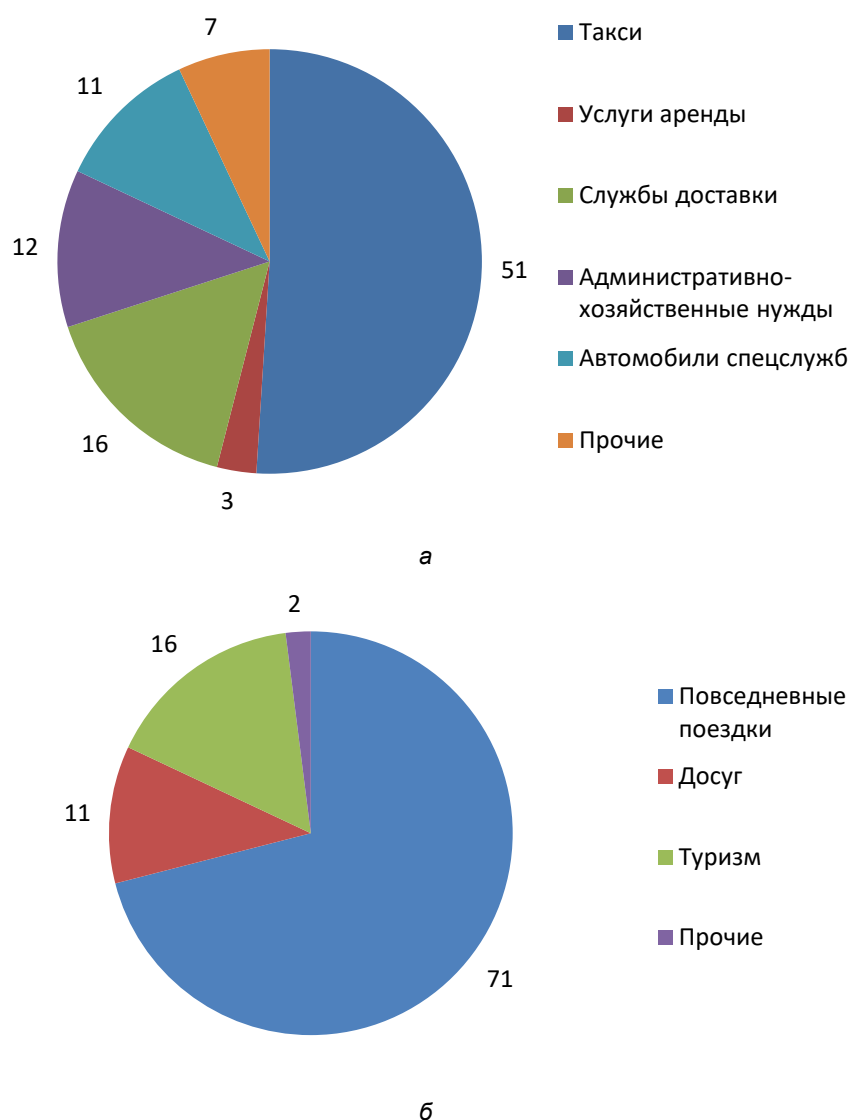


Рисунок 1 – Направления использования автотранспортных средств:
 а – предприятий и организаций, в коммерческих целях, %;
 б – индивидуальных владельцев в личных целях, %
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Use of motor vehicles
 a – enterprises and organizations, commercial purposes, %;
 b – individual owners, personal purposes, %
 Source: compiled by the author.

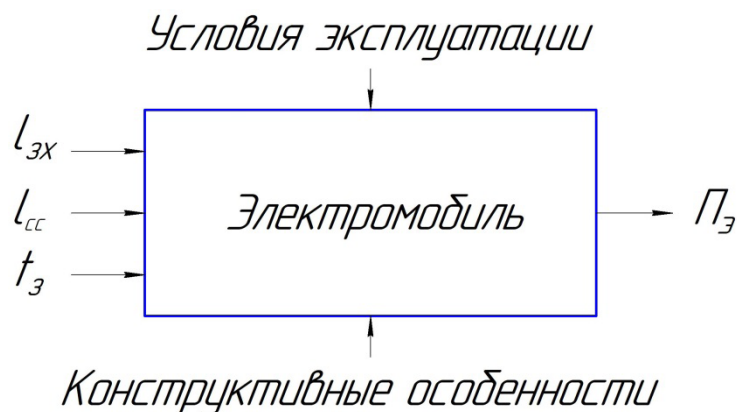


Рисунок 2 – Схема взаимосвязи параметра эффективности эксплуатации электромотобилля с его техническими характеристиками и параметром эксплуатации
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Relationship between the efficiency parameter for electric vehicle operation and its technical characteristics and the operation parameter
Source: compiled by the author.

При формировании критериев эффективности эксплуатации электромотобилей необходимо учитывать их целевое назначение, которое характеризуется:

- периодом эксплуатации;
- особенностями распределения фонда периода эксплуатации в течение суток, дней недели, характерных сезонов года;
- суточными пробегами;
- дорожными условиями;
- условиями движения;
- природно-климатическими условиями.

На рисунке 1 представлены результаты установления направлений использования автомобилей предприятий и организаций, коммерческих легковых автотранспортных средств (рисунок 1, а) и автомобилей индивидуальных владельцев (рисунок 1, б) на примере г. Оренбурга. Исследование проводилось анкетным методом среди владельцев автотранспортных средств с традиционными двигателями внутреннего сгорания.

Таким образом, удовлетворенность владельцев и пользователей автомобилей с электроприводом от использования данного типа транспортных средств зависит от их способности выполнять заданные функции в пределах широкой номенклатуры направлений приме-

нения в сравнении с транспортными средствами на традиционных видах топлива.

К основным характеристикам электромотобилей, существенно влияющих на эффективность их использования, относятся: запас хода, продолжительность заряда тяговой батареи и доступность зарядной инфраструктуры.

На рисунке 2 представлена схема взаимосвязи параметра эффективности эксплуатации электромотобилля $\Pi_з$ с его техническими характеристиками – запасом хода на полном заряде тяговой батареи $l_{зх}$ временем заряда $t_з$ и параметром эксплуатации – среднесуточным пробегом $l_{сс}$.

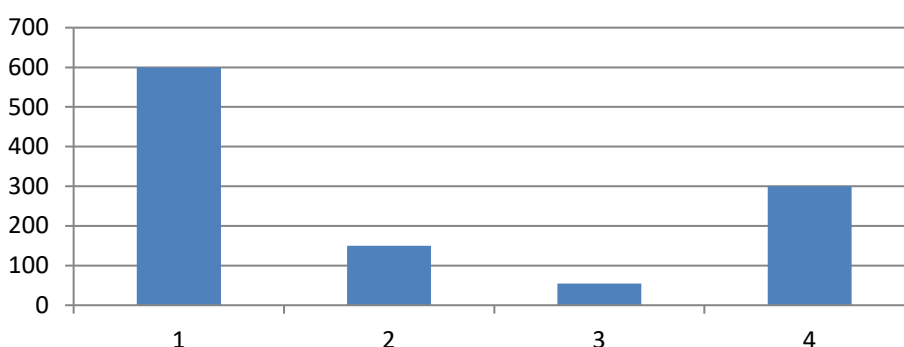
В качестве гипотезы выдвинуто предположение о характере связи параметра эффективности эксплуатации электромотобилей с его техническими характеристиками и параметром эксплуатации:

$$\Pi_з = f(l_{зх}, l_{сс}, t_з) \rightarrow \max. \quad (1)$$

Таким образом, на основе анализа условия (1) возможно сформулировать требования к конструкции и условиям заряда электромотобилей, обеспечивающих оптимальную эффективность их эксплуатации.



1 – такси; 2 – службы доставки; 3 – услуги аренды; 4 – прочие;
5 – административно-хозяйственные нужды; 6 – автомобили спецслужб



1 – туризм; 2 – досуг; 3 – повседневные поездки; 4 – прочие

Рисунок 3 – Среднесуточные пробеги в исследуемых группах автотранспортных средств:
а – предприятий и организаций, в коммерческих целях, км;
б – индивидуальных владельцев в личных целях, км
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Average daily mileage in the groups of vehicles under study
a – enterprises and organizations, for commercial purposes, km.;
b – individual owners for personal purposes, km.
Source: compiled by the author.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Различные по направлениям использования транспортные средства характеризуются разной транспортной работой, которую можно выразить среднесуточным пробегом. На рисунке 3 представлены результаты установления значений среднесуточных пробегов в исследуемых группах автотранспортных средств.

В качестве параметра $\Pi_{э}$, характеризующего эффективность эксплуатации электромобиля, предлагается использовать выражение

$$\Pi_{э} = \frac{T_{эм}}{T_n}, \quad (2)$$

где $T_{эм}$ – время работы электромобиля, ч;

T_n – нормативное время, необходимое для выполнения работы, ч.

Нормативное время, необходимое для выполнения работы, T_n , связано со среднесуточным пробегом автомобиля и средней скоростью его движения, которые определяются условиями движения

$$T_n = \frac{l_{cc}}{v_{cp}}, \quad (3)$$

где l_{cc} – среднесуточный пробег для выполнения необходимой работы, км;

v_{cp} – средняя скорость автомобиля, км/ч.

Время работы электромобиля $T_{эм}$, ч, можно представить в виде

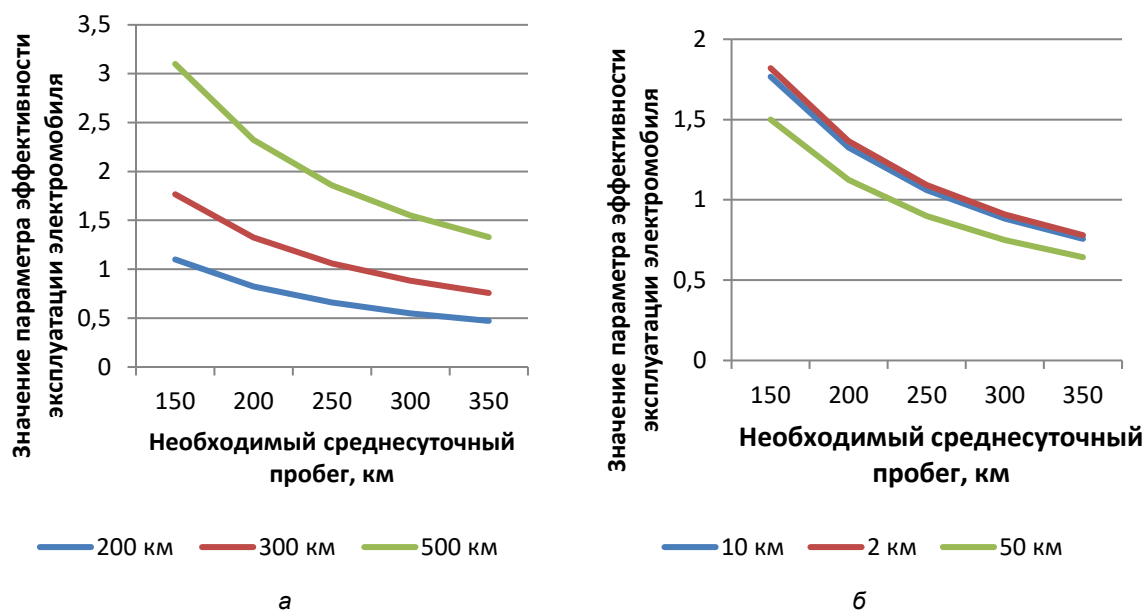


Рисунок 4 – Зависимость параметра эффективности эксплуатации электромобиля от величины необходимого среднесуточного пробега автомобиля при вариации: а – запаса хода на полном заряде батареи; б – среднего расстояния до зарядной станции
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Dependence between the efficiency parameter for electric vehicle operation and the value of the required average daily mileage of the car with a variation of: a – the power reserve at full battery charge; b – the average distance to the charging station
Source: compiled by the author.

$$T_{эм} = T_{1з} - (T_{зс} + T_з), \quad (4)$$

где $T_{1з}$ – время работы электромобиля до допустимого уровня разряда тяговой батареи, ч;

$T_{зс}$ – время следования электромобиля к зарядной станции, ч;

$T_з$ – продолжительность заряда тяговой батареи электромобиля, ч.

Время работы электромобиля до допустимого уровня разряда тяговой батареи $T_{1з}$, ч, можно представить в виде выражения

$$T_{1з} = \frac{l_{1з}}{v_{cp}}, \quad (5)$$

где $l_{1з}$ – пробег электромобиля до допустимого уровня разряда тяговой батареи, км.

Время следования электромобиля к зарядной станции $T_{зс}$, ч, зависит от степени развития зарядной инфраструктуры

$$T_{зс} = \frac{\bar{l}_{зс}}{v_{cp}}, \quad (6)$$

где $\bar{l}_{зс}$ – среднее расстояние следования до зарядной станции, км.

Продолжительность заряда тяговой батареи электромобиля $T_з$, ч, определяется конструктивными особенностями транспортного средства, зарядной станции, режима заряда, степенью разряда и заряда батареи, которые в совокупности влияют на время эффективной работы электромобиля.

Таким образом, с учётом выражений (2) – (6) выражение (1) можно представить

$$\Pi_э = \frac{l_{1з} - (\bar{l}_{зс} + T_з v_{cp})}{l_{cc}} \rightarrow \max. \quad (6)$$

На рисунке 4 представлена зависимость параметра эффективности эксплуатации электромобиля $\Pi_э$ от величины необходимого среднесуточного пробега автомобиля. При определении величины параметра использовано значение запаса хода при полностью заряженной тяговой батарее.

Результаты оценки параметра эффективности эксплуатации электромобиля свидетельствуют о существенном влиянии на эффективность его работы конструктивных параметров – емкости батареи, обеспечивающей запас хода и продолжительности заряда, а также зарядной инфраструктуры, характеризующейся затратами времени на пополнение заряда тяговой батареи.

Дальнейшие исследования будут направлены на установление взаимосвязи параметра эффективности эксплуатации электромобилей при частичном разряде и неполной зарядке тяговой батареи.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксплуатация автомобилей с электроприводом наряду со значимым экологическим эффектом тем не менее обладает существенными недостатками, ограничивающими их использование. Одними из основных параметров, обеспечивающих эффективность эксплуатации электромобилей, являются конструктивные параметры – запас хода и продолжительность зарядки автомобиля, а также эксплуатационный параметр, характеризующий удовлетворение потребности в перевозке – среднесуточный пробег.

В ходе анализа известных научных работ выявлена недостаточная проработанность вопросов, связанных с установлением параметров эффективности использования электромобилей. Выполненный в данной работе анализ направлений применения автомобилей предприятий и организаций, коммерческих легковых автотранспортных средств и автомобилей индивидуальных владельцев на примере г. Оренбурга позволил установить как структуру парка легковых автомобилей по направлениям их использования, так и показатели их эксплуатации – среднесуточные пробеги.

Сформированная математическая модель позволяет, с одной стороны, определить сферы эффективного использования электромобилей, с другой стороны, дать рекомендации производителям автомобилей с электроприводом по требованиям к емкости тяговых батарей и параметрам зарядной инфраструктуры.

Выпускаемые в настоящее время в Российской Федерации электромобили, например, «Москвич Зе», Evolute, максимальные значения параметра эффективности эксплуатации обеспечивают при поездках протяженностью до 250 км для повседневных поездок, работы служб доставки, административных поездок. Снижение значения параметра эффектив-

ности для более продолжительных поездок связано как с ограниченной емкостью тяговых батарей, так и с недостаточной развитостью зарядной инфраструктуры.

Направлением дальнейших исследований является установление комплекса факторов, влияющих на эффективность использования зарядной инфраструктуры, позволяющей обеспечить максимально эффективную эксплуатацию автомобилей с электроприводом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wibowo A.S., Septiari D. How Does the Public React to the Electric Vehicle Tax Incentive Policy? A Sentiment Analysis // *Journal of Tax Reform*. 2023. Vol. 9, No. 3. P. 413–429. DOI 10.15826/jtr.2023.9.3.150. EDN EKSJNZ.
2. Ремизова Т.С., Кошелев Д.Б. Влияние мировых тенденций на рынок электромобилей в России: проблемы, возможности и направления развития // *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. 2021. Т. 17, № 5(398). С. 913–939. DOI: 10.24891/ni.17.5.913. EDN DATBHI.
3. Hall D., Lutsey N. Effects of Battery Manufacturing on Electric Vehicle LifeCycle Greenhouse Gas Emission. ICCT. 2018. URL: <https://theicct.org/publications/EV-battery-manufacturing-emissions>
4. Nealer R., Reichmuth D., Anir D. Cleaner Cars from Cradle to Grave. How Electric Cars Beat Gasoline Cars on Lifetime Global Warming Emission. Union of Concerned Scientists, 2015. URL: <https://ucsusa.org/sites/default/files/attach/2015/11/Cleaner-Cars-fromCradle-to-Grave-full-report.pdf>.
5. Колпаков А.Ю., Галингер А.А. Экономическая эффективность распространения электромобилей и возобновляемых источников энергии в России // *Вестник Российской академии наук*. 2020. Т. 90, № 2. С. 128–139. DOI: 10.31857/S086958732002005X. EDN JCGEJZ.
6. Барабошкина А.В., Кудрявцева О.В. Экстерналии издержки от автомобильного транспорта в контексте перехода к низкоуглеродной экономике: российский опыт // *Вестник Московского университета. Серия 6: Экономика*. 2023. № 3. С. 137–156. DOI: 10.55959/MSU0130-0105-6-58-3-7. EDN PBLPHQ.
7. Мигунов П.А., Ярцева А.С., Нилова К.А., Рябов Е.А. Достоинства и недостатки экологического грузового транспорта // *Наука через призму времени*. 2019. № 6(27). С. 42–46. EDN ZPDWDI.
8. Фасхиев Х.А. Экономическая эффективность автотранспорта на электрической тяге. Часть 1 // *Грузовик*. 2019. № 3. С. 3–10. EDN GEABPH.
9. Фасхиев Х.А. Экономическая эффективность автотранспорта на электрической тяге. Часть 2 // *Грузовик*. 2019. № 4. С. 7–16. EDN ZKGNTI.
10. Фасхиев Х.А. Экономическая эффективность эксплуатации электрического легкого грузовика // *Грузовое и пассажирское автохозяйство*. 2023. № 2. С. 23–28. EDN UNWBKI.

11. Фасхиев Х.А. Электрический привод – будущее автотранспорта. Часть 2 // Грузовик. 2019. № 11. С. 15–23. EDN PDAHGI.
12. Фасхиев Х.А. Электрический привод – будущее автотранспорта. Часть 1 // Грузовик. 2019. № 10. С. 7–10. EDN FFFMNX.
13. Петров М.Б., Кожов К.Б. Новые возможности и новые проблемы перехода к электрическим транспортным технологиям // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2018. № 4(40). С. 33–45. DOI: 10.20291/2079-0392-2018-4-33-45. EDN: YWPTTV.
14. Беляева И.А., Козловский В.Н. Инфраструктурные аспекты развития качества электромобилей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 12. С. 99–102. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-12-99-100. EDN: WWKAPG.
15. Юсупова И.В., Арзамасова А.Г., Селезнев Д.К. Актуальная повестка развития зарядной инфраструктуры для транспортных средств с электродвигателями в России // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2022. № 3(66). С. 123–136. EDN DBOIUG.
16. Востров А.В., Раков В.А. Анализ экономической эффективности эксплуатации электромобилей при разных схемах зарядки // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. 2024. № 2(24). С. 70–73. EDN: KRMCGP.
17. Терентьев Е.Е., Блянкинштейн И.М. Методика выбора типа аккумулятора для эксплуатации электромобилей в регионах с холодным климатом // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2023. № 1. С. 112–124. DOI: 10.25198/2077-7175-2023-1-112. EDN: FNKXAN.
18. Мусина Л.Ф. Электрические транспортные системы: инфраструктура зарядных станций для электромобилей // Экономика и управление: проблемы, решения. 2024. Т. 7, № 11(152). С. 95–103. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2024.11.07.010. EDN: EMHNHG.
19. Отарский А.А., Демидов А.В., Знаменский О.И. Использование городских электромобилей // Международный научный журнал. 2009. № 3. С. 84–87. EDN KZHBIN.
20. Митягин Г.Е. Проблемы и перспективы производства и эксплуатации электротранспортных средств в России / Г.Е. Митягин, О. П. Андреев, Видурани Рупасингхе Арачиге Апсара // Международный технико-экономический журнал. 2022. Т. 83, № 2. С. 33–44. DOI: 10.34286/1995-4646-2022-83-2-33-44.
21. Батуев Н.И., Сурков А.А. Оценка жизненного цикла электромобиля // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2022. Т. 1, С. 87–90. EDN LEOPUR.
22. Иосифов В.В. Оценка экологических эффектов инновационных автотранспортных технологий по стандарту ГОСТ Р ИСО 14040–2010 // Эксплуатация морского транспорта. 2017. № 3(84). С. 20–26. EDN: ZXQXUR.
23. Азаров В.К., Козлов А.В., Кутенев В.Ф., Теренченко А.С. Экономика современных и перспективных конструкций автомобилей в их полном жизненном цикле // Журнал автомобильных инженеров. 2013. № 1(78). С. 46–48. EDN RYEGXP.
24. Армашова-Тельник Г.С., Пак С.А. Неоднородность преимуществ эксплуатации электромобилей в контексте инновационного развития Северо-Западного региона // Актуальные проблемы экономики и управления. 2022. № 1(33). С. 12–18. EDN: WYGYBJ.
25. Венжик А.В., Мнускина Ю.В., Хазипова В.В. Причины негативного воздействия электромобиля на окружающую среду // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2020. № 3(7). С. 91–95. EDN FYJBZK.
26. Вульфович Р.М. Мобильность как определяющий фактор качества жизни // Управленческое консультирование. 2018. № 9(117). С. 79–93. DOI: 10.22394/1726-1139-2018-9-79-93. EDN: YLXYGD.
27. Pavloudakis F., Roumpos C., Karlopoulos E., Koukoulas, N. Sustainable Rehabilitation of Surface Coal Mining Areas: The Case of Greek Lignite Mines. *Energies* 2020, 13, 3995. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13153995>.

REFERENCES

1. Wibowo A.S., Septiari D. How Does the Public React to the Electric Vehicle Tax Incentive Policy? A Sentiment Analysis. *Journal of Tax Reform*. 2023; Vol. 9, No. 3: 413–429. DOI: 10.15826/jtr.2023.9.3.150. EDN EKSJNZ.
2. Remizova T.S., Koshelev D.B. The Impact of Global Trends on the Electric Vehicle Market in Russia: Challenges, Opportunities and Directions of Development. *National Interests: Priorities and Security*. 2021; vol. 17, iss. 5: 913–939. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24891/ni.17.5.913>
3. Hall D., Lutsey N. Effects of Battery Manufacturing on Electric Vehicle Life Cycle Greenhouse Gas Emission. ICCT. 2018. URL: <https://theicct.org/publications/EV-battery-manufacturing-emissions>.
4. Nealer R., Reichmuth D., Anir D. Cleaner Cars from Cradle to Grave. How Electric Cars Beat Gasoline Cars on Lifetime Global Warming Emission. Union of Concerned Scientists, 2015. URL: <https://ucsusa.org/sites/default/files/attach/2015/11/Cleaner-Cars-from-Cradle-to-Grave-full-report.pdf>.
5. Kolpakov A.Yu., Galinger A.A. Economic efficiency of electric vehicles and renewable energy distribution in Russia. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2020; T. 90, no 2: 128–139. (in Russ.) DOI: 10.31857/S086958732002005X. EDN JCGEJZ.
6. Baraboshkina A.V., Kudryavtseva O.V. External costs of road transport in the context of the transition to a low-carbon economy: Russian experience. *Moscow University Economics Bulletin*. 2023; (3): 137–156. (In Russ.) <https://doi.org/10.55959/MSU0130-0105-6-58-3-7>
7. Migunov P.A., Yartseva A.S., Nilova K.A., Ryabov E.A. Advantages and disadvantages of ecological freight transport. *Science through the prism of time*.

2019; 6(27): 42–46. EDN ZPDWDI.EDN ZPDWDI. (In Russ.)

8. Faskhiev H.A. Economic efficiency of electric traction vehicles. Part 1 *Truck*. 2019; 3: 10. EDN GEABPH. (In Russ.)

9. Faskhiev H.A. Economic efficiency of electric traction vehicles. Chast' 2. *Truck*. 2019; 4: 7–16. EDN ZKGNTI. (In Russ.)

10. Faskhiev H.A. Economic efficiency of electric light truck operation. *Cargo and passenger automobile economy*. 2023; 2: 23–28. EDN UNWBKI. (In Russ.)

11. Faskhiev H.A. Electric drive – the future of motor transport. Part 2. *Truck*. 2019; 11: 15–23. EDN PDAHGI. (In Russ.)

12. Faskhiev H.A. Electric drive – the future of motor transport. Part 1. *Truck*. 2019; 10: 7–10. EDN FFFMNX. (In Russ.)

13. Petrov M.B., Kozhov K.B. New opportunities and new challenges in the transition to electric transport technologies. *Bulletin of the Ural State University of Communications*. 2018; 4(40): 33–45. (In Russ.) DOI: 10.20291/2079-0392-2018-4-33-45. EDN YWPTTV.

14. Belyaeva I.A., Kozlovskij V.N. Infrastructure aspects of electric vehicle quality development. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU)*. 2023; 12: 99–102. (In Russ.) DOI: 10.24412/2071-6168-2023-12-99-100. EDN WWKAPG.

15. Yusupova I.V., Arzamasova A.G., Seleznev D.K. Current agenda for the development of charging infrastructure for vehicles with electric motors in Russia. *Bulletin of PNU*. 2022; 3(66): 123–136. EDN DBOIUG. (In Russ.)

16. Vostrov A.V., Rakov V.A. Analysis of economic efficiency of electric vehicles operation at different charging schemes. *Bulletin of Vologda State University*. 2024; 2(24): 70–73. EDN KRMCGP. (In Russ.)

17. Terentiev E.E., Blyankinshtein I. M. Methodology for selecting the type of battery for operation of electric vehicles in cold regions. *Intellect. Innovations. Investments*. 2023; Vol. 1: 112–124. DOI <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-1-112>.

18. Musina L.F. Electric transport systems: infrastructure of charging stations for electric vehicles. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya*. 2024; T. 7, No 11(152): 95–103. (In Russ.) DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2024.11.07.010. EDN EMHHNG.

19. Otarskiy A.A., Demidov A.V., Znamenskiy O.I. Utilization of urban electric vehicles. *International Scientific Journal*. 2009; 3: 84–87. EDN KZHBIN. (In Russ.)

20. Mityagin G.E. Andreev O.P., Rupasinghi Arachchige Apsara Vidurangani Problems and prospects of production and operation of electric vehicles in Russia. *International Technical and Economic Journal*. 2022; T. 83. No 2: 33–44. (In Russ.) DOI: 10.34286/1995-4646-2022-83-2-33-44.

21. Batuev N.I., Surkov A.A. Life cycle assessment of an electric vehicle. *Modernization and scientific research in the transport complex*. 2022; T. 1: 87–90. EDN LEOPUR. (In Russ.)

22. Iosifov V.V. Assessment of environmental effects of innovative motor transport technologies according to the standard GOST R ISO 14040-2010. *Operation of maritime transport*. 2017; 3(84): 20–26. EDN: ZXQXUR. (In Russ.)

23. Azarov V.K., Kozlov A.V., Kutenev V.F., Terenchenko A.S. Economics of modern and advanced car designs in their full life cycle. *Journal of Automotive Engineers*. 2013; 1(78): 46–48. EDN RYEGXP. (In Russ.)

24. Armashova-Telnik G.S., Pak S.A. Ambiguity of the advantages of electric vehicles operation in the context of innovative development of the North-West region. *Actual problems of economics and management*. 2022; 1(33): 12–18. EDN WYGYBJ. (In Russ.)

25. Venzhik A.V., Mnuskina Y.V., Khazipova V.V. Causes of the negative impact of electromobility on the environment. *Fire and technosphere safety: problems and ways of improvement*. 2020; 3(7): 91–95. EDN FYJBZK. (In Russ.)

26. Vulfovich R.M. Mobility as a Life Quality Domain. *Administrative Consulting*. 2018; (9): 79–93. DOI: <https://doi.org/10.22394/1726-1139-2018-9-79-93>

27. Pavloudakis, F., Roumpos C. Karlopoulos E., Koukouzas N. Sustainable Rehabilitation of Surface Coal Mining Areas: The Case of Greek Lignite Mines. *Energies*. 2020; 13: 3995. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13153995>.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Кеян Е.Г. Формулирование проблемы исследований, постановка задач исследования, обозначения направления экспериментальных исследований.

Мельников А.Н. Формирование гипотезы исследования, анализ технико-эксплуатационных показателей работы электромобилей.

Тамошина О.А. Выполнение эксперимента и обработка его результатов, выполнение обзора литературных источников, формирование выводов по работе.

CO-AUTHORS' CONTRIBUTION

Keyan E.G. Design of the research problem, research objectives, drafting experimental research directions.

Melnikov A.I.N. Design of the research hypothesis, analysis of technical and operational performance of electric vehicles.

Tamoshina O.A. Performing the experiment and processing its results, reviewing literary sources, drawing conclusions on the work.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кеян Ерванд Грантович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей» Оренбургского государственного университета (460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5658-782X>,

SPIN-код: 5829-3818,

e-mail: keyan1959@mail.ru

Мельников Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей» Оренбургского государственного университета (460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7324-2674>,

SPIN-код: 7759-1293,

e-mail: mlnikov@rambler.ru

Тамошина Ольга Александровна – канд. техн. наук, доц. отделения химической технологии переработки нефти, газа и экологии, Филиал РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в г. Оренбурге (460047, г. Оренбург, ул. Юных Ленинцев, д. 20).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7170-1733>,

SPIN-код: 1221-2954,

e-mail: otamoshina@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Keyan Ervand H. – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Orenburg State University (460018, Orenburg region, Orenburg, Pobedy avenue, 13).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5658-782X>,

SPIN-code: 5829-3818,

e-mail: keyan1959@mail.ru

Melnikov Alexey N. – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Orenburg State University (13, Pobedy Ave., Orenburg, Orenburg region, 460018).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7324-2674>,

SPIN-code: 7759-1293,

e-mail: mlnikov@rambler.ru

Tamoshina Olga A. – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Chemical Technology of Oil, Gas Processing and Ecology, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (RGU) Branch in Orenburg (20, Yunykh Lenintsev str., Orenburg, Orenburg region, 460047).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7170-1733>,

SPIN-code: 1221-2954,

e-mail: otamoshina@mail.ru

Научная статья
УДК 629.015
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-90-101>
EDN: ZHDKFE



ВЛИЯНИЕ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ НА КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОМ ПРИВОДЕ

А.В. Климов^{1,2}

¹ООО «Инновационный центр КАМАЗ»,
г. Москва, Россия

²Московский политехнический университет,
г. Москва, Россия
klimmanen@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В настоящее время транспортные средства с электромеханической силовой передачей и электрохимической аккумуляторной батареей в качестве источника энергии всё чаще можно встретить на улично-дорожной сети. Это электромобили, используемые как личный транспорт, электробусы как общественный пассажирский транспорт, грузовые электромобили, используемые для различных нужд. Главным свойством данной техники является обеспечение требуемого запаса хода на одной подзарядке. Для этого необходимо применять совершенные компоненты силовой передачи, источники энергии и методы управления, обеспечивающие минимизацию энергозатрат. Поскольку процессы в электромеханической силовой передаче протекают с высокой скоростью, в контуре управления двигателем с частотами до 10 кГц и более, при наличии низкой инерционности и жёсткости внешней механической характеристики электродвигателя, создаются ситуации для возбуждения колебательных явлений. Особенно важны режимы изменения условий движения (тяговый, ведомый, тормозной), сопровождаемые изменением направления усилия в зоне контакта колеса с дорогой и направления приложения нагрузки в зубчатых зацеплениях. Данный процесс сопровождается переключением, т.е. входением в зацепление другой стороны зубьев. При быстром изменении крутящего момента такой процесс может сопровождаться ударом с последующим возбуждением фрикционных колебаний. Поэтому важно эффективно управлять назначением крутящего момента для устранения данных негативных явлений.

Цель исследования. Необходимо проверить влияние S-образного закона назначения крутящего момента в управлении электромеханической силовой передачи на динамическую нагруженность механической трансмиссии и на энергоэффективность движения.

Материалы и методы. Исследование влияния закона назначения крутящего момента выполнено с применением методов экспериментальных исследований.

Результаты исследования. S-образный закон назначения крутящего момента показал возможность исключения возбуждения колебаний при изменении режима движения и направления приложения нагрузки в механической трансмиссии силовой передачи. Высокое значение рекуперативного момента при отпуске педали хода и движении в тормозном режиме снижает эффективность движения, увеличивая удельные энергозатраты на 1 км пути.

Заключение. Применение S-образного закона назначения крутящего момента возможно для реализации алгоритмов управления движением и реализации программного обеспечения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: колебания в электромеханической силовой передаче, переключая зубьев, динамическая нагруженность, S-образный закон задания момента, энергоэффективность

Статья поступила в редакцию 23.11.2024; одобрена после рецензирования 10.01.2025; принята к публикации 24.02.2025.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Климов А.В. Влияние закона управления на колебательные процессы в электромеханическом приводе // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, №1. С. 90-101. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-90-101>

© Климов А.В., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-90-101>
EDN: ZHDKFE

INFLUENCE OF THE CONTROL LAW ON OSCILLATORY PROCESSES IN ELECTROMECHANICAL DRIVE

Alexander V. Klimov^{1,2}

¹ООО «KAMAZ Innovation Center»,
Moscow, Russia 2

²Moscow Polytechnic University,
Moscow, Russia
klimmanen@mail.ru

ABSTRACT

Relevance. Currently, vehicles with electromechanical power transmission and electrochemical battery as the energy source are being registered on the road network. These are electric vehicles used as personal transport, electric buses as public passenger transport, electric cargo vehicles used for various needs. The main feature of this transport is related to providing the required power reserve for 1 charge. To do this, it is necessary to use advanced power transmission components, energy sources and control methods to minimize energy consumption. Since the processes in the electromechanical power transmission run at high speeds, in the motor control circuit with frequencies up to 10 kHz or more, situations of exciting oscillatory phenomena occur where low inertia and rigidity of the external mechanical characteristics of the electric motor are observed. In particular, the modes of changing driving conditions (traction, driven, braking) are of importance, which are accompanied by a change in the direction of force in the contact zone of the wheel and the road and the direction of load application in the gears. This process is accompanied by reconnection, i.e. meshing of the other side of the teeth. With a rapid change in torque, this process can be accompanied by a shock followed by excitation of frictional vibrations. Therefore, it is important to effectively control the torque to eliminate these negative consequences.

The purpose of the study. It is necessary to check the influence of the S-shaped law of torque setting in the control of an electromechanical power transmission on the dynamic load of a mechanical transmission and on the energy efficiency of movement.

Materials and methods. The study of the influence of the law of torque setting was carried out based on experimental research methods.

The results of the study. The S-shaped law of torque setting has shown the possibility of eliminating vibrations excitation when changing the driving mode and the direction of load application in the mechanical transmission of the power transmission. A high value of the regenerative torque when releasing the pedal and moving in braking mode results in reduced movement efficiency, increased specific energy consumption per 1 kilometer.

Conclusion. The application of the S-shaped law of torque setting is suitable for the implementation of motion control algorithms and software.

KEYWORDS: oscillations in an electromechanical power transmission, overstretching of teeth, dynamic loading, S-shaped law of torque setting, energy efficiency

The article was submitted: 23.11.2024; **approved after reviewing:** 10.01.2025; **accepted for publication:** 24.02.2025.

The author 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. Klimov A.V. Influence of the control law on oscillatory processes in electromechanical drive. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (1): 90-101. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-90-101>

© Klimov A.V., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время транспортные средства с электромеханической силовой передачей и электрохимической аккумуляторной батареей в качестве источника энергии всё чаще можно встретить на улично-дорожной сети. Это электромобили, используемые как личный транспорт, электробусы как общественный пассажирский транспорт, грузовые электромобили, используемые для различных нужд. Главным свойством для данной техники является обеспечение требуемого запаса хода на одной подзарядке. Для этого необходимо применять совершенные компоненты силовой передачи, источники энергии и методы управления, обеспечивающие минимизацию энергозатрат.

Поскольку процессы в электромеханической силовой передаче протекают с высокой скоростью, в контуре управления двигателем с частотами до 10 кГц и более, при наличии низкой инерционности и жёсткости внешней механической характеристики электродвигателя, создаются ситуации для возбуждения колебательных явлений. Особенно важны режимы изменения условий движения (тяговый, ведомый, тормозной), сопровождаемые изменением направления усилия в зоне контакта колеса с дорогой и направления приложения нагрузки в зубчатых зацеплениях. Данный процесс сопровождается переключением, т.е. вхождением

в зацепление другой стороны зубьев. При быстром изменении крутящего момента такой процесс может сопровождаться ударом с последующим возбуждением фрикционных колебаний. Поэтому важно эффективно управлять назначением крутящего момента для устранения данных негативных явлений.

Электромеханическая силовая передача, включающая в себя тяговый привод и механическую трансмиссию, позволяет реализовывать рекуперативное замедление при отпуске педали хода. При этом можно выделить 3 зоны работы привода в зависимости от положения педали: I – тормозной режим; II – режим движения по инерции; III – тяговый режим (рисунки 1, 2, 3).

В режиме движения по инерции для снижения динамической нагруженности механической трансмиссии электродвигатель может реализовывать небольшой рекуперативный момент.

Также важен переход между тяговым и тормозным режимами, так как в этих случаях происходит изменение направления приложения нагрузки в зубчатых передачах. Поскольку инерция электропривода мала, в данном случае могут наблюдаться ударные нагрузки в зацеплениях механической передачи, проявляющиеся в колебаниях частоты вращения валов.

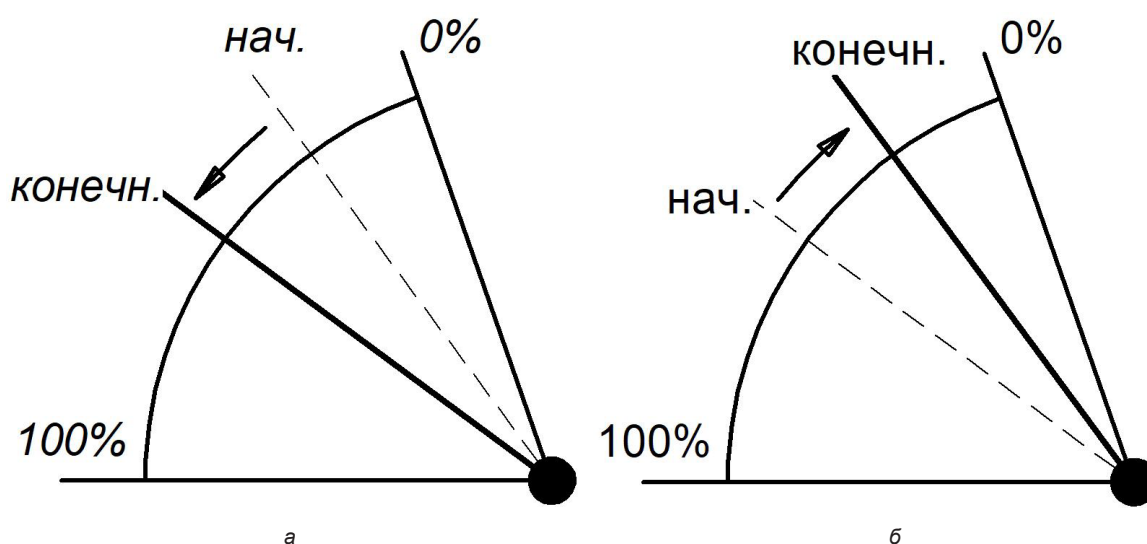


Рисунок 1 – Основные принципы управления ускорения и замедления:
а – при разгоне (ускорении); б – при замедлении (торможении)
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Basic principles of acceleration and deceleration control:
a – during acceleration (acceleration); б – during deceleration (deceleration)
Source: compiled by the authors.

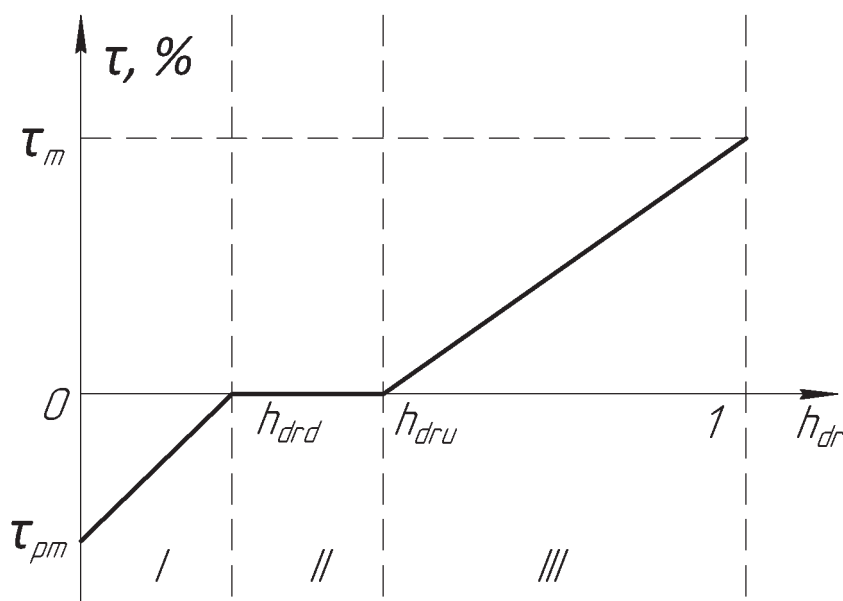


Рисунок 2 – Монотонный характер зависимости уставок крутящего момента τ от положения педали
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Monotonous character of dependence between torque settings and pedal position
Source: compiled by the authors.

Такое явления может возникать из-за изменения нагрузки как на выходном звене (колесе), так и на входном (вал электродвигателя). Последнее происходит из-за высокой жёсткости внешней характеристики привода и колебаний (пульсаций) крутящего момента из-за не идеальности электромагнитной системы и методов управления.

Очень важно реализовывать методы управления крутящих моментов, позволяющие исключить или минимизировать дополнительные динамические нагрузки. Поэтому целью исследования является проверка влияния на динамическую нагруженность различных законов задания момента.

Исследование характера различных зависимостей задания крутящего момента на динамическую нагруженность механических

передач электропривода можно выполнять методами натурных экспериментальных исследований.

Исследование характера зависимости крутящего момента от положения педали хода

Существует монотонный характер зависимости уставок крутящего момента от положения педали (см. рисунок 2) и S-образный характер (см. рисунок 3) [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. Значение рекуперативного крутящего момента в режиме движения по инерции обеспечивает как имитацию сопротивления в трансмиссии, так и исключение указанных выше переключений при колебаниях сопротивления движения и нормальной нагрузки на колёсах, а также влияет на энергоэффективность движения.

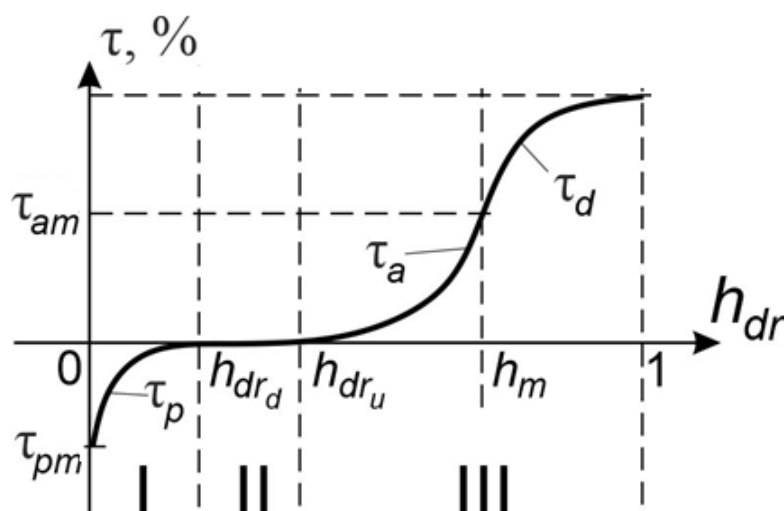


Рисунок 3 – S-образный характер зависимости уставок крутящего момента τ от положения педали h_{dr} ¹
Источник: составлено автором.

Figure 3 – S-shaped character of dependence between torque settings τ and pedal position¹ h_{dr}
Source: compiled by the authors.

При установке водителем педали в положение, соответствующее диапазону $h_{dru} - h_{drd}$ машина осуществляет движение по инерции (режим II). При этом значение рекуперативного крутящего момента в режиме движения по инерции $h_{dru} - h_{drd}$ обеспечивает как имитацию сопротивления в трансмиссии, так и исключение указанных выше переключений при колебаниях сопротивления движения и нормальной нагрузки на колёсах, а также влияет на энергоэффективность движения. При установке педали в положение более чем h_{dru} , но менее чем h_m тяговый электрический привод переходит в тяговый режим (III), причём при S-образном законе управления уставка крутящего момента τ_m рассчитывается по полиномиальной зависимости $\tau_a = d \left(\frac{h_{dr}}{h_{dru}} \right)^n + e \left(\frac{h_{dr}}{h_{dru}} \right) + f$, где d, e, f – коэффициенты, определяемые из граничных условий.

В случае дальнейшего нажатия на педаль хода более чем h_m становится доступным использование максимального крутящего момента, и его уставка рассчитывается по полиномиальной зависимости $\tau_d = k h_{dr}^2 + l h_{dr} + m$, где k, l и m – коэффициенты, определяемые из граничных условий. Если водитель отпу-

скает педаль и её положение находится в диапазоне от 0 до h_{drd} , тяговый привод переходит в режим рекуперативного торможения (режим I) с максимально возможной уставкой τ_{pm} . Закон назначения уставки при S-образном законе определяется полиномом $\tau_p = a \left(\frac{h_{dr}}{h_{drd}} \right)^2 + b \left(\frac{h_{dr}}{h_{drd}} \right) + c$, где a, b и c – коэффициенты, рассчитанные исходя из граничных условий. Коэффициенты полиномов при S-образном законе управления устанавливаются исходя из обеспечения перехода между режимами движения с нулевой скоростью изменения крутящего момента и асимптотического их приближения.

Были проведены испытательные заезды транспортного средства² имеющего как монотонный, так и S-образный характер зависимостей крутящих моментов, при которых осуществлялись разгоны после трогания с места по прямой при нажатии педали хода и замедления при её отпускании на ровной асфальтовой дороге. На ведущие колёса устанавливались тензометрические колёса Kistler Rim для фиксации силовых и кинематических параметров. Дополнительно параметры фиксировались с помощью штатных датчиков с CAN шины.

¹ Патент РФ № 2799275 С1, 04.07.2023. Способ управления ускорением и замедлением транспортного средства тяговым электрическим приводом с помощью одной педали хода // Патент на изобретение № 2023110482 от 24.04.2023 / Климов А.В., Жилейкин М.М., Оспанбеков Б.К., Антонян А.В., Давоян Г.Ю.

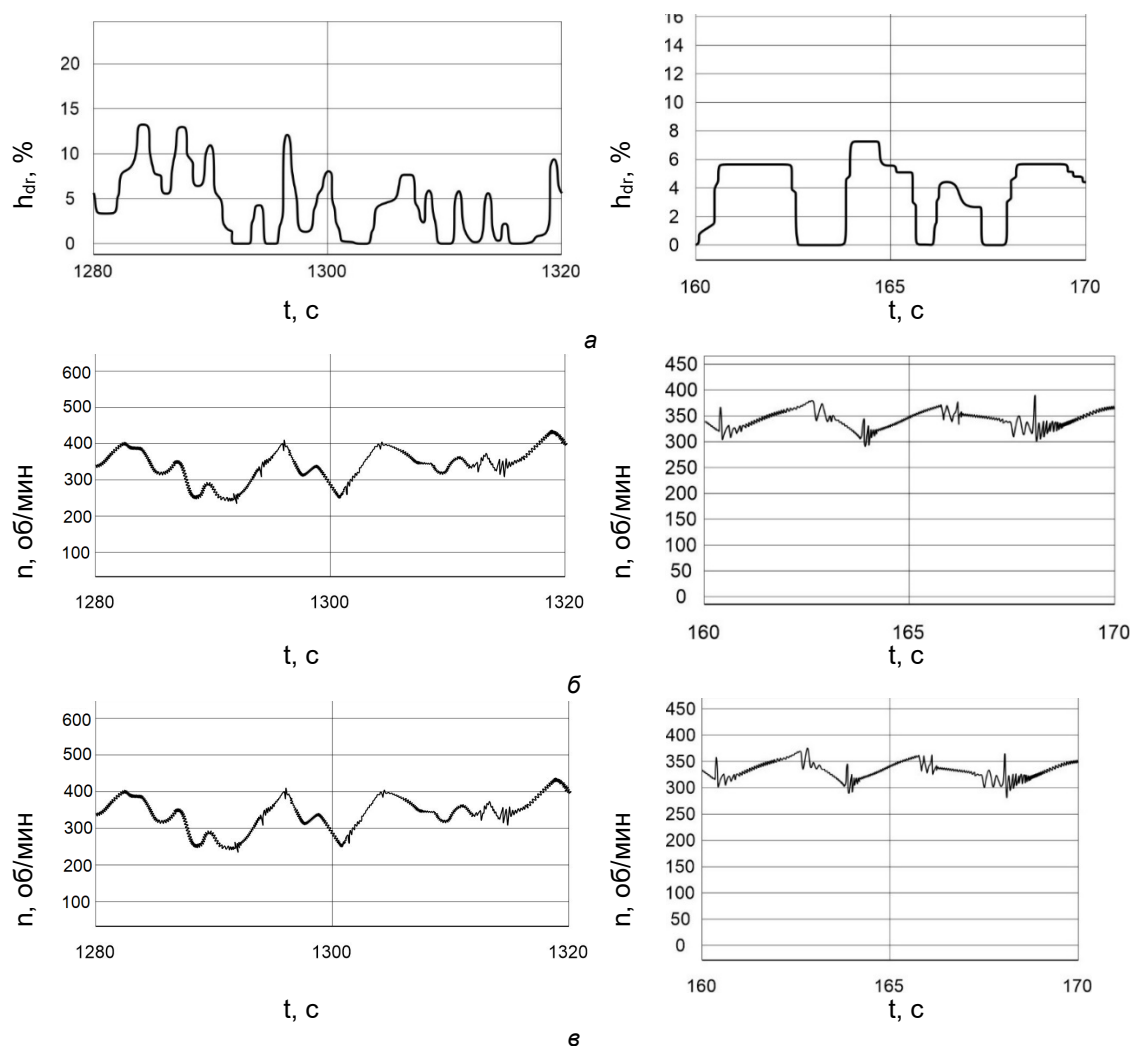


Рисунок 4 – Реализации частот вращения роторов тяговых электродвигателей при монотонном характере зависимости уставок крутящего момента (слева – фрагмент 1; справа – фрагмент 2):
 а – положение педали хода, %;
 б – частота вращения ротора левого электродвигателя, об/мин;
 в – частота вращения ротора правого электродвигателя, об/мин²
 Источник: составлено автором.

Figure 4 – Rotor speeds of traction motor with monotonous character of torque settings dependence (on the left – fragment 1; on the right – fragment 2):
 а – position of the travel pedal, %;
 б – rotor speed of the left electric motor, r/min;
 в – rotor speed of the right electric motor, rpm²
 Source: compiled by the authors.

² Электробус КАМАЗ-6282 [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. https://kamaz.ru/production/buses/pdf_062023/Электробус%20КАМАЗ-6282.pdf (дата обращения: 04.03.2024).

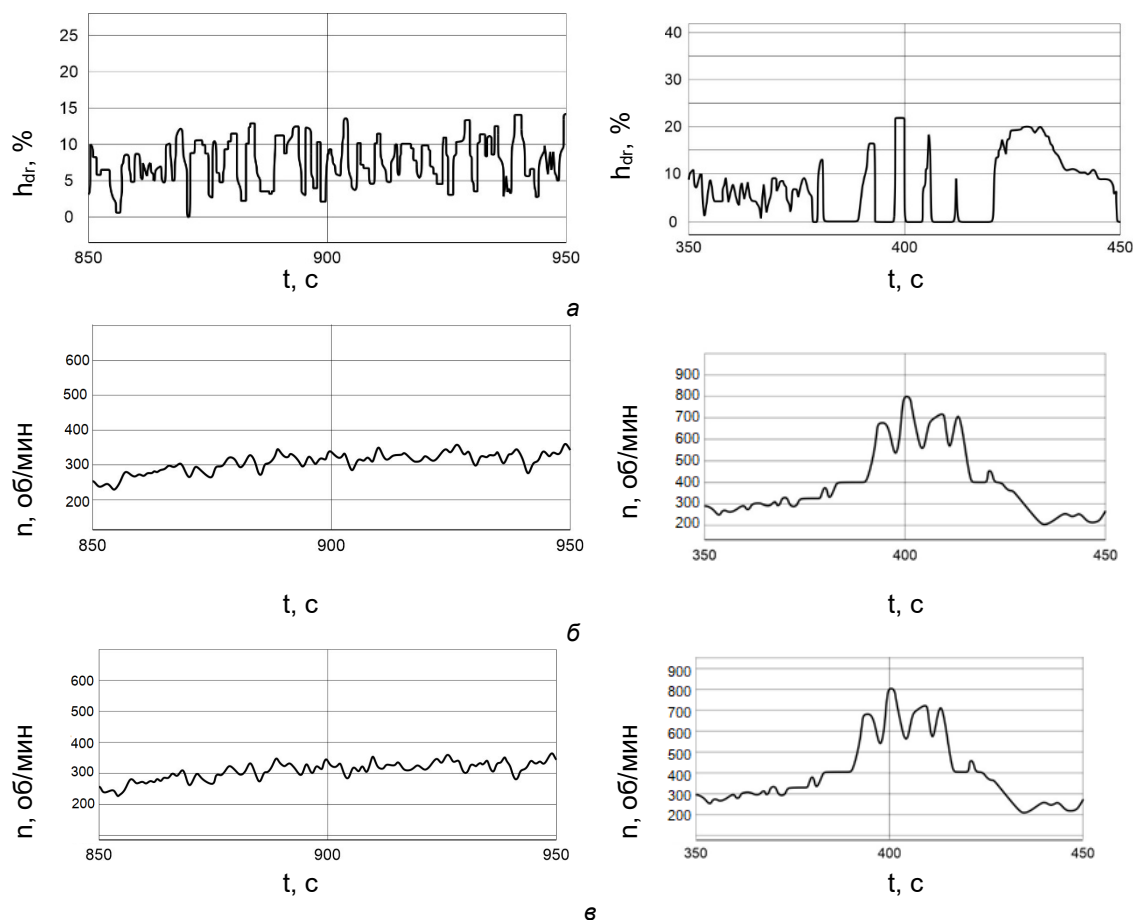


Рисунок 5 – Реализации положения педали хода и частот вращения роторов тяговых электродвигателей при S-образном характере зависимости уставок крутящего момента (слева – фрагмент 1; справа – фрагмент 2):

а – положение педали хода, %;
б – частота вращения ротора левого электродвигателя, об/мин;
в – частота вращения ротора правого электродвигателя, об/мин

Источник: составлено автором.

Figure 5 – Travel pedal position and rotor speeds of traction motors with S-shaped character of torque settings dependence (on the left – fragment 1; on the right – fragment 2):

а – position of the travel pedal, %;
b – rotor speed of the left electric motor, r/min;
с – rotor speed of the right electric motor, r/min.

Source: compiled by the authors.

Таблица

Влияние уставки рекуперативного момента в диапазоне положения педали $h_{dru} - h_{drd}$
 Источник: составлено автором.

Table

Effect of regenerative torque setpoint in the pedal position range $h_{dru} - h_{drd}$
 Source: compiled by the authors.

Рекуперативный крутящий момент в диапазоне $h_{dru} - h_{drd}$, Нм	25	40	60	80
Удельный расход энергии на движение, кВт·ч/км	0,80	0,80	0,83	0,82
	0,55	0,57	0,56	0,57
	0,74	0,75	0,78	0,79

При этом фиксировались значения угловых скоростей вала электродвигателя и положение педали хода. Для монотонного характера зависимости реализации процесса изменения положения педали хода и значений частоты вращения вала ротора приведены на рисунке 4.

На рисунке 4 отчетливо видны всплески на графиках угловых скоростей вращения роторов тяговых электродвигателей, свидетельствующие об ударной переключке зубьев в механической передаче. Данные всплески реализаций могут в дальнейшем провоцировать автоколебания в механической трансмиссии, которым могут способствовать процессы в зоне контакта шины с дорогой [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34], а также в электрической машине^{3,4} подавляемые в последствии с помощью управления электромеханическим приводом⁵.

S-образный характер зависимости уставки крутящего момента тягового электродвигателя положительным образом сказывается на режимах работы механического привода, позволяя избежать ударной переключки (переключа-

док зубьев). Реализации значений положения педали и частоты вращения вала двигателя приведены на рисунке 5.

Исследование величины рекуперативного момента на энергоэффективность

Наличие режима замедления при отпуске педали хода (зоны I и II – см. рисунки 2, 3) позволяет не только снизить динамическую нагруженность механических передач при переходных режимах движения, но и повысить энергоэффективность. Влияние на энергоэффективность проанализировано в процессе испытательных заездов исследуемого транспортного средства⁶ при осуществлении движения по циклу⁷, соответствующему городскому движению⁸. Влияние величины рекуперативного момента при движении по инерции приведены в таблице.

При уменьшении рекуперативного крутящего момента удельный расход энергии на движение снижается ввиду увеличения общего пути пройденного транспортным средством.

Однако величина уставки максимального рекуперативного момента при электроди-

³ Электрические машины: учебник для вузов. В двух томах. Том 2 / А.В. Иванов-Смольский. 3-е изд., стереот. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 532 с.: ил.

⁴ Электрические машины: учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. Изд. 3-е, перераб. Л.: Энергия, 1978. 832 с., ил.

⁵ Патент РФ № 2797069 С1, МПК В60К 17/12, В60L 15/20, В60L 3/10. Способ управления индивидуальным тяговым электроприводом ведущих колёс многоколёсного транспортного средства: № 2023103483: заявл. 16.02.2023; опубл. 31.05.2023 / А.В. Климов, Б.К. Оспанбеков, М. М. Жилейкин [и др.]; заявитель Публичное акционерное общество «КАМАЗ». EDN QAUBVR.

⁶ Электробус КАМАЗ-6282 [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. https://kamaz.ru/production/buses/pdf_062023/Электробус%20КАМАЗ-6282.pdf (дата обращения: 04.03.2024).

⁷ ГОСТ Р 54810–2011 Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. Введ. 2012.09.01. М.: СТАНДАРТИНФОРМ. 2012. 23 с.

⁸ Электрические машины: учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. Изд. 3-е, перераб. Л.: Энергия, 1978. 832 с., ил.

намическом торможении и при движении по инерции должна иметь возможность настройки водителем или изменяться адаптивно в зависимости от условий движения. Высокое значение момента способствует излишней динамике замедления и уменьшает путь выбега, что мало энергоэффективно. Низкий рекуперативный момент не обеспечивает требуемого замедления при движении накатом.

ВЫВОДЫ

При введении в управление электромеханической силовой передачей S-образного закона управление устраняет колебательные явления в механических передачах при изменении режима движения с тягового на тормозной или движения по инерции, что выражается в отсутствии всплесков угловых скоростей вращения деталей. При этом снижается их динамическая нагруженность при изменении направления нагрузки в зубчатых зацеплениях – переключении зубьев, за счёт достижения изменения режима при нулевых производных изменениях крутящего момента электродвигателя.

Величина рекуперативного момента, развиваемого электродвигателем при отпуске педали хода, влияет на энергоэффективность движения. Высокие значения рекуперативного момента увеличивают удельные затраты энергии за счёт уменьшения тормозного пути на выбеге, что заставляет водителя воздействовать на педаль хода переводя силовую передачу в тяговый режим.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бутарович Д.О., Скотников Г.И., Эраносян А.В. Алгоритм управления рекуперативным торможением с помощью педали акселератора // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. № 4. С. 275–281. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-04-275-281.
2. Wen, He & Chen, Wang & Hui, Jia. A single-pedal regenerative braking control strategy of accelerator pedal for electric vehicles based on adaptive fuzzy control algorithm. *Energy Procedia*. 2018. 152. pp. 624–629. doi: 10.1016/j.egypro.2018.09.221
3. Yongqiang, Zhao & Xin, Zhang & Jiashi, Li & Haitao, Huo & Teng, Ma & Chunyu, Zhou. A research on evaluation and development of single-pedal function for electric vehicle based on PID. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1605.
4. Hongwen He; Chen Wang; Hui Jia and Xing Cui An intelligent braking system composed single-pedal and multi-objective optimization neural network braking control strategies for electric vehicle, *Applied Energy*. 2020. 259, (C) doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114172.
5. Zhang J, Lv C, Gou J, et al. Cooperative control of regenerative braking and hydraulic braking of an electrified passenger car. *Proc Inst Mech Eng, Part D: J Automob Eng* 2012; 226(10). pp. 1289–302.
6. Guo J, Wang J, Cao B. Regenerative braking strategy for electric vehicles[C] // *Intelligent Vehicles Symposium*. IEEE. 2009. pp. 864–868.
7. Xu Guoqing, Li Weimin, Xu Kun, et al. An intelligent regenerative braking strategy for electric vehicles[J]. *Energies*. 2011. 4(9). pp. 1461–1477.
8. Zhang J, Lv C, Qiu M, et al. Braking energy regeneration control of a fuel cell hybrid electric bus[J]. *Energy Conversion & Management*. 2013. 76(76). 1117–1124.
9. Wang J.W, Tsai S.H, Li H.X, et al. Spatially Piecewise Fuzzy Control Design for Sampled-Data Exponential Stabilization of Semi-linear Parabolic PDE Systems [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2018.
10. Zhang Kangkang, Xu Liangfei et al. A Comparative Study on Regenerative Braking System and Its Strategies for Rear-wheel Drive Battery Electric Vehicles [J]. *Automotive Engineering*. 2015,(02). pp. 125–131.
11. Lv C., Zhang J., Li Y., et al. Mechanism analysis and evaluation methodology of regenerative braking contribution to energy efficiency improvement of electrified vehicles [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015. 92. pp. 469–482.
12. Kulas R.A., Rieland H., and Pechauer J., "A System Safety Perspective into Chevy Bolt's One Pedal Driving," *SAE Technical Paper 2019-01-0133*, 2019. DOI: 10.4271/2019-01-0133.
13. Wang J., Besselink I.J. M., van Boekel, J.J. P., & Nijmeijer, H. Evaluating the energy efficiency of a one pedal driving algorithm. 1-10. Paper presented at 2015 European Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Congress (EEVC 2015), Brussels, Belgium. 2015.
14. Вильке В.Г., Шаповалов И.Л. Автоколебания в процессе торможения автомобиля // *Вестник МГУ. Сер. 1. Математика, механика*. 2015. № 4. С. 33–39.
15. Кручинин П.А., Магомедов М.Х., Новожилов И.В. Математическая модель автомобильного колеса на антиблокировочных режимах движения. *Известия РАН, серия МТТ*. 2001. № 6. С. 63–69.
16. Awrejcewicz J., Dzyubak L., Gheorghi C. Estimation of chaotic and regular (stick-slip and ship-slip) oscillations exhibited by coupled oscillations with dry friction // *Nonlinear Dynamics*. 2005. V. 42. No.2. P. 383–394.
17. Pascal M. Dynamics and stability of a two degrees of freedom oscillator with an elastic stop // *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*. 2006. V.1. No 1. P. 94–102.
18. Shin K., Brennan M.J., Oh J.-E., Harris C.J. Analysis of disk brake noise using a two-degrees-of-freedom model. *Journal of Sound and Vibration*. 2002. V. 254. No 5. P. 837–848.

19. Вильке В.Г., Шаповалов И.Л. Автоколебания в процессе торможения автомобиля // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика. 2015. № 4. С 33–39.
20. Ергин А.А., Коломейцева М.Б., Котиев Г.О. Антиблокировочная система управления тормозным приводом колеса автомобиля. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2004. № 9. С. 11–13.
21. Soliman A., Kaldas M. An investigation of anti-lock braking system for automobiles. SAE Tech. Paper. 2012. no. 2012-01-0209. DOI: <https://doi.org/10.4271/2012-01-0209>
22. Sun C., Pei X. Development of ABS ECU with hard ware-in-the-loop simulation based on labcar system. SAE Int. J. Passeng. Cars – Electron. Electr. Syst. 2015. vol. 8, no. 1. pp. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.4271/2014-01-2524>.
23. Sabbioni E., Cheli F., d'Alessandro V. Analysis of ABS/ESP control logics using a HIL test bench. SAE Tech. Paper. 2011. no. 2011-01-0032. DOI: <https://doi.org/10.4271/2011-01-0032>
24. Жилейкин М.М. Исследование автоколебательных процессов в зоне взаимодействия эластичной шины с твердым опорным основанием // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2021. № 10. С. 3–15. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-10-3-15.
25. Жилейкин М.М., Сиротин П.В., Носиков С.С., Пуляев Н.Н. Метод выявления потери устойчивости движения тракторов при реализации тягового усилия на прицеп или сцепной агрегат // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 1. С. 39–48. DOI: 10.17816/0321-4443-321266. EDN ZCQJYM.
26. Грабар И.Г., Опанасюк Е.Г., Бегерский Д.Б., Опанасюк О.Е. Определение условий начала автоколебательных процессов в контакте модели пневматической шины с сыпучим грунтом // Вісник СевНТУ. 2011. № 121. С. 139–142. EDN UMXAMR.
27. Клепиков В.Б. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография. Х.: Изд-во «Підручник НТУ «ХПІ»», 2014. 408 с. На рус. яз. ISBN 978-617-687-029-6.
28. Klimov A.V., Ospanbekov B.K., Keller A.V., Shadrin S.S., Makarova D.A., Furletov Y.M. Research into the Peculiarities of the Individual Traction Drive Nonlinear System Oscillatory Processes. World Electr. Veh. J. 2023. 14, 316. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj14110316>
29. Klimov A.V., Ospanbekov B.K., Antonyan A.V. [et al.] Detecting Wheel Slip to Suppress Self-Excited Oscillations in Braking Mode // World Electric Vehicle Journal. 2024. Vol. 15, No. 8. P. 340. DOI: 10.3390/wevj15080340. EDN FHAZAU.
30. Климов А.В. Колебательные процессы в нелинейной системе индивидуального тягового электрического привода // Грузовик. 2023. № 7. С. 19–24. DOI 10.36652/1684-1298-2023-7-19-24. EDN RXPWMI.
31. Климов А.В., Антонян А.В. Исследование особенностей протекания колебательных процессов в нелинейной системе индивидуального тягового привода электробуса // Известия МГТУ МАМИ. 2023. Т. 17, № 1. С. 87–96. DOI: 10.17816/2074-0530-115233. EDN DVWXHE.
32. Климов А.В. Противобуксовочная система с функцией подавления автоколебаний колёс в тяговом режиме работы // Труды МАМИ. 2023. № 3(294). С. 44–56. DOI: 10.51187/0135-3152-2023-3-44-56. EDN XJXUWX.
33. Климов А.В. Наблюдатель буксования ведущих колёс с функцией подавления автоколебаний в тяговом режиме // Транспортные системы. 2023. № 2(28). С. 17–29. DOI 10.46960/2782-5477_2023_2_17. EDN HRSZDR.
34. Климов А.В. Подавление автоколебаний ведущих колёс в тормозном режиме // Грузовик. 2023. № 9. С. 6–14. DOI: 10.36652/1684-1298-2023-9-6-14. EDN PUCDXP.

REFERENCES

1. Butarovich D.O., Skotnikov G.I., Erano-syan A.V. Regenerative braking control algorithm using the accelerator pedal. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022; 4: 275–281. (in Russ.) DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-04-275-281
2. Wen He & Chen Wang & Hui Jia. A single-pedal regenerative braking control strategy of accelerator pedal for electric vehicles based on adaptive fuzzy control algorithm. *Energy Procedia*. 2018; 152: 624–629. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.09.221
3. Yongqiang, Zhao & Xin, Zhang & Jiashi, Li & Haitao, Huo & Teng, Ma & Chunyu, Zhou. A research on evaluation and development of single-pedal function for electric vehicle based on PID. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020.1605.
4. Hongwen He; Chen Wang; Hui Jia and Xing Cui An intelligent braking system composed single-pedal and multi-objective optimization neural network braking control strategies for electric vehicle, *Applied Energy*. 2020. 259, (C) DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114172.
5. Zhang J., Lv C., Gou J., et al. Cooperative control of regenerative braking and hydraulic braking of an electrified passenger car. *Proc Inst Mech Eng, Part D: J Automob Eng*. 2012; 226(10): 1289–302.
6. Guo J., Wang J., Cao B. Regenerative braking strategy for electric vehicles[C]. *Intelligent Vehicles Symposium*. IEEE, 2009: 864–868.
7. Xu Guoqing, Li Weimin, Xu Kun, et al. An intelligent regenerative braking strategy for electric vehicles[J]. *Energies*. 2011; 4(9): 1461–1477.
8. Zhang J., Lv C., Qiu M., et al. Braking energy regeneration control of a fuel cell hybrid electric bus[J]. *Energy Conversion & Management*. 2013; 76(76): 1117–1124.
9. Wang J.W, Tsai S.H, Li H.X., et al. Spatially Piecewise Fuzzy Control Design for Sampled-Data Exponential Stabilization of Semi-linear Parabolic PDE Systems [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018.

10. Zhang Kangkang, Xu Liangfei et al. A Comparative Study on Regenerative Braking System and Its Strategies for Rear-wheel Drive Battery Electric Vehicles [J]. *Automotive Engineering*. 2015; (02): 125–131.
11. Lv C., Zhang J., Li Y., et al. Mechanism analysis and evaluation methodology of regenerative braking contribution to energy efficiency improvement of electrified vehicles [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015; 92: 469–482.
12. Kulas R.A., Rieland H., and Pechauer J., "A System Safety Perspective into Chevy Bolt's One Pedal Driving," SAE Technical Paper 2019-01-0133, 2019. DOI: 10.4271/2019-01-0133.
13. Wang J., Besselink I.J. M., van Boekel J. J. P., & Nijmeijer H. Evaluating the energy efficiency of a one pedal driving algorithm. 1-10. Paper presented at 2015 European Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Congress (EEVC 2015), Brussels, Belgium. 2015.
14. Wilke V.G., Shapovalov I.L. Self-oscillations in the process of braking a car. *Bulletin of Moscow State University. Ser. 1. Mathematics, mechanics*. 2015; 4: 33–39.
15. Kruchinin P.A., Magomedov M.H., Novozhilov I.V. Mathematical model of an automobile wheel in anti-lock driving modes. *Mechanics of Solids*. 2001; 6: 63–69. (in Russ.)
16. Awrejcewicz J., Dzyubak L., Grehori C. Estimation of chaotic and regular (stick-slip and ship-slip) oscillations exhibited by coupled oscillations with dry friction. *Nonlinear Dynamics*. 2005; V. 42. No.2: 383–394.
17. Pascal M. Dynamics and stability of a two degrees of freedom oscillator with an elastic stop. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*. 2006; V.1. No.1. P. 94–102.
18. Shin K., Brennan M.J., Oh J.-E., Harris C.J. Analysis of disk brake noise using a two-degrees-of-freedom model. *Journal of Sound and Vibration*. 2002; V. 254. No.5: 837–848.
19. Vil'ke V.G., Shapovalov I.L. Self-oscillations during car braking. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 1. Matematika. Mekhanika*. 2015; 4: 33–39. (in Russ.)
20. Ergin A.A., Kolomejtseva M.B., Kotiev G.O. Antiblocking control system of the brake drive of automobile wheel. *Pribory i Sistemy Upravljeniya*. 2004; (9): 11–13.
21. Soliman A., Kaldas M. An investigation of anti-lock braking system for automobiles. *SAE Tech. Paper*. 2012; 2012-01-0209. DOI: <https://doi.org/10.4271/2012-01-0209>
22. Sun C., Pei X. Development of ABS ECU with hard ware-in-the-loop simulation based on labcar system. *SAE Int. J. Passeng. Cars – Electron. Electr. Syst.* 2015; vol. 8, no. 1: 14–21. DOI: <https://doi.org/10.4271/2014-01-2524>.
23. Sabbioni E., Cheli F., d'Alessandro V. Analysis of ABS/ESP control logics using a HIL test bench. *SAE Tech. Paper*. 2011; 2011-01-0032. DOI: <https://doi.org/10.4271/2011-01-0032>
24. Zhileykin M.M. Research of Self-Oscillating Processes in the Zone of Interaction of an Elastic Tire with a Solid Support Base. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2021; 10: 3–15, DOI: 10.18698/0536-1044-2021-10-3-15. (in Russ.)
25. Zhileykin M.M., Sirotin P.V., Nosikov S.S., Pulyaev N.N. Method for detecting the loss of stability of the movement of tractors when towing a trailer or a coupled unit. *Tractors and agricultural machinery*. 2023; Vol. 90, No. 1: 39–48. (in Russ) DOI: 10.17816/0321-4443-321266. EDN ZCQJYM.
26. Grabar I.G., Opanasyuk E.G., Begersky D.B., Opanasyuk O.E. Features of kinematics and dynamics of the multiwheel mover with dry soil interaction. *Visnik SevNTU*. 2011; 121: 139–142. (in Russ.) EDN UMXAMR.
27. Klepikov V.B. *Dynamics of electromechanical systems with nonlinear friction: monograph*. Publishing house: "The assistant of NTU "KHPI", 2014; 408. (In Russ.)
28. Klimov A.V., Ospanbekov B.K., Keller A.V., Shadrin S.S., Makarova D.A., Furletov Y.M. Research into the Peculiarities of the Individual Traction Drive Nonlinear System Oscillatory Processes. *World Electr. Veh. J.* 2023. 14, 316. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj14110316>
29. Klimov A.V., Ospanbekov B.K., Antonyan A.V. [et al.] Detecting Wheel Slip to Suppress Self-Excited Oscillations in Braking Mode. *World Electric Vehicle Journal*. 2024. Vol. 15, No. 8. P. 340. DOI: 10.3390/wevj15080340. EDN FHAZAU.
30. Klimov A.V. Oscillatory processes in a nonlinear system of an individual traction electric drive. *Truck*. 2023; 7: 19–24. DOI 10.36652/1684-1298-2023-7-19-24. EDN RXPWMI. (in Russ.)
31. Klimov A.V., Antonyan A.V. Research of features of oscillating process' behavior in the nonlinear system of individual traction drive of an electrobus. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2023; Vol. 17. No. 1: 87–96. DOI: 10.17816/2074-0530-115233
32. Klimov A.V. Traction control system with function of suppression of wheels self-oscillation in traction mode. *Trudy NAMI*. 2023; (3): 44–56. (In Russ.) <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2023-3-44-56>
33. Klimov A.V. The observer of the slipping of the driving wheels with the function of suppressing self-oscillations in traction mode. *Transport systems*. 2023; 2(28): 17–29. (in Russ.) DOI: 10.46960/2782-5477_2023_2_17. EDN HRSZDR.
34. Klimov A.V. Suppression of self-oscillations of the drive wheels in braking mode. *Truck*. 2023; 9: 6–14. DOI: 10.36652/1684-1298-2023-9-6-14. EDN PUCDXP. (in Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Климов Александр Владимирович – канд. техн. наук, руководитель службы электрифицированных автомобилей ООО «Инновационный центр КАМАЗ» (121205, г. Москва, Инновационный центр Сколково, Большой бульвар, 62, оф. С-203); доц. Перспективной инженерной школы электротранспорта Московского политехнического университета (107023, г. Москва, ул. Большая Семёновская, 38).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5351-3622>,

SPIN-код: 7637-3104,

e-mail: klimmanen@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Klimov Alexander V. – Cand. of Sci. (Eng.), Head of the Electric Vehicles Service, KAMAZ Innovation Center (121205, Moscow, Skolkovo Innovation Center, 62 Bolshoi Boulevard St., office C-203); Associate Professor at the Prospective Engineering School of Electric Transport, Moscow Polytechnic University (107023, Moscow, 38 Bolshaya Semyonovskaya St.).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5351-3622>,

SPIN-code: 7637-3104,

e-mail: klimmanen@mail.ru

Научная статья
УДК 629.113
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-102-111>
EDN: ZUYGRP



ПРЕЖДЕВРЕМЕННЫЕ ОТКАЗЫ ДВИГАТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ КАМАЗ С АККУМУЛЯТОРНОЙ ТОПЛИВОПОДАЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

С.Н. Кривцов ✉, А.К. Бычков

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

✉ ответственный автор
Krivcov_sergei@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Для завода-изготовителя и предприятий-потребителей продукции представляют интерес данные о реальной эксплуатационной надежности силовых агрегатов автомобилей КамАЗ, их наиболее слабых местах, причинах преждевременных отказов, а также методов выявления и предотвращения их возникновения, в связи с чем выполнение научного исследования, направленного на решение указанной выше задачи, является актуальным и своевременным.

Материалы и методы. Исследование надежности систем, узлов и агрегатов двигателей автомобилей КамАЗ проводилось в условиях официального дилерского центра «Техцентр Северный» (г. Иркутск), специализирующегося на продаже, обслуживании и ремонте автомобилей марки КамАЗ в течение 2020–2024 гг. В исследовании участвовали автомобили марки КамАЗ с двигателем 740, в том числе находящиеся на гарантии. Автомобили с этими силовыми агрегатами эксплуатировались преимущественно в Иркутской области, в том числе в северных регионах. При этом в каждом наряде-заказе фиксировалась причина обращения в сервис, пробег автомобиля, а также выполненные виды работ. Важным этапом являлось выявление закона распределения наиболее частых отказов систем и узлов двигателей.

Обсуждение и заключение. Анализ полученных в ходе исследования данных свидетельствует о преобладании двух групп преждевременных отказов-головок блока цилиндров, а также системы топливоподачи, прежде всего электрогидравлических форсунок. Установлено, что их преждевременные отказы подчиняются закону распределения Вейбулла и имеют математические ожидания наработки на отказ 49,6 тыс. км для форсунок и 41,9 тыс. км для головок блока цилиндров. При этом отказы головок блока цилиндров высокофорсированных двигателей семейства КамАЗ-740.7 (мощностью свыше 360 л.с.) вызваны повышенной тепловой напряженностью и их можно классифицировать как конструкционные и как эксплуатационные.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: надежность двигателя, дизельный двигатель, вероятность отказа, головки блока цилиндров, топливоподающая система, закон распределения, ресурс, автомобиль КамАЗ

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

Статья поступила в редакцию 31.10.2024; одобрена после рецензирования 24.11.2024; принята к публикации 24.02.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Кривцов С.Н., Бычков А.К. Преждевременные отказы двигателей автомобилей КамАЗ с аккумуляторной топливоподающей системой в условиях реальной эксплуатации // Вестник СиБАДИ. 2025. Т. 22, № 1. С. 102–111. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-102-111>

© Кривцов С.Н., Бычков А.К., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-102-111>

EDN: ZUYGRP

PREMATURE ENGINE FAILURES OF KAMAZ VEHICLES WITH COMMON RAIL FUEL SUPPLY SYSTEM IN REAL OPERATION

Sergey N. Krivtsov ✉, Alexey K. Bychkov

Irkutsk state national research technical university,
Irkutsk, Russia

✉ corresponding author
Krivcov_sersei@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. For the manufacturer and consumer enterprises of the products, it is of interest to know the real operational reliability of power units of KamAZ vehicles, their weakest points, the causes of premature failures, as well as methods for identifying and preventing their occurrence, and therefore carry out scientific research aimed at solving the above task is relevant and timely.

Methods. the study of the reliability of systems, components and assemblies of engines of KamAZ vehicles was carried out in the conditions of the official dealership center "Technical center Severny" (Irkutsk), specializing in the sale, maintenance and repair of KamAZ vehicles during 2020–2024. the study involved KamAZ vehicles with 740 engine, including those under warranty. The automobiles with these power units were operated primarily in the Irkutsk region, including server regions. at the same time, each work order recorded the reason for contacting the service, the mileage of the car, as well as the types of work performed. An important step was to identify the distribution law of the most frequent failures of engine systems and components.

Discussion and conclusion. The analysis of the data obtained during the study indicates the predominance of two types of premature failures – cylinder heads, as well as fuel supply systems, primarily electrohydraulic injectors. It was found that premature failures of cylinder head and electrohydraulic injectors obey the Weibull distribution law and have mathematical expectations of a failure time of 49.6 thousand km for injectors and 41.9 thousand km for cylinder heads. At the same time, the failures of the cylinder head of the highly accelerated engines of the KamAZ-740.7 family (with a capacity of over 360 hp) are caused by increased thermal stress and can be classified as structural and operational.

KEYWORDS: Reliability of engines, diesel engine, probability of failures, cylinder heads, fuel supply system, law of distribution, lifetime, automobile KamAZ

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors express their gratitude to the editorial board of the Russian Automobile and Highway Industry Journal and the reviewers of the article.

The article was submitted: 31.10.2024; **approved after reviewing:** 24.11.2024; **accepted for publication:** 24.02.2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Krivtsov S.N., Bychkov Al. K. Investigation of traction and dynamic properties of wheeled vehicles with electric and hybrid power plants on the test stands with running drums. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (1): 102-111. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-102-111>

© Krivtsov S.N., Bychkov Al. K., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Автомобили КамАЗ используются во многих сферах народного хозяйства страны, особенно на предприятиях с государственным участием (муниципальные, ведомственные и т.д.). Они являются достойной альтернативой зарубежной технике, поскольку способны выполнять жесткие требования по токсичности отработавших газов и при этом имеют привлекательную для потребителей стоимость. Это достигается применением современных топливоподающих систем с электронным управлением – систем с общим аккумулятором давления (или Common Rail от англ. общая магистраль). Заводом-изготовителем выпускается широкая гамма двигателей одинаковой размерности и компоновки, но разной степени форсировки. Одним из таких распространенных семейств силовых установок являются двигатели КамАЗ 740.7 – восьмицилиндровые V-образные двигатели рабочим объемом 11,76 л с турбонаддувом мощностью от 280 до 440 л.с. (таблица 1).

В условиях Иркутской области чаще всего эксплуатируются двигатели мощностью 320 и 400 л.с. (см. таблицу 1). На эти двигатели установлена топливоподающая система Алтайского завода прецизионных изделий (АЗПИ). Для завода-изготовителя и предприятий-потребителей продукции, безусловно, представляют интерес данные о реальной эксплуатационной надежности силовых агрегатов автомобилей

КамАЗ, их наиболее слабых местах, причинах преждевременных отказов, а также методов выявления и предотвращения их возникновения, поэтому выполнение научного исследования, направленного на решение указанной выше задачи, является актуальным и своевременным.

Известно, что отказы, в том числе преждевременные, по происхождению делятся на конструкционные, технологические и эксплуатационные [1, 2], в связи с чем детальный анализ причин происхождения также крайне важен.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование надежности систем, узлов и агрегатов двигателей автомобилей КамАЗ проводилось в условиях официального дилерского центра «Техцентр Северный» (г. Иркутск), специализирующегося на продаже, обслуживании и ремонте автомобилей марки КамАЗ в течение 2020–2024 гг. В исследовании участвовали автомобили марки КамАЗ с двигателем 740, в том числе находящиеся на гарантии. Автомобили с этими силовыми агрегатами эксплуатировались преимущественно в Иркутской области, в том числе в северных регионах. При этом в каждом наряде-заказе фиксировалась причина обращения в сервис, пробег автомобиля, а также выполненные виды работ. Важным этапом являлось выявление закона распределения наиболее частых отказов систем и узлов двигателей.

Таблица 1
Технические характеристики двигателей КамАЗ
Источник: составлено авторами.

Table 1
Technical characteristics of engines KamAZ
Source: compiled by the author.

Модель Model	740.75– 440	740.74– 420	740.73– 400*	740.72– 360	740.71– 320*	740.70– 280
Расположение и число цилиндров Configuration and number of cylinders	V-8					
Диаметр цилиндра и ход поршня, мм Bore and stroke, mm	120x130					
Степень сжатия Compression ratio	16,8					
Рабочий объем, л Working value, l	11,76					
Номинальная частота вращения, мин ⁻¹ Nominal speed, min ⁻¹	1900					
Мощность, кВт (л.с.) Power, kWt (h p)	323,5 (440)	308,8 (420)	294,1 (400)	264,7 (360)	235,3 (320)	205,9 (280)
Максимальный крутящий момент, Нм Maximal torque, Nm	1177	1373	1570	1766	1864	2060

* полужирным шрифтом выделены наиболее распространенные в регионе силовые установки

Вид функции распределения определялся путем последовательного выполнения следующих этапов [3, 4, 5, 6]:

- выдвижение и принятие гипотезы о виде функции распределения;
- оценка значений параметров функции распределения предполагаемого типа;
- проверка непротиворечивости экспериментальных данных принятой гипотезе распределения.

В дальнейшем строилась дифференциальная функция распределения (плотности вероятности) и в интегральной форме – вероятность отказа.

При анализе данных нами была принята гипотеза о том, что отказы головок блока цилиндров и топливоподающей системы имеют закон распределения Вейбулла. Функция распределения Вейбулла имеет вид:

$$F = 1 - e^{-(l/a)^b}. \quad (1)$$

В свою очередь плотность распределения вероятности закона Вейбулла:

$$f(l|\lambda, b) = \frac{b}{a} \left(\frac{l}{a}\right)^{b-1} e^{-(l/a)^b}, \quad (2)$$

где l – пробег автомобиля;

a и b параметры закона распределения Вейбулла.

Среднюю наработку на отказ при распределении по закону Вейбулла можно определить на основании следующего выражения:

$$\bar{l} = a \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right), \quad (3)$$

где Γ – гамма-функция.

Обработку экспериментальных данных выполняли с помощью программного обеспечения MS Excel и MatLab от MathWorks.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Распределение отказов по системам, узлам и агрегатам двигателей КамАЗ 740.4 в условиях эксплуатации Восточной Сибири приведено на рисунке 1.

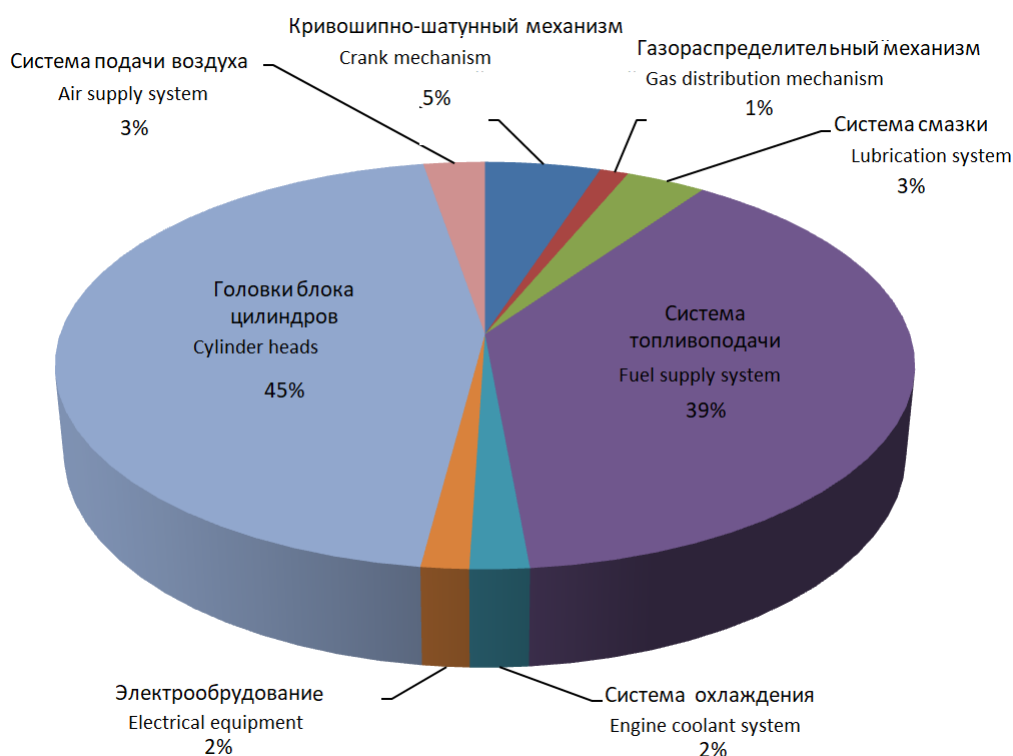


Рисунок 1 – Процентное соотношение отказов двигателей КамАЗ-740.7
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The percentage of failures of engines KamAZ-740.7
Source: compiled by the authors.

Анализ данных, представленных на рисунке 1, свидетельствует о преобладании двух групп отказов – головок блока цилиндров (ГБЦ), а также системы топливоподачи, прежде всего электрогидравлических форсунок (ЭГФ). И если отказы топливоподающей системы являются довольно часто упоминающимися в литературе, то дефекты головок блока цилиндров являются специфическим типом отказов именно для двигателей КамАЗ семейства 740.7. Сами по себе неисправности ГБЦ зачастую приводят к снижению уровня антифриза в системе охлаждения, но могут и никак себя не проявлять. Иногда течь антифриза обнаруживают только снятие форсунок в виде следов на корпусе инжекторов и в форсуночном колодце (рисунок 2, а). После опрессовки головок воздухом через трещины отчетливо видны пузырьки (рисунок 2, б).

В ходе исследований была подтверждена гипотеза о том, что закон распределения отказов ГБЦ подчиняется закону Вейбулла (рисунок 3, таблица 2). Установлено, что средний ресурс головок блока цилиндров составляет 41,9 тыс. км пробега.

Примечательно, что вероятность отказа в первую очередь зависит от мощности сило-

вой установки. Причем вероятность отказа ГБЦ двигателей мощностью 400 л.с. значительно выше, а ресурс меньше примерно на 80%. Данный тип отказов заключается в том, что головки трескаются, нарушается и герметичность прилегания к плоскости блока цилиндров, в результате чего чаще всего происходит попадание антифриза в смазочную систему. Данный дефект редко своевременно замечается водителями и предсказуемо приводит к сокращению ресурса других узлов и агрегатов двигателей, в частности, деталей кривошипно-шатунного механизма (прежде всего поршневого комплекта) и турбокомпрессора.

Учитывая то, что двигатели, имеющие разную мощность, по сути, имеют одинаковую поршневую группу, топливоподающую систему и ГБЦ, можно сделать вывод о том, что увеличение мощности достигается за счет корректировки карт топливоподачи. Это неизбежно приводит к увеличению тепловой напряженности головок блока и сокращению их ресурса. Доказательством является положительная динамика снижения потока отказов ГБЦ при дефорсировании двигателя. Однако это неизбежно приводит к снижению производительности автомобиля.



а



б

Рисунок 2 – Фотографии дефектных головок блока цилиндров двигателей КамАЗ-740.7
а – следы антифриза в форсуночном колодце; б – опрессовка головки блока цилиндров
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Photography of failed cylinder heads of engines KamAZ-740.7
a – The antifreeze traces in fuel injector holes; b – The pressure testing of cylinder heads
Source: compiled by the authors.

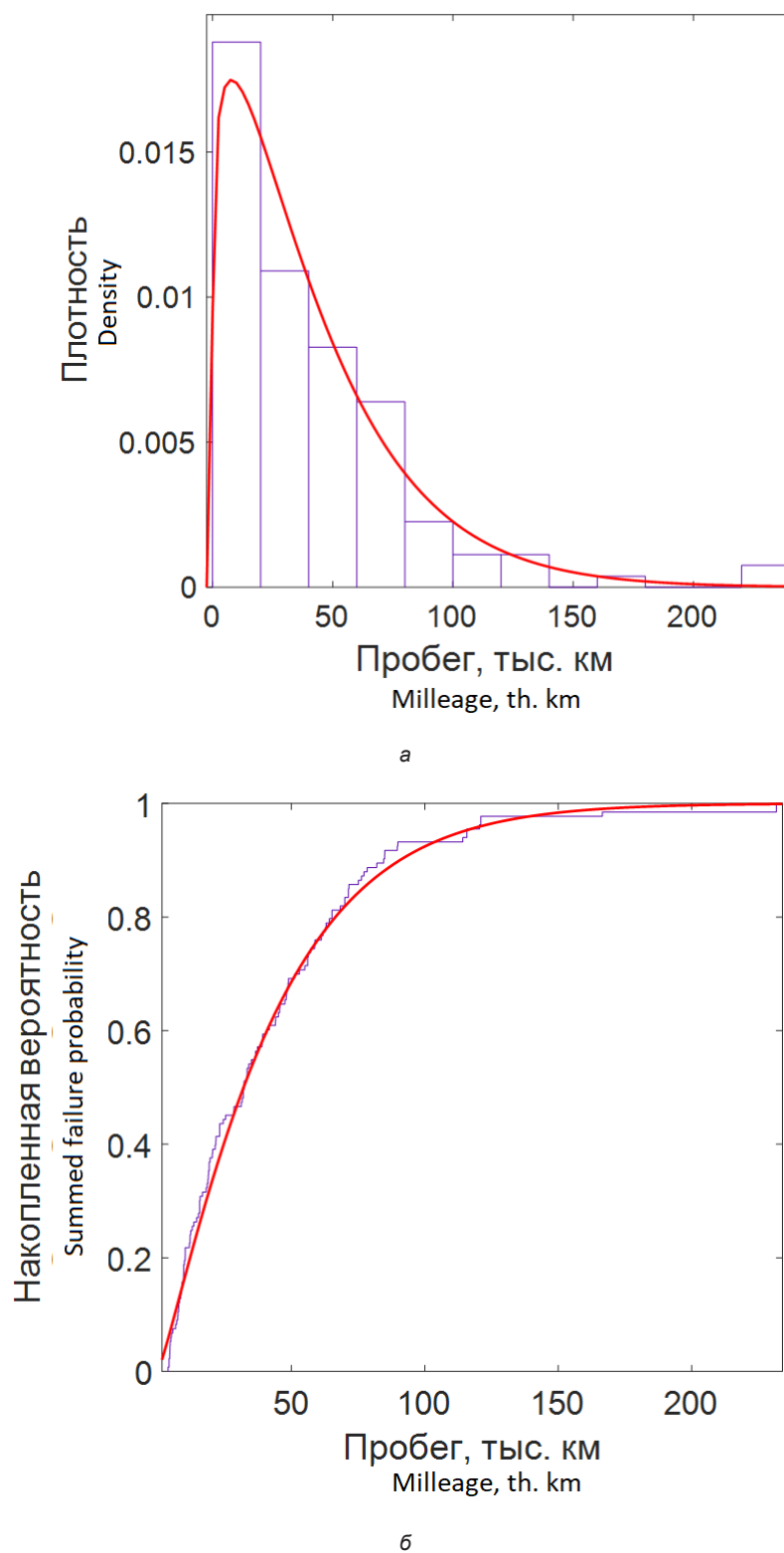
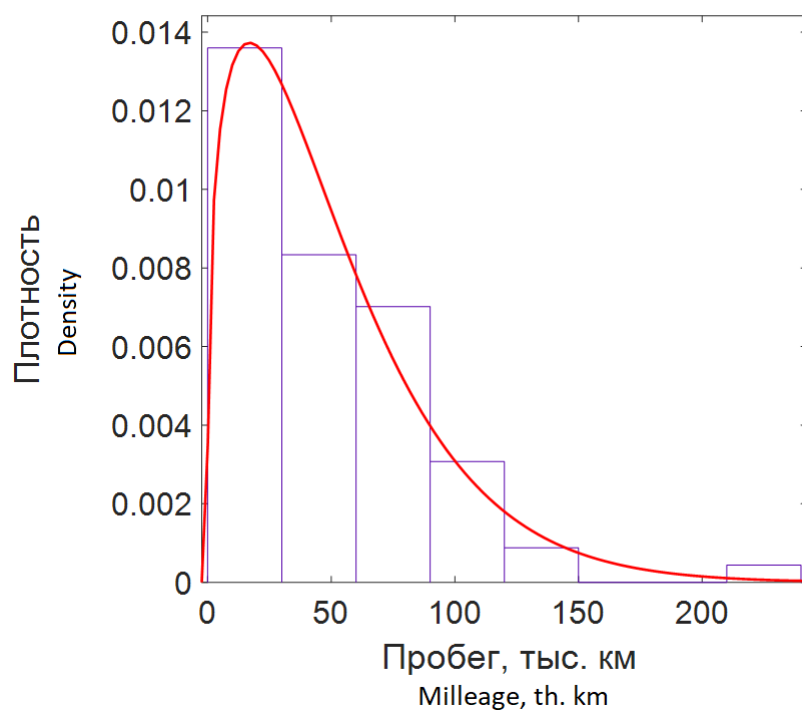
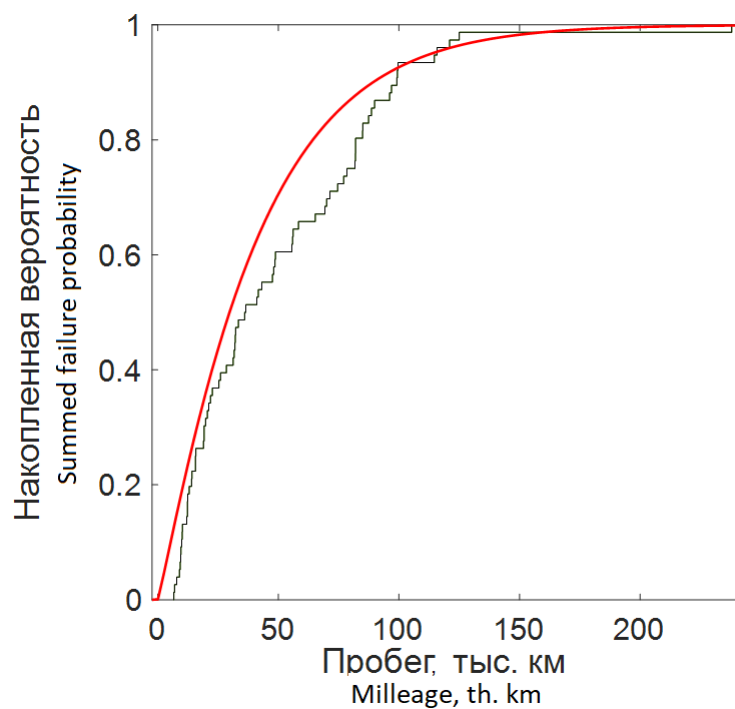


Рисунок 3 – Плотность вероятности и вероятность отказа головок блока цилиндров силовых установок автомобилей КамАЗ
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Density of probability and failure probability of cylinder heads of engines KamAZ
Source: compiled by the authors.



a



б

Рисунок 4 – Плотность вероятности и вероятность отказа электрогидравлических форсунок силовых установок автомобилей КамАЗ
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Density of probability and failure probability of Common Rail injectors of engines KamAZ
Source: compiled by the authors.

Таблица 2

Статистические характеристики закона распределения наиболее частых отказов двигателей автомобилей КамАЗ
Источник: составлено авторами.

Table 2

Statistical characteristics of the distribution law of most frequent failures of engines KamAZ
Source: compiled by the authors.

№	Элемент Element	Закон распределения The law of distribution	Параметры закона распределения Parameters of distribution law		
			a	b	$\bar{L}$, тыс. км
1	Головки блока цилиндров Cylinder heads	Вейбулла	44,06	1,16	41,9
2	Форсунки Injectors	Вейбулла	53,65	1,29	49,6

Все сказанное выше позволяет отнести отказы головок блока цилиндров как к конструкционным, так и эксплуатационным, поскольку они могут возникнуть вследствие, например, перегрева.

В свою очередь отказы форсунок практически не зависят от мощности силовой установки автомобилей КамАЗ. Гипотеза о том, что закон распределения отказов форсунок подчиняется закону Вейбулла (рисунок 4, таблица 2) была также подтверждена. Установлено, что средний ресурс головок форсунок КамАЗ производства АЗПИ составляет 49,6 тыс. км пробега.

Среди причин, вызывающих их преждевременный отказ, многие специалисты из числа инженерно-технических работников предприятий приоритет отдают качеству применяемого топлива, не уточняя, какие показатели качества имеются в виду. Это несколько противоречит данным, представленным в работах¹ [7], которые были получены методом экспертных оценок для двигателей КамАЗ предыдущих поколений. Но в то же время природно-климатические факторы, безусловно, способны влиять на качество топлива, поскольку происходит смена летнего топлива на зимнее либо арктическое. Такие топлива могут иметь пониженные смазывающие свойства, выражаемые диаметром пятна износа шарика по методу HFRR [8]. В подавляющем большинстве случаев неисправности связаны с наличием воды в топливе и абразивным износом седла клапана-мультипликатора и отверстий распылителя. К аналогичным выводам пришли авторы статей [9, 10, 11]. Износ указанных частей приводит к значительным

отклонениям подач и расхода на управления от нормативных точек тест-плана [11, 12]. Для форсунок АЗПИ выявлен также специфический вид дефекта их электромагнита. Дело в том, что при подозрении на неисправность инжекторы проверялись на специализированных стендах для проверки электрогидравлических форсунок систем Common Rail. При этом зачастую их показатели топливоподачи соответствовали допускам, указанным в тест-планах, но при этом возникали ошибки блока управления с ограничением мощности. Замена на полностью новые устраняла симптомы на определенный промежуток пробега. Дефекты электромагнитов форсунок АЗПИ выявлялись только на фирменном стенде Bosch DCI 200 (приблизительно до 25% случаев). При этом возникала специфическая ошибка «Ток ускорителя не достигнут», что явно свидетельствовало об отклонениях зависимости хода якоря электромагнита клапана от величины приложенного управляющего импульса как и в случае, например, деградации пьезоэлемента [13].

Анализ данных, приведенных в таблице 2, указывает на то, что интенсивность отказов как форсунок, так и ГБЦ монотонно возрастает, о чем свидетельствует величина параметра b. Средние наработки на отказ пробега составляют 49,6 тыс. км для форсунок и 41,9 тыс. км для ГБЦ.

В качестве наиболее вероятной причины преждевременного выхода из строя головок блока цилиндров выступает их повышенная тепловая напряженность на двигателях повышенной мощности. Это свидетельствует о

¹ Гусельников А.С. Методика обеспечения работоспособности топливной аппаратуры автомобильных дизельных двигателей в холодном климатическом регионе: автореф... дис. кан. наук. Тюмень, 2024. 17 с.

необходимости модернизации ГБЦ и их охлаждения со стороны завода-изготовителя и необходимости периодического контроля за их техническим состоянием с позиции эксплуатирующей стороны. Необходимо отметить также, что неисправности электрогидравлических форсунок также способствуют повышенной тепловой напряженности цилиндра и его головки, поскольку с течением времени, как правило, подача топлива при неизменной длительности управляющего импульса увеличивается.

ВЫВОДЫ

1. Преждевременными отказами двигателей семейства КамАЗ-740.7 являются отказы головок блока цилиндров, а также элементов топливоподающей системы, прежде всего электрогидравлических форсунок.

2. Установлено, что преждевременные отказы головок блока цилиндров и электрогидравлических форсунок подчиняются закону распределения Вейбулла и имеют математические ожидания наработки на отказ 49,6 тыс. км для форсунок и 41,9 тыс. км для головок блока цилиндров.

3. Отказы головок блока цилиндров высокофорсированных двигателей семейства КамАЗ-740.7 (мощностью свыше 360 л.с.) вызваны повышенной тепловой напряженностью и их можно классифицировать как конструкционные и как эксплуатационные.

4. Отказы топливоподающей системы относятся в значительной степени к эксплуатационным, и наиболее вероятной причиной является качество топлива, прежде всего его смазывающие свойства, а также загрязнение топлива водой и механическими абразивными примесями и их плохая фильтрация.

5. Преждевременные отказы влияют на надежность других элементов двигателей, поэтому контроль технического состояния наименее надежных элементов целесообразно приурочить к выполнению очередного номерного технического обслуживания автомобиля (например, ТО-2).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Карагодин В.И., Павлов А.П. Обеспечение надежности наземных транспортно-технологических средств методами резервирования // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2018. № 5. С. 36–40.
2. Pavlov A., Karagodin V. Ensuring reliability of transportation vehicles with redundancy methods // MATEC Web of Conferences. 2021. Т. 334. С. 02028.

3. Y. Huang et al., "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, doi: <https://doi.org/10.1016>.

4. 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/>

5. Wang D.F., Yang H.X. Reliability Design Analysis of Engine. *Intern. Combust. Engine Accessories* 2021, 333, pp. 37–38.

6. Кулаков А.Т., Якубович И.А. Эксплуатационная надежность КамАЗов // Автотранспортное предприятие. 2013. № 3. С. 45–48.

7. Гусельников А.С., Захаров Н.С. Исследование влияния условий эксплуатации на надежность элементов топливной аппаратуры автомобилей Урал-4320 // Транспорт Урала. 2023. № 4 (79). С. 83–89.

8. Кривцов С.Н., Кривцова Т.И. Изменение смазывающих свойств дизельного топлива при добавлении в него растительного масла // Вестник СибАДИ. 2021; 18(5): 534–543. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-534-543>

9. Малахов А.Ю., Юрин П.А., Лихачева Т.Е. [и др.]. Исследование причин выхода из строя топливных форсунок современных автомобилей // Вестник МАДИ. 2017. № 4 (51). С. 38–47.

10. Кривцов С.Н., Кузакова В.В. Надежность автомобильных электрогидравлических форсунок с пьезопроводом // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2019. № 10. С. 56–60.

11. Krivtsov S.N., Yakimov I.V., Ozornin S.P. Numerical analysis and experimental studies on solenoid common rail diesel injector with worn control valve // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment*. 2018. С. 042–057.

12. Stoeck T. Methodology of testing common rail fuel injectors with the use of Gauss's formulas. *Combustion Engines*. 2021, 184(1), 11–15. DOI: 10.19206/CE-133505

13. Krivtsov S.N., Krivtsova T.I. Variations in health of piezoelectric elements of the common rail electric hydraulic nozzles in the operating conditions // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. С. 012022.

REFERENCES

1. Karagodin V.I., Pavlov A.P. Reliability ensuring of ground transport-technological facilities by redundancy methods. *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya (Repair, Reconditioning, Modernization)*. 2018; 5: 36–40. (in Russ)
2. Pavlov A., Karagodin V. Ensuring reliability of transportation vehicles with redundancy methods // *MATEC Web of Conferences*. 2021. Т. 334. С. 02028.
3. Y. Huang et al., "Impact of potential engine malfunctions on fuel consumption and gaseous

emissions of a Euro VI diesel truck," *Energy Conversion and Management*. Mar. 2019; vol.184: 521–529, <https://doi.org/10.1016>.

4. 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/>

5. Wang D.F., Yang H.X. Reliability Design Analysis of Engine. *Intern. Combust. Engine Accessories* 2021, 333. 37–38.

6. Kulakov A.T., Yakubovich I.A. Operational reliability of KAMAZ. *Motor transport enterprise*. 2013; 3: 45–48. (in Russ)

7. Guselnikov A.S., Zakharov N.S. The research of the influence of the exploitation conditions on the safety of the parts of the fuel system parts of Ural-4320 vehicle. *Transport of the Urals*. 2023. No. 4 (79). pp. 83–89. (in Russ)

8. Krivtsov S.N., Krivtsova T.I. Changing the lubricity of diesel fuel with vegetable oil additive. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18(5): 534–543. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-534-543>

9. Malakhov A.Yu., Yurin P.A., Likhacheva T.E. [et al.] Research of the causes of failure of fuel injectors in modern automobile. *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2017. No. 4 (51). pp. 38–47. (in Russ)

10. Reliability of automotive electrohydraulic injectors with piezo drive / Krivtsov S.N., Kuzakova V.V. // *Transport: science, technology, management. Scientific information collection*. 2019. No. 10. pp. 56–60.

11. Krivtsov S.N., Yakimov I.V., Ozornin S.P. Numerical analysis and experimental studies on solenoid common rail diesel injector with worn control valve. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment. 2018: 042–057.

12. Stoeck T. Methodology of testing common rail fuel injectors with the use of Gauss's formulas. *Combustion Engines*. 2021; 184(1): 11–15. DOI: 10.19206/CE-133505

13. Krivtsov S.N., Krivtsova T.I. Variations in health of piezoelectric elements of the common rail electric hydraulic nozzles in the operating conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021: C. 012022.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Кривцов С.Н. Сбор статистических данных, обработка данных, получение зависимостей вероятности отказа двигателей КамАЗа, расчет

статистических характеристик закона распределения отказов. Проведение сравнительного анализа, формулировка выводов, интерпретация результатов исследования.

Бычков А.К. Анализ и обобщение данных литературы, сбор и систематизация данных, написание текста рукописи, редактирование текста рукописи, оформление рукописи, работа с графическим материалом.

CO-AUTHORS' CONTRIBUTION

Krivtsov S.N. Collection of statistical data, data processing, obtaining dependences of the probability of failure of engines KamAZ, calculation of statistical characteristics of the law of distribution of failures. Comparative analysis; formulation of conclusions; interpretation of research results;

Bychkov A.K. Analysis and generalization of literature data; collection and systematization of data; writing the text of the manuscript; editing the text of the manuscript; design of the manuscript; work with graphic material.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кривцов Сергей Николаевич – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83).

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

SPIN-код: 9278-4018,

e-mail: krivcov_sergei@mail.ru

Бычков Алексей Константинович – магистрант кафедры «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0520-1411>.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Krivtsov Sergey N. – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor; Professor of the Department of Automobile Transport, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov str., Irkutsk, 664074).

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

SPIN-код: 9278-4018,

e-mail: krivcov_sergei@mail.ru

Bychkov Alexey K. – magistant of the Department of Automobile Transport, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov str., Irkutsk, 664074).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0520-1411>.

Научная статья
УДК 629-039-58
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-112-122>
EDN: ADUVNH



РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОЛИЧЕСТВА ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ С УЧАСТИЕМ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ МОБИЛЬНОСТИ

А.А. Юнг

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия
yungnastena33@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. За последние семь лет спрос на пользования средств индивидуальной мобильности (СИМ) значительно вырос. Однако за популярностью данных средств стоит стремительный рост количества дорожно-транспортных происшествий (ДТП). С целью оценки изменения ситуации в области аварийности с участием средств индивидуальной мобильности в масштабах г. Москвы была разработана математическая модель прогнозирования влияния количества средств индивидуальной мобильности на показатели аварийности, а именно дорожно-транспортных происшествий.

Материалы и методы. В данной статье представлены результаты математического моделирования, основанного на влиянии количества СИМ на количество ДТП с их участием. Для достижения данных результатов были применены инструменты эконометрики, которая изучает количественные и качественные экономические взаимосвязи с помощью статистических и других математических методов и моделей, а также регрессионный анализ, позволяющий исследовать влияние одной независимой переменной на зависимую. Была произведена оценка статистической значимости уравнения регрессии в целом и отдельных параметров регрессии и корреляции.

Результаты. Создана математическая модель для прогнозирования количества ДТП с участием СИМ для г. Москвы в зависимости от количества передвигающихся данных средств мобильности на улично-дорожной сети.

Обсуждение и заключение. Использование данной модели позволит с помощью линейного уравнения парной регрессии выполнить прогнозирование количества дорожно-транспортных происшествий в зависимости от количества средств индивидуальной мобильности на улично-дорожной сети, что позволит с определенной вероятностью утверждать об увеличении ДТП с участием данных устройств.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: модель, мобильность, прогноз, уравнение, дорожное движение, средства индивидуальной мобильности

Статья поступила в редакцию 02.12.2024; одобрена после рецензирования 22.01.2025; принята к публикации 24.02.2026.

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: Юнг А.А. Разработка математической модели прогнозирования количества дорожно-транспортных происшествий с участием средств индивидуальной мобильности // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 1. С. 112-122. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-112-122>

© Юнг А.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-112-122>

EDN: ADUVHB

MATHEMATICAL MODEL DEVELOPMENT FOR PREDICTING THE NUMBER OF ROAD TRAFFIC ACCIDENTS INVOLVING PERSONAL MOBILITY DEVICES

A.A. Yung

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

yugnastena33@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. Over the past seven years, the demand for the use of personal mobility devices (PMDs) has grown significantly. However, behind the popularity of these transport means is a rapid increase in the number of road accidents. In order to assess the changes of the situation in the field of accidents involving application of individual mobility devices on the scale of Moscow, a mathematical model was developed to predict the impact of the number of individual vehicles on accidents, namely road accidents.

Materials and methods. This article presents the results of mathematical modeling based on the influence of the number of personal mobility devices (PMDs) on the number of accidents involving them. To achieve these results, the science of econometrics was applied, which studies quantitative and qualitative economic relationships using statistical and other mathematical methods and models, as well as regression analysis, which allows us to study the effects of one independent variable on the dependent one. The statistical significance of the regression equation as a whole and individual regression and correlation parameters was assessed.

Results. The mathematical model has been created to predict the number of accidents involving personal mobility devices (PMDs) for Moscow, depending on the number of this type of moving vehicles on the street and road network.

Discussion and conclusion. The use of the given model will let with the help of linear equation of paired regression predict the number of road accidents depending on the quantity of personal mobility devices (PMDs) on the street and road network, which will allow for a certain probability to assert the increase in accidents involving these types of transport devices.

KEYWORDS: model, mobility, forecast, equation, traffic, personal mobility devices

The article was submitted: 02.12.2024; approved after reviewing: 22.01.2025; accepted for publication: 24.02.2025.

The Author has read and approved the final manuscript.

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

For citation. Jung A.A. Mathematical model development for predicting the number of road traffic accidents involving personal mobility devices. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (1): 112-122. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-112-122>

© Jung A.A., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

В современном обществе вопросы мобильности населения и экономии времени актуальны во всех странах и на всех континентах и требуют скорейшего решения. Согласно статистике с каждым годом наблюдается увеличение количества автомобилей, мотоциклов, мопедов и других транспортных средств, данная закономерность оказывает значительную нагрузку на транспортную инфраструктуру в целом, тем самым способствуя образованию дорожных заторов и аварийных ситуаций. Возникновение заторов на транспортных развязках при въезде в город является распространенной ситуацией, особенно в часы пик [1]. Чтобы сократить потери времени, находясь в заторах на дороге, и в некоторой степени уменьшить количество ДТП, автолюбители начали осваивать новые средства передвижения, такие как сегвеи, моноколеса, гироскутеры и электросамокаты – так называемые средства индивидуальной мобильности. В связи с этим начали появляться специальные системы по предоставлению в аренду различных средств мобильности.

Одна из самых приоритетных задач каждого субъекта нашей страны – безопасность дорожного движения. Главной национальной целью в России на период до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г., согласно стратегии безопасности дорожного движения, является проведение мероприятий для устойчивого повышения безопасности дорожного движения и «стремление к нулевой смертности в ДТП к 2030 г.», что соответствует мировым приоритетам.

Современное общество развивается стремительными темпами. С каждым днем все больше можно видеть новые виды средств передвижения на дорогах общего пользования. Передвижение человека с помощью устройства, оснащенного электродвигателем (электросамокат, электроскейтборд, сегвей, гироскутер), или мускульной силы (самокат, роликовые коньки, скейтборд) не является исключением [2, 3, 4].

Создание условий для безопасного дорожного движения в городах требует внедрения ряда архитектурно-планировочных и организационных мероприятий [5], таких как создание благоприятной инфраструктуры для передвижения средств мобильности.

На сегодняшний день существует тенденция расширения парка средств индивидуальной мобильности (СИМ) на улично-дорожной сети, вследствие чего количество дорожно-транспортных происшествий с участием данных средств увеличивается, что естествен-

но создаёт угрозу для жизни населения. Опасность существует не только для средств индивидуальной мобильности, но также для пешеходов и водителей транспортных средств.

Деятельность в рамках направления по обеспечению безопасного участия детей в дорожном движении предусматривает обучение детей и подростков Правилам дорожного движения, формирование у детей навыков безопасного поведения на дорогах, укрепление и контроль дисциплины участия детей в дорожном движении и создание условий безопасного участия детей в дорожном движении [6]. На сегодняшний день сформировалась необходимость в обучении детей и подростков безопасному передвижению на средствах индивидуальной мобильности.

Увеличение количества дорожно-транспортных происшествий происходит из-за возникновения конфликта между пешеходами и средствами индивидуальной мобильности, транспортными средствами и средствами индивидуальной мобильности [7].

Количество ДТП при столкновении СИМ с ТС составляет 45,9% от общего числа дорожно-транспортных происшествий. Это указывает на большую опасность для передвижения СИМ по дорожной сети и неспособность на данном этапе функционировать в одной среде СИМ и ТС. По причине возникновения конфликтов между пешеходами и СИМ количество ДТП при наезде на пешехода составляет 17,7%, так как пешеходная зона не адаптирована для их передвижения [8].

Согласно расчётам НИЦ БДД в 2018 г. было зарегистрировано 39 происшествий, а уже в 2023 г. – 2647 дорожно-транспортных происшествий, что увеличивает этот показатель в 67 раз за последние 5 лет (рисунок 1). Также следует отметить, что в данных ДТП получают ранения и погибают люди [9].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основным материалом для изучения является официальная статистическая база Госавтоинспекции, которая предоставляет открытый доступ к «карточкам ДТП». Представленная информация зачастую служит основой для большого ряда исследований из-за своей разнообразной составляющей. Существует возможность оценки аварийности по отдельным регионам и по большому количеству показателей. Согласно данным Федеральной службы государственной статистики есть возможность оценить развитие сервисом аренды электросамокатов, а именно размер парка данных устройств [10].

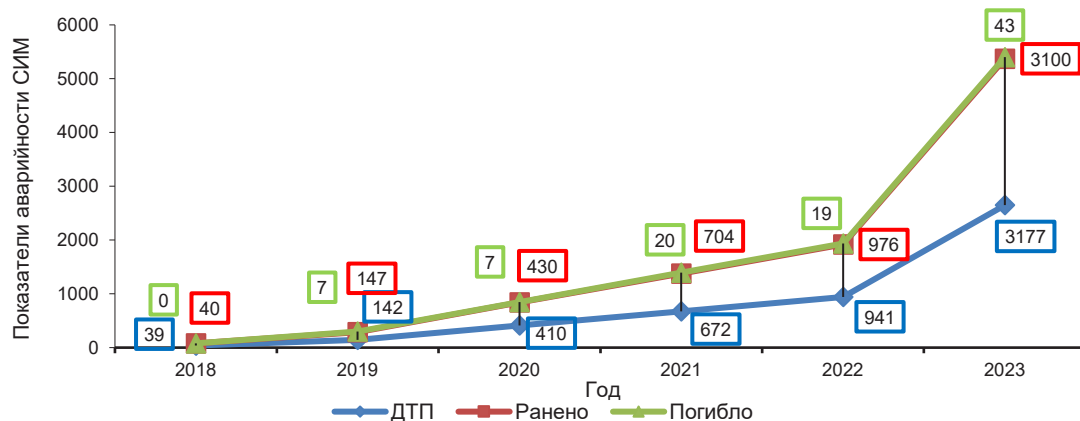


Рисунок 1 – Показатели аварийности ДТП с участием СИМ за 2019–2023 гг.
Источник: информационный аналитический обзор НИЦ БДД.

Figure 1 – Road accident rates involving personal mobility devices (PMDs) for the period from 2019 to 2023
Source: informational analytical review of Scientific Center of Road Safety Traffic.

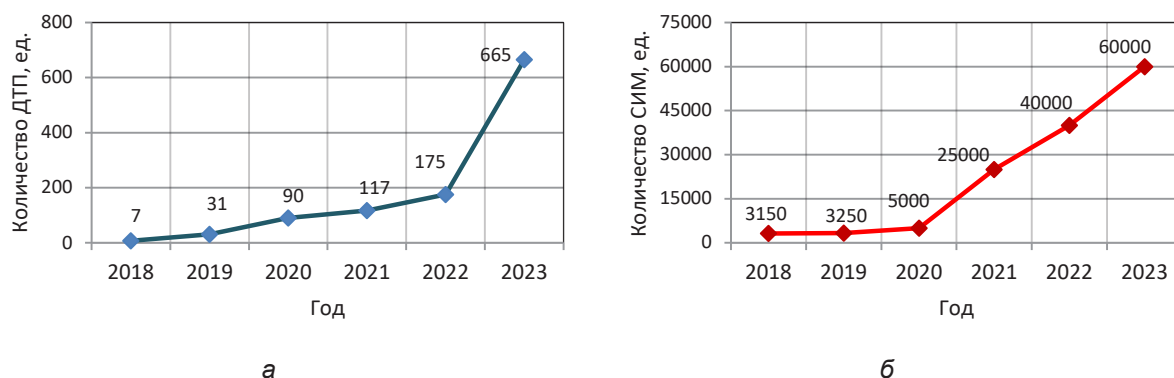


Рисунок 2 – Линейные графики изменения показателей ДТП и количества СИМ по г. Москве за 2018–2023 гг.:
а – количество ДТП с участием СИМ;
б – количество СИМ на улично-дорожной сети
Источник: <https://stat.gibdd.ru/> (дата обращения: 25.11.2024).

Figure 2 – Linear graphs of changes in road accident rates and the number of personal mobility devices (PMDs) in Moscow for the period from 2018 to 2023.
а – the number of road accidents involving personal mobility devices (PMDs);
б – the number of personal mobility devices (PMDs) on the street and road network.
Source: <https://stat.gibdd.ru/> (accessed 25.11.2024).

В качестве метода исследования для возможности прогнозирования ДТП использовался классический метод однофазной линейной регрессии с учетом парной и множественной регрессии и корреляции [11].

Население г. Москвы на 2023 г. составляло 13 149 803 чел., в связи с этим большая часть

пользователей таких устройств сосредоточена на данной территории. Так, за последние 6 лет показатель размера парка СИМ в г. Москве вырос в 19 раз, что, несомненно, увеличивает количество дорожно-транспортных происшествий с их участием [12].

Таблица 1

Число ДТП с участием СИМ по результату исследования статистической базы данных и показателей аварийности г. Москвы за период 2018–2023 гг.
Источник: составлено автором.

Table 1

The number of road accidents involving personal mobility devices (PMDs) according to the results of statistical database study and accident number data of Moscow for the period from 2018 to 2023.
Source: compiled by the author.

Месяц \ Год	2018	2019	2020	2021	2022	2023
январь	0	0	0	0	1	1
февраль	0	0	2	0	0	3
март	0	0	4	3	2	2
апрель	1	0	3	4	17	20
май	0	5	5	19	27	56
июнь	1	8	15	22	32	123
июль	3	3	18	16	27	145
август	2	3	15	12	30	171
сентябрь	0	3	15	20	23	82
октябрь	0	6	7	17	11	50
ноябрь	0	3	6	3	4	10
декабрь	0	0	0	1	1	2

МЕТОДОЛОГИЯ

В результате рассмотрения статистической базы данных был выбран перечень исследуемых параметров, а именно ДТП с участием СИМ за период 2018–2023 гг. При выгрузке карточек ДТП интересующие нас происшествия были помечены с участием водителей «персонального электрического средства передвижения малой мощности», что даёт наиболее полную информацию о дорожно-транспортном происшествии [13]. Всего в результате выгрузки показателей аварийности по г. Москве за рассматриваемый период произошло 1085 дорожно-транспортных происшествий. На представленном графике (рисунок 2) можно заметить, что происшествия с участием СИМ увеличиваются с каждым годом, так, за период 2022–2023 гг. данный показатель резко увеличился на 50%.

В ходе анализа параметров данных, содержащихся в карточке ДТП, было установлено,

что происшествия с участием СИМ увеличиваются с каждым годом¹. В связи с резким ростом данного показателя в г. Москве можно наблюдать, что дорожно-транспортные происшествия с участием средств мобильности происходят даже в осенне-зимний период, то есть круглогодично. Однако большее количество ДТП происходит в летний период (таблица 1).

Для выполнения прогноза количества дорожно-транспортных происшествий с участием СИМ необходимо построить уравнение парной регрессии y по x (формула (1)), а также рассчитать линейный коэффициент парной корреляции, коэффициент детерминации и среднюю ошибку аппроксимации. За значения x принимаем количество средств индивидуальной мобильности, а за y – число дорожно-транспортных происшествий с участием СИМ².

¹ Novikov A., Glagolev S., Novikov I., Shevtsova A. A. Information technologies and management of transport systems development of the approach to assessing adaptation of the intersection transport model // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019 International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering, ICI2AE 2019. P. 012052.

² Trofimenko Y., Komkov V., Donchenko V. Problems and prospects of sustainable low carbon development of transport in Russi. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 3. Сер. "International Conference on Sustainable Cities" 2018. P. 012014.

Таблица 2

Расчетная таблица параметров для выполнения прогнозирования количества ДТП с участием СИМ за период 2018–2023 гг.
Источник: составлено автором.

Table 2

Calculation table of parameters for predicting the number of road accidents involving personal mobility devices (PMDs) for the period from 2018 to 2023
Source: compiled by the author.

№									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	7	3150	22050	9922500	49	4,58	2,42	5,8564	34,57
2	31	3250	100750	10562500	961	5,48	25,52	651,2704	82,32
3	90	5000	450000	25000000	8100	21,23	68,77	4729,313	76,41
4	117	25000	2925000	625000000	13689	201,23	-84,23	7094,693	-71,99
5	175	40000	7000000	1600000000	30625	336,23	-161,23	25995,11	-92,13
6	665	60000	39900000	3600000000	442225	516,23	148,77	22132,51	22,37
Итого	1085	136400	50397800	5870485000	495649	1084,98	0,02	60608,76	51,55
Среднее значение	180,83	22733,33	8399633	978414166,7	82608,17	180,83	-	10101,46	8,59
	223,4	21485,1							
	49908,68	461609874							

$$a = \bar{y} - b \cdot \bar{x}, b = \frac{cov(x,y)}{\sigma_x^2}, \quad (1)$$

где $cov(x,y) = \overline{y \cdot x} - \bar{y} \cdot \bar{x}$ – ковариация признаков x и y , $\sigma_x^2 = \overline{x^2} - \bar{x}^2$ – дисперсия признака x и y .

Для расчета параметров уравнения линейной регрессии необходимо построить расчетную таблицу (таблица 2).

По формуле (1) находим параметры регрессии

$$\begin{aligned}
 b &= \frac{\overline{y \cdot x} - \bar{y} \cdot \bar{x}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2} = \\
 &= \frac{8399633,33 - 22733,33 \cdot 180,83}{978414166,7 - 22733,33^2} = \\
 &= \frac{4288765,27}{461609873,81} = 0,009 \\
 a &= \bar{y} - b \cdot \bar{x} = 180,83 - 0,009 \cdot \\
 &\quad \cdot 22733,33 = -23,77
 \end{aligned}$$

Так как коэффициент a в уравнении регрессии меньше нуля, существует необходимость – данный показатель проверить с помощью

t-критерия Стьюдента, а также вычислить Р-значение и определить значимость для двух наборов данных.

Уравнение регрессии имеет вид

$$y = -23,77 + 0,009 \cdot x. \quad (2)$$

Тесноту линейной связи оценит коэффициент корреляции по формуле

$$r_{xy} = b \cdot \frac{\sigma_x}{\sigma_y} = 0,009 \cdot \frac{21485,1}{223,4} = 0,86. \quad (3)$$

Так как значение коэффициента корреляции больше 0,7, то это говорит о наличии весьма тесной линейной связи между признаками.

Коэффициент детерминации:

$$r_{xy}^2 = 0,74.$$

Это означает, что 74% вариации количества дорожно-транспортных происшествий с участием СИМ (y) объясняется вариацией фактора x – количества СИМ на улично-дорожной сети г. Москвы.

Качество модели определяет средняя ошибка аппроксимации:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum A_i = \frac{51,55}{6} = 8,59. \quad (4)$$

Качество построенной модели оценивается как хорошее, так как $\bar{A}$ не превышает 10%.

Необходимо провести оценку статистической значимости уравнения регрессии с помощью F-критерия Фишера. Фактическое значение F-критерия по формуле составит

$$\begin{aligned} F_{\text{факт}} &= \frac{r_{xy}^2}{1 - r_{xy}^2} \cdot (n - 2) = \\ &= \frac{0,74}{1 - 0,74} \cdot 4 = 11,38. \end{aligned} \quad (5)$$

Табличное значение критерия при восьмипроцентном уровне значимости и степенях свободы $k_1=1$ и $k_2=4$ составляет $F_{\text{табл}}=7,71$. Так как $F_{\text{факт}}=11,38 > F_{\text{табл}}=7,71$, то уравнение регрессии признается статистически значимым.

Оценку статистической значимости параметров регрессии и корреляции проведем с помощью t-статистики Стьюдента и путем расчета доверительного интервала каждого из параметров.

Табличное значение t-критерия для числа степеней свободы $df=n-2=6-2=4$ и уровня значимости $\alpha=0,05$ составит $t_{\text{табл}}=2,78$.

Определим стандартные ошибки $m_b, m_{r_{xy}}$ остаточная дисперсия на одну степень свободы:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum (y - \hat{y}_x)^2}{n - 2} = \frac{60608,76}{4} = 15152,19; \quad (6)$$

$$m_b = \sqrt{\frac{S_{\text{ост}}^2}{n^2 \sigma_x^2}} = \sqrt{\frac{15152,19}{4^2 \cdot 461609874}} = 0,0014; \quad (7)$$

$$m_{r_{xy}} = \sqrt{\frac{1 - r_{xy}^2}{n - 2}} = \sqrt{\frac{1 - 0,74}{6 - 2}} = 0,25. \quad (8)$$

Тогда

$$t_b = \frac{b}{m_b} = \frac{0,009}{0,0014} = 6,43; \quad (9)$$

$$t_{r_{xy}} = \frac{r_{xy}}{m_{r_{xy}}} = \frac{0,86}{0,25} = 3,44. \quad (10)$$

Фактические значения t-статистики превосходят табличное значение

$$\begin{aligned} t_b &= 6,43 > t_{\text{табл}} = 2,78; \\ t_{r_{xy}} &= 3,44 > t_{\text{табл}} = 2,78. \end{aligned} \quad (10)$$

Поэтому параметры a, b, r_{xy} не случайны, а являются статистически значимыми.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С помощью полученного уравнения регрессии (2) для г. Москвы есть возможность спрогнозировать количество ДТП с участием средств индивидуальной мобильности (рисунок 3). Данные оценки уравнения регрессии позволяют использовать его для прогноза. Оценка статистической значимости параметров регрессии и корреляции показала, что уравнение регрессии является статистически значимым [14].

Полученные оценки регрессии позволяют использовать его для прогноза. Значение количества средств индивидуальной мобильности за 2024 г. в среднем, согласно прогнозу, увеличится на 33% и будет составлять 80000 устройств. В связи с этим есть возможность с помощью уравнения регрессии спрогнозировать 696 дорожно-транспортных происшествий с участием СИМ за 2024 г.³ [15].

$$y = -23,77 + 0,009 \cdot 80000 = 96,23. \quad (11)$$

³ Trofimenko Yu.V., Komkov V.I., Grigoryeva T.Yu. Forecast of the vehicle fleet size and structure in Russian federation by ecological class, a type of power installations and a fuel type for the period up to 2030. Proceedings of the Sixth International Environmental Congress (Eighth International Scientific-Technical Conference) "Ecology and Life Protection of Industrial-Transport Complexes" ELPIT 2017. 2017. P. 311-326.

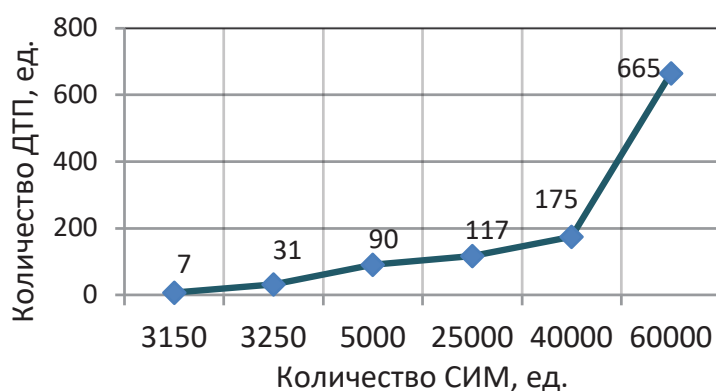


Рисунок 3 – Исходные данные изменения показателей ДТП и количества СИМ по г. Москве за 2018–2023 гг.
Источник: <https://stat.gibdd.ru/> (дата обращения: 25.11.2024).

Figure 3 – Initial data on changes in the number of road accidents and number of personal mobility devices (PMDs) in Moscow for the period from 2018 to 2023
Source: <https://stat.gibdd.ru/> (accessed 25.11.2024).

По имеющимся фактическим и прогнозным данным построили гистограмму распределения остатков с целью оценки нормальности их распределения (рисунок 4).

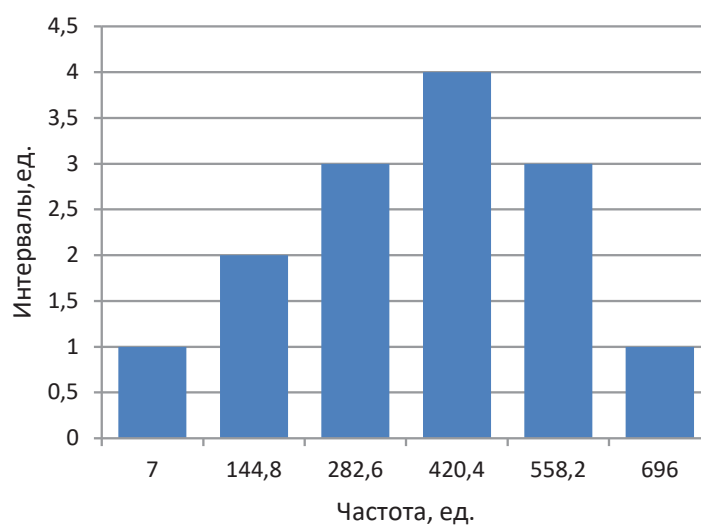


Рисунок 4 – Гистограмма распределения остатков фактических и прогнозных значений количества ДТП с участием СИМ за 2018–2024 гг.
Источник: <https://stat.gibdd.ru/> (дата обращения: 25.11.2024).

Figure 4 – Histogram of the distribution of the residuals of actual and forecast values of the number of road accidents involving personal mobility devices (PMDs) for the period from 2018 to 2024
Source: <https://stat.gibdd.ru/> (accessed 25.11.2024).

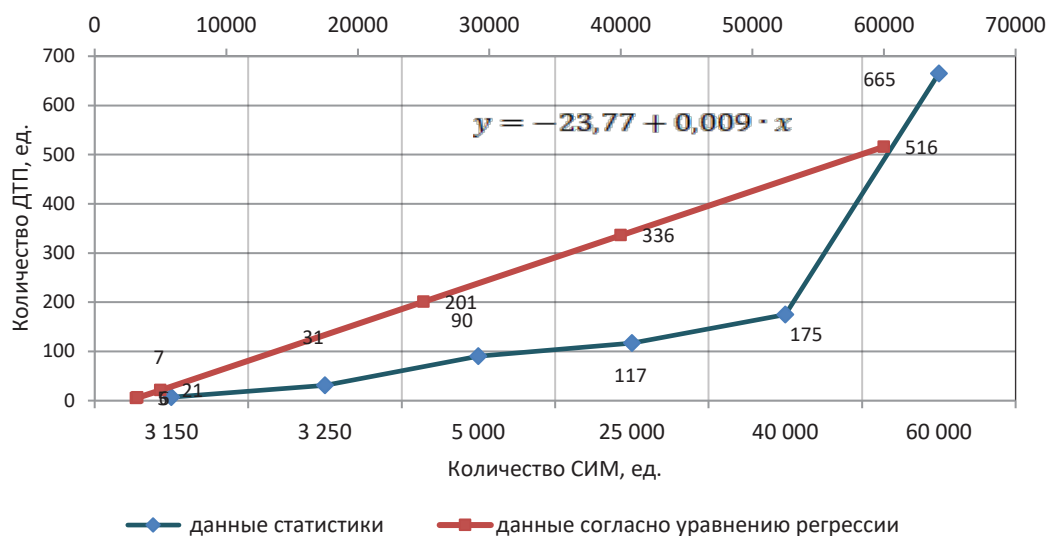


Рисунок 5 – Линейные графики изменения показателей ДТП и количества СИМ по г. Москве за 2018–2023 гг. по данным статистики и данным, полученным с помощью уравнения регрессии
Источник: <https://stat.gibdd.ru/> (дата обращения: 25.11.2024).

Figure 5 – Line graphs of changes in the number of road accidents and number of personal mobility devices (PMDs) in Moscow for the period from 2018 to 2023, based on statistics and data obtained with the help of regression equation.
Source: <https://stat.gibdd.ru/> (accessed 25.11.2024).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе полученных результатов анализа дорожно-транспортных происшествий на территории города Москвы были получены значения происшествий с участием средств индивидуальной мобильности за период 2018–2024 гг.⁴. С помощью использования такой науки, как эконометрика, было составлено уравнение регрессии, позволяющее с помощью прямой зависимости спрогнозировать количество дорожно-транспортных происшествий с участием СИМ (рисунок 5). Расчет статистической значимости управления регрессии и корреляции с помощью F-критерия Фишера и t-статистики Стьюдента позволил обеспечить точность прогнозирования на основании статистически значимых параметров [16].

Расчет с помощью полученной математической модели позволил спрогнозировать количество ДТП с участием СИМ за 2024 год в г. Москве – 696 происшествий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шевцова А.Г., Бурлуцкая А.Г., Васильева В.В. Внедрение интеллектуальной транспортной системы RAMP METERING на примере г. Белгорода // Мир транспорта и технологических машин. 2018. № 4(63). С. 42–48.
2. Мишина Ю.В. К вопросу об участии в дорожном движении пользователей средств индивидуальной мобильности // Правопорядок: история, теория, практика. 2020. № 1/2. С. 44–46.
3. Юнг А.А., Шевцова А.Г. Оценка аварийности средств индивидуальной мобильности в различных условиях движения // Современная наука. 2021. № 2. С. 31–36.
4. Ирошников Д.В. Правовые проблемы обеспечения безопасности личности на транспорте в условиях использования индивидуального электротранспорта // Правовое государство: теория и практики. 2019. № 1/1. С. 58–89.
5. Шевцова А.Г., Бурлуцкая А.Г., Юнг А.А. Оценка влияния параметров автомобилей на значение потока насыщения // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2022. № 1. С. 126–134. DOI 10.25198/2077-7175-2022-1–126.

⁴ Degele J., Gorr A., Haas K., Kormann, D., Krauss S., Lipinski P., Tenbih M., Koppenhoefer C., Fauser J., Hertweck D. Identifying E-scooter sharing customer segments using clustering. In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), Stuttgart, Germany, 17–20 June 2018; pp. 2–5.

6. Новописный И.А., Шевцова А.Г., Макагонов А.Е. Сравнительный анализ программ безопасности дорожного движения Германии и Российской Федерации // *Техника и технологии строительства*. 2015. № 4(4). С. 11–17.
7. Новиков И.А., Шевцова А.Г. Влияние изменения задержек транспортных средств на количество режимов работы светофорного объекта // *Мир транспорта и технологических машин*. 2011. № 4(35). С. 62–68.
8. Боровской А.Е., Шевцова А.Г. Методы определения потока насыщения автотрассы // *Мир транспорта*. 2013. № 3. С. 44–51.
9. Боровской А.Е., Воля П.А., Новикова И.А., Шевцова А.Г. Распределение состава транспортного потока на примере городской агломерации «Белгород» // *Мир транспорта и технологических машин*. 2015. № 4. С. 103–110.
10. Шелмаков П.С., Шелмаков С.В. Развитие велосипедного движения в Российской Федерации // *Успехи современного естествознания*. 2012. № 6. С. 183–184.
11. Соиников С.А. Особенности определения административно-правового статуса участников дорожного движения, использующих современные технические средства передвижения (средства индивидуальной мобильности) // *Вестник экономической безопасности*. 2020. № 1. С. 216–219.
12. Волков П.А., Кемьяш Ю.В. Средства индивидуальной мобильности: вопросы теории и практики использования // *Вестник Белгородского юридического института МВД России им. И.Д. Путилина*. 2021. № 1. С. 51–55.
13. Мишина Ю.В. Проблемы определения административно-правового статуса лиц, использующих для передвижения электросамокаты, сегвеи и иные современные технические средства // *Проблемы экономики и юридической практики*. 2020. № 4. С. 321–325.
14. Trofimenko Y.V., Komkov V.I., Potapchenko T.D., Donchenko V.V. Model for the assessment greenhouse gas emissions from road transport. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2019. T. 7. No 1. pp. 465–473.
15. Nocerino R., Colorni, A., Lia, F. Luè, A. E-bikes and E-scooters for smart logistics: environmental and economic sustainability in pro-E-bike Italian pilots. *Transp. Res. Procedia*. 2016. 14. 2362–2371.
16. Zagorskas J., Burinskiene M. Challenges Caused by Increased Use of E-Powered Personal Mobility Vehicles in European // *Cities Sustainability*. 2020. 12. 248.
3. Jung A.A., Shevtsova A.G. Assessment of the accident rate of personal mobility equipment in various driving conditions. *Sovremennaja nauka*. 2021; 2: 31–36. (in Russ.)
4. Iroshnikov D.V. Legal problems of ensuring personal safety in transport in the conditions of using individual electric transport. *The Rule of Law State: Theory and Practice*. 2019; 1/1: 58–89. (in Russ.)
5. Shevtsova A.G., Burlutskaya A.G., Yung A.A. Assessment of the influence of vehicle parameters on the value of the saturation flow. *Intellect. Innovations. Investments*. 2022; Vol. 1: 126–134. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-1-126>.
6. Novopisny I.A., Shevtsova A.G., Makagov A.E. Comparative analysis of road safety programs of Germany and the Russian Federation. *Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva*. 2015; 4(4): 11–17. (in Russ.)
7. Novikov I.A., Shevtsova A.G. The effect of changes in vehicle delays on the number of modes of operation of a traffic light object. *The world of transport and technological machines*. 2011; 4(35): 62–68. (in Russ.)
8. Borovskoi A.E. Shevtsova A.G. Methods for determining the saturation flow. *World of Transport and Transportation Journal*. 2013; 3: 44–51. (in Russ.)
9. Borovskoi A.E., Volya P.A., Novikov I.A., Shevtsova A.G. Distribution of the composition of the traffic flow on the example of the urban agglomeration "Belgorod". *The world of transport and technological machines*. 2015; 4: 103–110. (in Russ.)
10. Shelmakov P.S., Shelmakov S.V. Development of cycling in the Russian Federation. *Advances in current natural sciences*. 2012; 6: 183–184. (in Russ.)
11. Soynikov S.A. Features of determining the administrative status of road users using modern technical means of transportation (means of individual mobility). *Vestnik jekonomicheskoy bezopasnosti*. 2020; 1: 216–219. (in Russ.)
12. Volkov P.A., Kemyash Yu.V. Means of individual mobility: issues of theory and practice of use. *Vestnik of Putilin Belgorod law institute of the Ministry of the interior of Russia : Vestnik of Putilin Belgorod law institute of the Ministry of the interior of Russia*. 2021; 1: 51–55. (in Russ.)
13. Mishina Yu.V. Problems of determining the administrative and legal status of persons using electric scooters, segways and other modern technical means for movement. *Economic Problems and Legal Practice*. 2020; 4: 321–325. (in Russ.)
14. Trofimenko Y.V., Komkov V.I., Potapchenko T.D., Donchenko V.V. Model for the assessment greenhouse gas emissions from road transport. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2019; T. 7. No 1: 465–473.
15. Nocerino R., Colorni, A., Lia, F. Luè, A. E-bikes and E-scooters for smart logistics: environmental and economic sustainability in pro-E-bike Italian pilots. *Transp. Res. Procedia*. 2016; 14: 2362–2371.
16. Zagorskas J., Burinskiene M. Challenges Caused by Increased Use of E-Powered Personal Mobility Vehicles in European. *Cities Sustainability*. 2020; 12: 248.

REFERENCES

1. Shevtsova A.G., Burlutskaya A.G., Vasileva V.V. Introduction of intelligent transport system ramp metering in the city of Belgorod. *The world of transport and technological machines*. 2018; 4(63): 42–48. (in Russ.)
2. Mishina Y.V. Selected aspects of road traffic participation of users of individual mobility equipment. *Pravovoe gosudarstvo: teorija i praktiki*. 2020; ½: 44–46. (in Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Юнг Анастасия Алексеевна – аспирант кафедры «Эксплуатация и организация движения автотранспорта» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46).

ORCID: 0000-0003-0691-1393,

SPIN-код: 8392-4329,

e-mail: yungnastena33@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Anastasiya Alekseevna Yung – Postgraduate student, Transport Operation and Traffic Organization Department, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (46, Kostyukova Street, Belgorod, 308012).

ORCID: 0000-0003-0691-1393,

SPIN-code: 8392-4329,

e-mail: yungnastena33@gmail.com

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Научная статья
УДК 331.108
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-124-135>
EDN: AWCVGH



РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТРУКТУР И СОСТАВА ПЕРСОНАЛА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПАНИЙ С УЧЕТОМ ЗАТРАТ

Сират Джавед

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия
jawed.serat@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Современные условия строительства требуют от компаний высокой гибкости и способности оперативно адаптировать свою производственную структуру и состав персонала под требования каждого проекта. Для достижения максимального эффекта в реализации строительных задач важным является совершенствование производственных структур и состава персонала с учетом затрат. Учитывая специфику строительных работ, высокую степень технической сложности объектов и необходимость соблюдения строгих сроков, подходы к организации производственных процессов должны учитывать как технологические и квалификационные факторы, так и затраты на организацию трудовых ресурсов. В данной статье рассматриваются методы совершенствования производственной структуры строительных компаний с акцентом на повышение эффективности при соблюдении требований по срокам выполнения работ.

Материалы и методы. В исследовании применены методы системного анализа для оценки текущей эффективности производственной структуры строительных компаний.

Для выявления путей становления структуры персонала и распределения задач между работниками использованы математические модели, основанные на анализе затрат и производительности. Анализ факторов, влияющих на структуру производственного персонала, включал квалификацию работников, специфику строительных работ и их технологические особенности. Значительное внимание уделено затратам на обучение и повышение квалификации сотрудников, учитывая требования различных типов строительных проектов.

Научная новизна. В работе предложены новые подходы к совершенствованию производственной структуры строительных компаний, направленные на перераспределение задач и функций среди работников с учетом специфики проектов.

Разработанная модель позволяет оптимизировать состав персонала, обеспечивая гибкость производственной структуры для оперативного реагирования на изменения в процессе строительства. Оценка затрат и производительности на каждом этапе выполнения строительных работ способствует повышению надежности и эффективности реализации проектов.

Результаты. Проведенное исследование показало, что совершенствование производственной структуры и состава персонала строительных компаний требует применения комплексного подхода к перераспределению трудовых ресурсов.

Это включает акцент на повышение квалификации персонала, уточнение распределения функций и улучшение взаимодействия между подразделениями.

Оптимизация затрат на персонал, учитывающая сложность строительных задач, позволяет повысить производительность, улучшить координацию и обеспечить выполнение строительных проектов в соответствии с техническими требованиями.

Обсуждение и заключение. Результаты исследования подтверждают, что совершенствование производственной структуры и состава персонала строительных компаний с учетом затрат является важным фактором успешной реализации строительных проектов. Оптимизация этих элементов способствует снижению затрат, соблюдению сроков выполнения работ и повышению надежности строительных процессов.

Перспективы дальнейших исследований включают уточнение методов оценки эффективности различных производственных структур в строительстве и интеграцию инновационных технологий в процессы организации строительства.

© Сират Джавед, 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: производственный персонал, структура производственного потенциала, производительность труда, строительные компании, организационные подходы, оптимизация затрат

БЛАГОДАРНОСТИ: автор выражает благодарность рецензентам статьи за проделанную работу.

Статья поступила в редакцию 20.12.2024; одобрена после рецензирования 13.02.2025; принята к публикации 24.02.2025.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Сират Джавед. Разработка подходов к совершенствованию производственных структур и состава персонала строительных компаний // Вестник СибАДИ. 2025. Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 1. С. 124-135. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-124-135>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-124-135>

EDN: AWCVGH

DEVELOPMENT OF APPROACHES TO IMPROVING ORGANIZATION STRUCTURE AND STAFF COMPOSITION OF CONSTRUCTION COMPANIES IN TERMS OF COSTS

Jawed Serat

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint Petersburg, Russia
jawed.serat@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Under modern conditions construction companies have to be highly flexible and able to quickly adapt their organization structure and personnel to the requirements of each project. To achieve maximum effect in completing construction tasks, it is important to improve organization structure and staff composition taking into account costs. Given the specifics of construction work, high technical complexity of objects and the need to meet strict deadlines, approaches to organizing management processes should take into account both technological and qualification factors, and the costs of allocating labor resources.

This article discusses methods for improving organization structure of construction companies with an emphasis put on increasing efficiency while meeting deadlines.

Materials and methods. The study uses methods of system analysis to assess the current efficiency of the organization structure of construction companies. To identify ways to improve the staff structure and distribute tasks among employees, mathematical models based on cost and productivity analysis were used.

The analysis of factors affecting the operational staff structure included employee qualifications, specifics of construction work and their technological features. Considerable attention has been paid to the costs on training and advanced training of employees, taking into account the requirements of various types of construction projects.

Scientific novelty. The paper proposes new approaches to improving organization structure of construction companies aimed at redistributing tasks and functions among employees taking into account the specifics of projects. The developed model allows to optimize staff composition, provide capability of the organization structure to respond promptly to changes in the construction process. Evaluation of costs and productivity at each stage of construction works helps to increase the reliability and efficiency of project implementation.

Results. The conducted research has shown that improvement of the organization structure and staff composition of construction companies requires application of an integrated approach to the redistribution of labor resources. This includes an emphasis on improving the qualifications of personnel, clarifying functions distribution and improving interaction between departments. Optimization of personnel costs, taking into account the complexity of construction tasks, allows to increase productivity, coordination and provide implementation of construction projects according to technical requirements.

Discussion and conclusion. The results of the study prove that improving the organization structure and staff composition of construction companies in terms of costs is an important factor in the successful implementation

© Serat Jawed, 2025



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

of construction projects. Optimization of these elements leads to reducing costs, meeting deadlines for work and increasing the reliability of construction processes. Prospects for further research include improving methods for assessing the effectiveness of various construction departments and integrating innovative technologies into construction organization processes.

KEYWORDS: operational staff, structure of organization potential, labor productivity, construction companies, organizational approaches, cost optimization

ACKNOWLEDGMENT: the author expresses gratitude to the reviewers of the article for the work done.

The article was submitted 20.12.2024; approved after reviewing 13.02.2025; accepted for publication 24.02.2025.

The author 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. Serat Jawed Development of approaches to improving organization structure and staff composition of construction companies in terms of costs. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (1): 124-135. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-124-135>

ВВЕДЕНИЕ

Современные условия реализации строительных проектов требуют разработки научно обоснованных подходов к совершенствованию производственных структур и состава персонала строительных компаний. Особую значимость приобретает учет затрат при формировании и оптимизации кадрового потенциала, что становится ключевым фактором обеспечения эффективности строительства технически сложных объектов [1, 2].

Уровень профессиональной подготовки, адаптивность и компетенции персонала определяют успешность выполнения строительных работ и возможность внедрения инновационных технологий. Проблема недостаточной готовности персонала к восприятию современных методов и инструментов строительства, а также к эффективному выполнению задач в условиях повышенной сложности, актуализирует необходимость оптимизации состава и структуры производственных групп. Учитывая возрастающие требования к реализации строительных процессов, задачи совершенствования производственных структур требуют научного обоснования для повышения уровня производительности труда и снижения затрат на строительство.

Нерешенные части проблемы

Недостаточная проработка методов оптимизации производственных структур в строительных компаниях препятствует эффективному использованию трудовых ресурсов [3].

Особенно важно отметить, что влияние квалификации работников и организации труда на сокращение затрат и повышение организационно-технологической надежности строительных процессов мало исследовано. Кроме того, существующие исследования недоста-

точно фокусируются на взаимосвязи между составом производственного персонала и оптимизацией затрат, что сдерживает повышение производительности труда и сокращение расходов в строительных проектах [4]. Эти аспекты требуют разработки подходов к совершенствованию производственных структур и состава персонала с учетом влияния данных факторов на оптимизацию затрат и повышение эффективности строительных процессов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Строительная отрасль в условиях рыночной экономики сталкивается с необходимостью принятия самостоятельных решений, направленных на повышение эффективности использования ресурсов [5]. Для достижения максимального эффекта от реализации строительных проектов необходимо рационально распределять трудовые ресурсы.

Производственный персонал, уровень его квалификации и производственные структуры оказывают прямое влияние на успешность строительства [6, 7].

На основе существующих теоретических подходов трудовые ресурсы в строительстве определяются как совокупность производственного персонала строительной компании, обладающего необходимым уровнем образования, квалификацией и опытом.

Под производственными ресурсами понимаются все ресурсы, которые требуются для выполнения строительных работ, включая материальные (строительные материалы и оборудование), финансовые (средства для реализации проектов), а также трудовые (персонал, занимающийся выполнением строительных процессов). Эти ресурсы составляют ключевой компонент общей системы производствен-

ных ресурсов, адаптируемой к изменяющимся потребностям строительного процесса [8].

Влияние трудовых ресурсов на строительные процессы

Обеспеченность строительной компании квалифицированным производственным персоналом определяет продуктивность строительных работ, эффективность использования техники и механизмов, а также соблюдение сроков выполнения задач.

Это в конечном итоге влияет на уровень затрат. Оптимизация состава персонала позволяет повысить производительность, сократить расходы на выполнение работ и улучшить результаты реализации строительных проектов [9]. Производственный персонал формируется под воздействием внутренних факторов, таких как сложность объекта, используемые технологии и методы организации строительства. Внешние факторы, такие как демографические тенденции, состояние рабочей силы, экономические условия, а также правовые и социальные аспекты, определяют количественные и качественные характеристики трудовых ресурсов [10, 11].

Анализ структуры производственного персонала

Структура производственного персонала строительной компании характеризуется двумя основными показателями: удельным весом руководителей и специалистов (Y_1) и удельным весом рабочих (Y_2) в общей численности персонала [12]. Изменение этих показателей обусловлено повышением технического уровня производства, что подтверждается рассчитанными парными коэффициентами корреляции на примере строительных компаний

зарубежных стран и Афганистана. В качестве показателей технического уровня производства использовались: фондовооруженность труда рабочих (X_1), коэффициент обновления основных производственных фондов (X_2) и остаточная стоимость основных производственных фондов (X_3).

Результаты анализа расчетов, представленные в таблице 1, показывают наличие значимой взаимосвязи между техническими параметрами и структурой персонала.

Это свидетельствует о необходимости учета данных факторов при оптимизации организационных структур в строительстве [13]. Такие данные могут быть использованы как основа для разработки подходов к совершенствованию организационных структур строительных компаний с целью снижения затрат и повышения эффективности их деятельности.

На основе приведенных в таблице 1 значений парных коэффициентов корреляции можно сделать следующие выводы:

- удельный вес руководителей и специалистов прямо связан с показателями технического уровня производства, это означает, что с повышением уровня данных показателей увеличивается их доля;
- удельный вес рабочих имеет обратную связь с показателями технического уровня производства: повышение уровня производства снижает его значение.

Для проверки надежности коэффициентов корреляции была проведена сравнительная оценка их значений с минимально достоверной величиной коэффициента связи ($r_{\min} = 0,325$).

Таблица 1

Парные коэффициенты корреляции показателей структуры производственного персонала с показателями технического уровня производства
Источник: составлено автором.

Table 1

Paired correlation coefficients for indicators of operational staff structure and technical indicators
Source: compiled by the author.

Показатели технического производства	Парный коэффициент корреляции ($r_{Y_1 X_i}$)	Парный коэффициент корреляции ($r_{Y_2 X_i}$)
Фондовооруженность труда рабочих (X_1)	0.556	-0.417
Коэффициент обновления основных производственных фондов (X_2)	0.396	-0.342
Остаточная стоимость основных производственных фондов (X_3)	0.538	-0.327

Результаты показали, что все рассчитанные коэффициенты корреляции значимы, так как их значения превышают установленную минимальную величину [14].

Это свидетельствует о том, что структура производственного персонала косвенно отражает технический уровень производства. Таким образом, оптимальной считается такая структура производственного персонала, которая способствует достижению максимального уровня производительности труда. Для расчета оптимальной структуры можно использовать регрессионную модель, описывающую взаимосвязь показателей в параболической форме.

Для этого в качестве функции использовался показатель уровня производительности труда, измеренный выработкой чистой продукции на одного работника (Y).

В качестве факторов были выбраны следующие параметры структуры персонала: удельный вес руководителей и специалистов в общей численности персонала (X_1) и удельный вес рабочих в этой численности (X_2). Для расчета использовались отчетные данные анализируемых строительных компаний и стандартные программы системы «статистика» [15].

В результате вычислений получены следующие уравнения регрессии:

$$y = -216.351 + 10.178x_1 - 0.183x_1^2; \quad (1)$$

$$y = 20637.08 + 484.176x_2 - 5.654x_2^2. \quad (2)$$

Проведенный анализ корреляционных отношений для уравнений регрессии с коэффициентами 0,325 и 0,521 указывает на наличие статистически значимой взаимосвязи средней силы между исследуемыми параметрами, характеризующими организационные аспекты строительного производства. Параметры указанных уравнений позволяют определить критические значения факторов, обеспечивающих достижение максимальной эффективности использования трудовых ресурсов в строительстве [16].

Экстремальное значение параметра определяется с использованием следующего соотношения:

$$\text{при } X_1: x_1 = \frac{10.178}{2 \times 0.183} = 27.9\%; \quad (3)$$

$$\text{при } X_2: x_2 = \frac{484.176}{2 \times 5.654} = 42.8\%. \quad (4)$$

Определенные экстремальные значения параметров, характеризующих структуру персонала строительных организаций, считаются оптимальными, поскольку их отклонение приводит к снижению производительности труда при выполнении строительных процессов.

Данный вывод обоснован применением методов математического моделирования и корреляционно-регрессионного анализа, что подчеркивает важность системного подхода к исследованию структурных характеристик персонала и их влияния на организацию строительного производства и эффективность управления строительным производством [17].

В современных условиях строительного производства целесообразно выделить четыре основные функциональные области управления, однородные по содержанию: общее линейное руководство (P_n), техническая подготовка и обслуживание производства (T_0), организация строительных процессов (O_n) и контрактная сфера строительных компаний (K_c).

Для определения численности персонала, необходимого для эффективного функционирования этих управленческих функций, требуется выделить факторные показатели, отражающие объем и специфику выполняемых работ в рамках каждой из указанных областей, что позволяет более точно оценить потребности в ресурсах для оптимизации строительных процессов [18]. Анализ обследованных строительных компаний показал, что объем работ, выполняемых в рамках функции линейного управления, может быть эффективно отражен через показатели, такие как затраты на использование основных строительных ресурсов ($З_p$) и численность производственных рабочих (P_n), которые непосредственно характеризуют размер компании. Эти данные подтверждаются значениями парных корреляционных отношений между указанными факторными показателями и численностью линейных руководителей, которые составляют 0,377 и 0,434, что свидетельствует о наличии умеренной статистически значимой взаимосвязи. Построенное уравнение регрессии, описывающее степенную зависимость между исследуемыми параметрами, имеет следующий вид:

$$P_n = 0.118 \times З_p^{0.1} \times P_n^{0.5} \text{ при } R = 0.65. \quad (5)$$

Определение численности специалистов, обеспечивающих выполнение функций технической подготовки и обслуживания строительного производства, базируется на анализе таких факторов, как количество действующих норм для строительных работ (D_n); затраты

на активную часть основных средств строительного оборудования ($З_a$); число единиц ремонтной сложности строительной техники (E_p). Установленная взаимосвязь между этими параметрами и численностью специалистов подтверждается значениями парных коэффициентов корреляции, которые составляют 0,612, 0,670 и 0,231. Это указывает на необходимость учета данных факторов при оптимизации производственных структур в строительных компаниях.

Уравнение регрессии в линейной форме, описывающее взаимосвязь между численностью работников и определяющими факторами, представлено следующим образом:

$$T_0 = 50.02 + 0.0001D_n + 0.00513_a + 0.0018E_p \text{ при } R = 0.7. \quad (6)$$

При построении уравнения регрессии для расчета численности специалистов, выполняющих функции компании строительного производства, использовались следующие факторные показатели:

- численность рабочих, занятых в строительных процессах (P_n);
- объем реализации строительной продукции (O_n).

Статистическая взаимосвязь между этими факторами и численностью специалистов подтверждена значениями парных коэффициентов корреляции, равными 0,413 и 0,255.

Полученные результаты демонстрируют необходимость учета указанных факторов при формировании эффективной структуры персонала в строительных компаниях.

Рассчитанное уравнение регрессии, отражающее зависимость численности специалистов, выполняющих функции организации строительного производства, от выбранных факторов, представлено в следующем виде:

$$O_n = -102.68 + 0.0817P_n + 0.0024O_p \text{ при } R = 0.62. \quad (7)$$

Для расчета численности специалистов, выполняющих функции коммерческой деятельности (K_d) в строительных компаниях, было сформировано уравнение регрессии, которое включает следующие параметры:

$$K_d = 5.476 + 0.001O_n + 0.00173_c \text{ при } R = 0.584, \quad (8)$$

где 3_c – затраты оборотных средств.

Результаты проверки уравнений регрессии и их параметров с применением F и t критерия подтвердили статистическую значимость моделей, что свидетельствует о надежности полученных уравнений для обоснования численности руководителей и специалистов в строительных компаниях. Вместе с тем для повышения точности расчетов данные результаты необходимо корректировать с учетом поправочных коэффициентов, значения которых варьируются в пределах от 0,8 до 1,1. Введение поправок обусловлено тем, что теоретические значения численности работников, полученные из уравнений регрессии, имели относительное отклонение от экспериментальных данных в пределах $\pm 0,1$.

Это позволяет адаптировать расчеты к реальным условиям строительного производства и повысить их точность. Потребность компании в персоналах, способных эффективно выполнять задачи, должна определяться с учетом специфических требований к уровню образования и квалификации, выдвигаемых конкретными условиями строительного производства и его технологическими особенностями [19]. Для этого необходимы глубокие знания специальности и умение применять их на практике. Возрастает роль специалистов, занятых управлением строительным производством, вследствие чего важным становится соблюдение уровня и специализации кадров специалистов выполняемым функциям.

Прогрессивно-квалификационный состав руководителей и специалистов строительных компаний определяется уровнем образования и выбранной специальностью, полученной в учебных заведениях [20]. Анализ таблицы 2 позволяет отметить, что по всем функциям управления соотношение специалистов со средним образованием и высшим образованием фактически превышает предусмотренное штатным расписанием.

Если в целом по анализируемым компаниям по штату предусмотрен один специалист со средним специальным образованием на два специалиста с высшим образованием, то фактически один специалист со средним специальным образованием приходится на одного специалиста с высшим образованием. Особенно значителен этот показатель по функции «коммерческая деятельность». Процент соответствия уровня образования требуемому составляет 63,26% по компаниям в целом, достигая наибольшего значения по функции «техническая подготовка и обслуживание производства» около 74% и наименьшего по функции «коммерческая деятельность» около 50%.

Таблица 2
Структура персонала строительных компаний по уровням образования и выполняемым функциям управления производственными процессами
Источник: составлено автором.

Table 2
Staff structure in construction companies by levels of education and functions in operation management processes
Source: compiled by the author.

Наименование функции управления производственными процессами	Соотношение специалистов со средним специальным и высшим образованием		Процент соответствия			
	штату	фактически	уровня образования требуемому	специальности, требуемой по штатному расписанию	специальности, требуемой фактически	профессии, требуемой по должности
Общее линейное руководство	0.71	1.00	64.50	50.70	60.20	61.30
Техническая подготовка и техническое обслуживание производства	0.21	0.24	72.00	61.30	64.10	68.50
Организация производства	0.14	0.31	64.70	57.20	62.40	66.60
Коммерческая деятельность	0.76	1.10	52.10	34.10	42.30	41.20
Итого	0.45	0.83	63.26	50.80	57.10	60.40

Таблица 3
Теснота связи структуры производственных персоналов с показателями технического уровня производства
Источник: составлено авторам.

Table 3
Close connection between operational staff structure and technical operation indicators
Source: compiled by the author.

Наименование факторного показателя технического уровня строительного производства	Парные коэффициенты корреляции	
	удельный вес основных рабочих	удельный вес вспомогательных рабочих
Вооруженность основных рабочих технологическим оборудованием, определяемым (количество станков, функционирующих в основном производственном процессе на 1000 чел. из числа основных рабочих)	-0.314	0.263
Обеспеченность вспомогательных рабочих машинами (количество станков во вспомогательном производстве на 1000 чел. вспомогательных рабочих)	0.213	-0.272
Удельный вес металлорежущих станков в возрасте до 10 лет в общем их количестве, %	-0.302	0.234
Удельный вес кузнечнопрессового оборудования в возрасте до 10 лет в общем их количестве, %	-0.311	0.222
Энерговооруженность одного рабочего по мощности установленных электродвигателей, кВт	-0.231	0.265

Значения коэффициентов демонстрируют умеренную связь, что указывает на необходимость учета этих факторов при формировании производственных структур строительных компаний. Собранные данные свидетельствуют, что образование, полученное в средних специальных и высших учебных заведениях, на 15–20% не соответствует предъявляемым требованиям. Это создает необходимость дополнительного обучения и повышения квалификации, что увеличивает затраты на подготовку персонала.

Категории персонала оцениваются удельными весами численности основных и вспомогательных рабочих в общей численности производственного персонала [21].

Взаимосвязь этих показателей с техническим уровнем производства проанализирована с использованием парных коэффициентов корреляции, результаты которых представлены в таблице 3.

Анализ данных таблицы показывает, что технический уровень строительного производства напрямую связан со структурой рабочей силы. Отрицательная корреляция большинства показателей, таких как уровень обеспеченности оборудования и возраст оборудования, с удельным весом основных рабочих указывает на недостаточную технологическую оснащенность при увеличении численности основной рабочей силы. В то же время положительная корреляция с удельным весом вспомогательных рабочих по ряду факторов подчеркивает их важную роль в поддержании и обслуживании технической базы. Таким образом, выявленные зависимости подтверждают необходимость модернизации оборудования и формирования сбалансированного состава рабочих для повышения эффективности строительного производства.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов показывают наличие умеренной обратной зависимости между удельным весом основных и вспомогательных рабочих и уровнем технической обеспеченности их труда. Установлено, что удельный вес основных рабочих находится в обратной связи с долей вспомогательных рабочих, что подтверждает использование более устаревшего оборудования во вспомогательных подразделениях по сравнению с основными.

Выявленная зависимость подчеркивает необходимость обновления технического обеспечения вспомогательных подразделений, что позволит оптимизировать затраты и повысить эффективность производственных

процессов. Это также указывает на необходимость разработки подходов к совершенствованию производственных структур с акцентом на техническое оснащение вспомогательных подразделений и балансировку состава рабочих для оптимизации затрат. Состав рабочих на строительных объектах зависит от их квалификационного уровня, возрастных характеристик и трудового стажа.

Эти факторы оказывают влияние на индивидуальную производительность труда и эффективность управления производственными процессами.

Показателем уровня индивидуальной производительности труда является процент выполнения норм выработки. Влияние на этот показатель оказывают следующие факторы: квалификация рабочего (X_1), возраст рабочего (X_2) и трудовой стаж (X_3).

Величина коэффициента вариации свидетельствует о значительных колебаниях исследуемых показателей, что подтверждает наличие незадействованных возможностей для повышения индивидуальной производительности труда рабочих.

На основе представленных данных, включая статистические показатели из таблицы 4, можно выделить области для дальнейшего анализа и оптимизации производственных процессов, что, в свою очередь, будет способствовать совершенствованию производственных структур и более эффективному использованию трудовых ресурсов.

Эти коэффициенты отражают степень взаимосвязи между различными факторными показателями технического уровня строительного производства. Для оценки силы связи между показателями были рассчитаны парные коэффициенты корреляции. Значения коэффициентов представлены в таблице 5.

Полученные данные позволяют выявить, как различные параметры, такие как оснащенность рабочих и оборудование, влияют на структуру персонала и производственные процессы, что результаты этих расчетов необходимы для принятия управленческих решений по оптимизации состава персонала и совершенствованию производственных процессов с учетом затрат в строительных компаниях. На основании значений парных коэффициентов корреляции можно заключить, что исследуемые факторы находятся в прямой корреляционной связи с производительностью труда. Кроме того, наблюдается очень тесная корреляционная связь факторов между собой ($rx_1x_2 = 0.632$; $rx_1x_3 = 0.675$; $rx_2x_3 = 0.781$).

Таблица 4

Статистические характеристики показателей производительности труда рабочих в строительных компаниях
Источник: составлено автором.

Table 4

Statistical characteristics of labor productivity in construction companies
Source: compiled by the author.

Показатели	Среднее значение	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент вариации, %
Y	114.52	11.40	16.10
X ₁	2.36	0.87	17.10
X ₂	24.74	11.00	22.40
X ₃	12.27	3.02	20.10

Таблица 5

Матрица парных коэффициентов корреляции
Источник: составлено автором.

Table 5

Matrix of paired correlation coefficients
Source: compiled by the author.

Y	X ₁	X ₂	X ₃
1.000	0.311	0.272	0.243
0.311	1.000	0.632	0.675
0.272	0.632	1.000	0.781
0.243	0.675	0.781	1.000

Для определения количественного влияния каждого фактора на уровень выполнения норм выработки в строительных процессах рассчитывались уравнения регрессии в разных формах связи: линейной, степенной, параболической и гиперболической.

Сравнение значений индексов корреляции при уравнениях регрессии позволило установить, что наилучшей формой зависимости между показателями является параболическая, так как соответствующие индексы корреляции имеют максимальные значения.

В связи с этим основной упор в исследовании был сделан на применение параболической зависимости для анализа факторов, определяющих эффективность выполнения строительных работ. Парные уравнения регрессии, построенные в параболической форме зависимости, используются для выявления экстремальных значений факторных показателей, определяющих эффективность строительных процессов. Такие модели позволяют установить оптимальные параметры, обеспечивающие максимальную производительность труда с учетом ключевых факторов. Они служат основой для разработки научно обо-

снованных подходов к совершенствованию производственных структур и состава персонала строительных компаний в следующих направлениях:

- рост производительности труда рабочих под влиянием их квалификации;
- возраст рабочих, оказывающий положительное влияние на их производительность;
- стаж работы в компании, положительно влияющий на производительность труда и способствующий улучшению результатов строительства.

Стаж работы в компании, оказывающий влияние на увеличение производительности труда, может быть рассчитан по следующей формуле:

$$x_{\text{экс}} = \frac{-a_1}{2a_1}. \quad (9)$$

Параболические уравнения регрессии, отражающие зависимости между факторными показателями и производительностью труда в строительных процессах, характеризуются следующими значениями:

$$y = 86.714 + 14.123x_1 - 1.131x_1^2 \quad (10)$$

при $ryx_1 = 0.418$;

$$y = 71.306 + 2.311x_2 - 0.031x_2^2 \quad (11)$$

при $ryx_2 = 0.381$;

$$y = 112.514 + 3.115x_3 - 0.087x_3^2 \quad (12)$$

при $ryx_3 = 0.266$.

Исходя из параметров уравнений регрессии, экстремальные значения факторных показателей, характеризующих производственные процессы в строительстве, определяются следующим образом:

$$x_{1_{\text{экс}}} = \frac{14.123}{2 \times 1.131} = 6 \text{ разряд} ; \quad (13)$$

$$x_{2_{\text{экс}}} = \frac{2.311}{2 \times 0.031} = 37 \text{ лет} ; \quad (14)$$

$$x_{3_{\text{экс}}} = \frac{3.115}{2 \times 0.087} = 17 \text{ лет} . \quad (15)$$

Результаты расчетов экстремальных значений факторных показателей подтверждают, что повышение квалификации работников с 1-го до 6-го разряда приводит к увеличению их производительности труда. Возраст работников оказывает положительное влияние на производительность до 37 лет, а затем начинается снижение ее уровня.

Стаж работы в компании до 17 лет способствует росту производительности труда рабочих.

Выявленные тенденции следует учитывать при кадровой политике предприятия для повышения эффективности использования производственного персонала.

Установленные закономерности должны быть учтены при разработке научно обоснованных подходов к совершенствованию производственных структур и состава персонала строительных компаний с учётом затрат, что способствует повышению эффективности строительных процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного исследования изложенные в статье положения позволяют сделать следующие выводы:

1. Установлено, что структура производственного персонала влияет на уровень затрат и эффективность выполнения строительных работ. Более высокий технический уровень производства способствует увеличению удельного веса руководителей и специалистов, что приводит к снижению доли рабочих в составе производственного персонала.

2. Оптимальные значения структурных показателей персонала определяются через расчет экстремальных значений параметров регрессионных уравнений, которые в данном исследовании составляют 27,9 и 42,8% соответственно.

3. Предложены регрессионные модели, позволяющие определить рациональную численность руководителей и специалистов для повышения эффективности управления строительным производством.

4. Доля соответствия уровня образования требованиям составляет 63,26%. Наибольшее соответствие наблюдается для функций «Техническая подготовка и обслуживание производства», а наименьшее – для «Коммерческой деятельности».

5. Обнаружена обратная зависимость средней силы между удельными весами основных и вспомогательных рабочих, что подтверждает необходимость сбалансированного подхода к формированию состава персонала.

6. Прямая зависимость удельного веса вспомогательных рабочих и обратная зависимость удельного веса основных рабочих с энерговооруженностью труда и возрастом оборудования указывают на использование более устаревшего оборудования во вспомогательных подразделениях по сравнению с основным.

7. Максимальная производительность труда основных рабочих достигается при экстремальных значениях следующих показателей: средний квалификационный разряд – 6-й, средний возраст – 37 лет, средний стаж работы – 17 лет.

В результате проведенного исследования был разработан научно обоснованный подход к оптимизации структуры производственного персонала строительных компаний, основанный на учете затрат и эффективности производственных процессов. Этот подход включает в себя новые методы распределения трудовых ресурсов и повышения их производительности, а также оптимизацию состава персонала в зависимости от технического уровня производства.

Внедрение предложенных методов и подходов позволит значительно повысить эффективность строительства, улучшить использование трудовых ресурсов и снизить затраты на всех этапах реализации строительных проектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Борисюк Н.К., Смотрина О.С. К вопросу функционирования предприятия в нестабильной внешней среде // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2022. № 2. С. 24–30. DOI: <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-2-24>. EDN: XLJDGS
2. Дьячкова О.Н., Михайлов А.Е., Якунина Г.В. Опыт оценки привлекательности районных парков Санкт-Петербурга // Социология города. 2022. № 3. С. 49–63. DOI: [10.35211/19943520_2022_3_49](https://doi.org/10.35211/19943520_2022_3_49).
3. Зеленцов Л.Б. Реализация строительных проектов изменяемого функционального назначения // Строительное производство. 2021. № 2. С. 26–32. DOI: [10.54950/26585340_2021_2_26](https://doi.org/10.54950/26585340_2021_2_26). EDN: BZKXLZ
4. Зеленцов Л.Б., Цапко К.А., Беликова И.Ф., Пирко Д.В. Современные методы оценки организационно-технологической надежности инвестиционно-строительного комплекса [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2020. № 9. Режим доступа: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2020/6602> (дата обращения: 28.04.2023).
5. Лебедев В.М. Организационно-технологическая надежность управляющих систем строительства // Вестник МГСУ. 2008. № 4. С. 191–194. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsionno-tehnologicheskaya-nadezhnostupravlyayuschihsistem-stroitelstva-1> (дата обращения: 28.04.2023)
6. Родин Д.А. Учет факторов неопределенности и риска при оценке инвестиционных проектов // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2022. № 3–4. С. 19–25. EDN: TJRDTU.
7. Сафарян Г.Б. Критический анализ обобщенной модели строительной системы // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11, № 4. С. 41–47. DOI: [10.22227/2305-5502.2021.4.4](https://doi.org/10.22227/2305-5502.2021.4.4). EDN: PFGTCK.
8. Цопа Н.В., Халилов А.Э. Ресурсное обеспечение инвестиционно-строительных проектов // Экономика строительства и природопользования. 2022. №1–2. С. 82–83.
9. Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Mailyan L.R., Meskhi B.C., El'shaeva D., Varavka V. Developing environmentally sustainable and cost-effective geopolymer concrete with improved characteristics // Sustainability. 2021. № 13. 13607. DOI: [10.3390/su132413607](https://doi.org/10.3390/su132413607).
10. Chen Yi., Zhu D., Tian Z., Guo Q. Factors influencing construction time performance of prefabricated house building: A multi-case study // Habitat International. 2023. Vol. 131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2022.102731>.

11. Díaz-López C., Serrano-Jiménez A., Verichev K., Barrios-Padura A. Passive cooling strategies to optimise sustainability and environmental ergonomics in Mediterranean schools based on a critical review // Building and Environment. 2022. Vol. 221. DOI: [10.1016/j.buildenv.2022.109297](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109297).
12. FalahKhalaf Ali Alrubaie The identity of the economic system in Iraq between the rentier state and the developmental state // Future Journal of Pharmaceutical Sciences. 2021. 484(2019): 12–38.
13. Huang X.A. decision-making model for optimizing project performance in construction. International Journal of Project Management, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2017.08.005>.
14. Krichevsky M., Martynova J., Dmitrieva S. Use of Neural Networks to Assess Competitiveness of Organizations. International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019. 2019; 1259: 72–82. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_8.
15. O'Neill C., Gopaldasani V., Coman R. Factors that influence the effective use of safe work method statements for high-risk construction work in Australia – A literature review // Safety Science. 2022. Vol. 147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105628>
16. Oparina L.A. Application of information modelling technologies for construction time management // Smart Composite in Construction. 2021. Vol. 2. № 2. Pp. 48–55. DOI: https://doi.org/10.52957/27821919_2021_2_48.
17. Sarvari H., Chan D. W.M., Alaeos A.K.F., Olawumi T.O., Aldaud A.A.A. Critical success factors for managing construction small and medium-sized enterprises in developing countries of Middle East: Evidence from Iranian construction enterprises // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103152>
18. Vivek A., Rao H. Identification and analysing of risk factors affecting cost of construction projects // International Conference on Latest Developments in Materials & Manufacturing. 2022. Vol. 60, Part 3. Pp. 1696–1701. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.228>
19. Величкин В.З., Петроченко М.В., Стрелец К.И., Заводнова Е.Б., Городишенина А.Ю. Метод ветвей и границ при организации квартальной застройки // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16, Вып. 1. С. 91–104. DOI: [10.22227/1997-0935.2021.1.91-104](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.1.91-104).
20. Yilmaz S., Irmak M.A., Qaid A. Assessing the effects of different urban landscapes and built environment patterns on thermal comfort and air pollution in Erzurum city, Turkey // Building and Environment. 2022. Vol. 219. DOI: [10.1016/j.buildenv.2022.109210](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109210)
21. Yousif You. Z., Sarhat M.A., Farsat H.A. Investigating BIM level in Iraqi construction industry // Ain Shams Engineering Journal. 2023. Vol. 14, Issue 3. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101881>

REFERENCES

1. Borisyuk N.K., Smotrina O.S. Enterprise survival in an unstable environment. *Intellekt. Inno-*

vatsii. *Investitsii [Intellect. Innovations. Investments]*. 2022; Vol. 2: 24–30. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-2-24>

2. Dyachkova O.N., Mikhaylov A.E., Yakunina G.V. Experience in assessing the attractiveness of district parks in St. Petersburg. *Urban Sociology*. 2022; 3: 49–63. (in Russ.) DOI: [10.35211/19943520_2022_3_49](https://doi.org/10.35211/19943520_2022_3_49).

3. Zelentsov L.B. Redevelopment of urban areas. *Construction production*. 2021; 2: 26–32. (in Russ.) DOI: [10.54950/26585340_2021_2_26](https://doi.org/10.54950/26585340_2021_2_26).

4. Zelentsov L.B., Tsapko K.A., Belikova I.F., Pirko D.V. Modern methods of assessing the organizational and technological reliability of the investment and construction complex [Electronic resource]. *Engineering Journal of Don*. 2020; 9. Available at: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2020/6602> (accessed: 28.04.2023). (in Russ.)

5. Lebedev V.M. Organizational and technological reliability of construction management systems [Electronic resource]. *Vestnik MGSU*. 2008; 4: 191–194. (in Russ.)

6. Rodin D.A. Uncertainty and risk factors assessment in investment projects evaluation. *Scientific and technical journal «News of higher educational institutions. Problems of printing and publishing»*. 2022; 3–4: 19–25. EDN: TJRDTU. (in Russ.)

7. Safaryan G.B. A generalized model of a building system: a critical analysis. *Construction: Science and Education*. 2021; 11(4): 41–47. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22227/2305-5502.2021.4.4>

8. Tsopa N.V., Khalilov A.E. Resource support of investment and construction projects. *Construction economic and environmental management*. 2022; 1–2: 82–83. (in Russ.)

9. Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Mailyan L.R., Meskhi B.C., El'shaeva D., Varavka V. Developing environmentally sustainable and cost-effective geopolymers concrete with improved characteristics. *Sustainability*. 2021; 13: 13607. DOI: [10.3390/su132413607](https://doi.org/10.3390/su132413607)

10. Chen Yi, Zhu D., Tian Z., Guo Q. Factors influencing construction time performance of prefabricated house building: A multi-case study. *Habitat International*. 2023; Vol. 131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2022.102731>

11. Díaz-López C., Serrano-Jiménez A., Verichev K., Barrios-Padura A. Passive cooling strategies to optimize sustainability and environmental ergonomics in Mediterranean schools based on a critical review. *Building and Environment*. 2022; Vol. 221. DOI: [10.1016/j.buildenv.2022.109297](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109297)

12. FalahKhalaf Ali Alrubaie The identity of the economic system in Iraq between the rentier state and the developmental state. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2021. 484(2019): 12–38.

13. Huang X.A. Decision-Making Model for Optimizing Project Performance in Construction. *International Journal of Project Management*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2017.08.005>.

14. Krichevsky M., Martynova J., Dmitrieva S. Use of Neural Networks to Assess Competitiveness of Organizations. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT* 2019. 2019; 1259: 72–82. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_8.

15. O'Neill C., Gopaldasani V., Coman R. Factors that influence the effective use of safe work method statements for high-risk construction work in Australia – A literature review. *Safety Science*. 2022; Vol. 147. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105628>

16. Oparina L.A. Application of information modeling technologies for construction time management. *Smart Composite in Construction*. 2021; Vol. 2. No. 2: 48–55. DOI: [10.52957/27821919_2021_2_48](https://doi.org/10.52957/27821919_2021_2_48). EDN: KNJPXR.

17. Sarvari H., Chan D.W.M., Alaeos A.K.F., Olawumi T.O., Aldaud A.A.A. Critical success factors for managing construction small and medium-sized enterprises in developing countries of the Middle East: Evidence from Iranian construction enterprises. *Journal of Building Engineering*. 2021; Vol. 43. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103152>

18. Vivek A., Rao H. Identification and analysis of risk factors affecting the cost of construction projects. *International Conference on Latest Developments in Materials & Manufacturing*. 2022; Vol. 60, Part 3: 1696–1701. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.228>.

19. Velichkin V.Z., Petrochenko M.V., Strelets K.I., Zavodnova E.B., Gorodishenina A.Yu. The branch and bound method applied to the construction of residential quarters. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(1): 91–104. (In Russ.) DOI: [10.22227/1997-0935.2021.1.91-104](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.1.91-104)

20. Yilmaz S., Irmak M.A., Qaid A. Assessing the effects of different urban landscapes and built environment patterns on thermal comfort and air pollution in Erzurum city, Turkey. *Building and Environment*. 2022; Vol. 219. DOI: [10.1016/j.buildenv.2022.109210](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109210)

21. Yousif You. Z., Sarhat M.A., Farsat H.A. Investigating BIM level in the Iraqi construction industry. *Ain Shams Engineering Journal*. 2023. Vol. 14, Issue 3. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101881>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сират Джавед – аспирант Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1386-6033>,

e-mail: jawed.serat@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Jawed Serat – postgraduate student, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2nd Krasnoarmeyskaya Str., St Petersburg, 190005).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1386-6033>,

e-mail: jawed.serat@yandex.ru

Научная статья
УДК 69.05
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-136-147>
EDN: BPZQQG



ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Л.Д. Маилян, Н.О. Сизен ✉

Донской государственный технический университет

г. Ростов-на-Дону, Россия

✉ ответственный автор

sizen0263@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Проведение капитального ремонта – одно из главных мероприятий для достижения целей длительного сохранения и нормальной эксплуатации зданий и сооружений. При проведении капитального ремонта в основном встречаются те же проблемы, что и при строительстве. Однако капитальному ремонту могут быть присущи и проблемы, в ходе строительства не встречающиеся. Тема капитального ремонта остаётся весьма актуальной в современных публикациях, тем не менее не все стороны организации капитального ремонта ещё хорошо изучены. Целью данного исследования является разработка модели определения организационно-технологического уровня капитального ремонта зданий (сооружений). Для этого поставлены задачи: выявить проблемы в области организации и технологии проведения капитального ремонта; определить факторы, влияющие на уровень капитального ремонта; выработать формулу определения организационно-технологического уровня капитального ремонта и дать предложения по его повышению.

Материалы и методы. В исследовании использовались теория многочисленных начал, метод экспертных оценок и математическая статистика. Для проведения необходимых экспериментов и анализа их результатов применялась производственная база Донского государственного технического университета, а также данные ряда заказчиков работ по капитальному ремонту. Представители этих заказчиков, прежде всего, привлекались в качестве экспертов, оценивающих организационно-технологический уровень подрядчиков, производящих работы по капитальному ремонту зданий и сооружений. Уровень организации капитального ремонта целесообразно определить тремя характеристиками – качеством, скоростью выполнения, цена. При высоких двух первых показателях и наиболее низком третьем можно сказать, что уровень наиболее высокий. Чтобы определить более точное значение уровня капитального ремонта, нужно учитывать не только весомость показателей факторов, но и значения характеристик этих факторов, а также весомости показателей этих характеристик.

Результаты. Исследование позволило: систематизировать организационно-технологические проблемы капитального ремонта; определить факторы, влияющие на организационно-технологический уровень капитального ремонта зданий (сооружений); предложить модель его определения; определить характеристики влияющих на него факторов; выработать формулу определения организационно-технологического уровня капитального ремонта; предложить алгоритм определения общего организационно-технологического уровня капитального ремонта; вывести на практическом примере весомости факторов, влияющих на уровень капитального ремонта; дать предложения по повышению организационно-технологического уровня капитального ремонта.

Обсуждение и заключение. Практическая ценность работы для заказчиков капитального ремонта заключается в том, что, применяя предложенную методику, они могут выбрать подрядчика с более высоким уровнем, а подрядчики могут повысить свой уровень, используя нашу методику. Выявление и систематизация нами проблем организации капитального ремонта могут помочь всем участникам отношений в области капитального ремонта в плане нейтрализации подобных проблем на ранних этапах подготовки капитального ремонта. Полученные результаты нашего практического исследования учтены при разработке планов деятельности подрядчиков, на базе которых проводилось исследование. Развивая исследование, можно будет дополнить перечень факторов, влияющих на организационно-технологический уровень капитального ремонта, а также выявить ещё ряд характеристик этих факторов и систематизировать перечни факторов и характеристик.

© Маилян Л.Д., Сизен Н.О., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: капитальный ремонт, проблема, организационно-технологический уровень, экспертная оценка, фактор, характеристика, анализ

Статья поступила в редакцию 04.12.2024; одобрена после рецензирования 04.01.2025; принята к публикации 24.02.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Маилян Л.Д., Сизен Н.О. Организационно-технологический уровень капитального ремонта зданий и сооружений // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 1. С. 136-147. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-136-147>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-136-147>

EDN: BPZQQG

ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL LEVEL OF MAJOR REPAIRS OF BUILDINGS AND STRUCTURES

Lia D. Mailyan, Nikolai O. Sizen ✉

Don State Technical University

Rostov-on-Don, Russia

✉ corresponding author

sizen0263@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. Carrying out major repairs is one of the main activities for achieving the goals of long-term preservation and normal operation of buildings and structures. Basically, major repairs are connected with the same problems as construction. However, major repairs may include difficulties that are not typical for construction. Due to this, the topic of major repairs still remains very relevant in modern publications and not all aspects of its organizing have been studied well. The purpose of this study is to develop an evaluating model for determining the realization quality at organizational and technological stage of major repairs of buildings (structures). To achieve this goal the following tasks have been set: to identify problems arising in the field of organization and technology of major repairs; to detect the factors affecting the fulfillment of major repairs; to develop a formula for determining the quality of organizational and technological level in major repairs and to make proposals for its improvement.

Materials and methods. Theory of multiple principles, method of expert assessments and mathematical statistics were applied in the study. To conduct the necessary experiments and analyze their results, the production resources of the Don State Technical University were used, as well as data from the number of customers of major repairs. Representatives of these customers, first of all, were involved as experts for assessing the organizational and technological level of contractors performing major repairs of buildings and structures. The quality level of major repair organization is most appropriately to be determined by three characteristics - quality, speed of execution, price. If the first two indicators are high, and the third is the lowest, it can be said that the level is the highest. To estimate more accurate the performance level of major repairs, it is necessary to take into account not only the value of the indicators of the factors, but also the values of the characteristics of these factors, as well as the significance of the indicators of these characteristics.

Results. The study allowed to systematize organizational and technological problems of major repairs; to define the factors influencing the organizational and technological level of major repairs of buildings (structures); to propose a model for its determination; to identify the characteristics of the factors influencing it; to develop a formula for evaluating the organizational and technological level of major repairs; to propose an algorithm for estimation the general organizational and technological level of major repairs; to derive, using a practical example, the significance of the factors influencing the execution quality of major repairs; to give proposals for improving the organizational and technological level of major repairs.

Discussion and conclusions. The practical value of the work for major repair customers is that, applying the proposed methodology, they can choose a contractor with a higher performance level, and contractors can improve their level using our methodology. Identification and systematization of problems in organizing major repairs by us

© Mailyan L.D., Sizen N.O., 2025



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

can help all participants taking part in major repair relations in terms of neutralizing such problems at the early stages of preparing for major repairs. The obtained results of our practical survey were taken into account developing contractor activity plans, on the basis of which the research had been conducted. By developing the study, it will be possible to supplement the number of factors influencing the organizational and technological level of major repairs, as well as identify a range of other characteristics of these determinants and systematize the lists of factors and characteristics.

KEYWORDS: major repairs, problem, organizational and technological level, expert assessment, factor, characteristic, analysis

The article was submitted 04.12.2024; approved after reviewing 04.02.2025; accepted for publication 24.02.2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Mailyan L.D., Sizen N.O. Organizational and technological level of major repairs of buildings and structures. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (1): 136-147. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-136-147>

ВВЕДЕНИЕ

Проведение капитального ремонта – одно из главных мероприятий для достижения целей длительного сохранения и нормальной эксплуатации зданий и сооружений. Пользователи коммерческой и жилой недвижимости желают удовлетворения всех потребностей, связанных с работой и отдыхом в занимаемых ими помещениях.

Капитальный ремонт, по сути, «младший брат» строительства, восстанавливающий утраченные со временем облик и все функции зданий и сооружений, которые они должны выполнять в соответствии с воплощёнными строителями в жизнь проектными решениями. Поэтому при проведении капитального ремонта в основном встречаются те же проблемы, что и при строительстве, а именно: решение дилеммы цена-качество применяемых материалов, контроль качества производимых работ (прежде всего, скрытых работ), организация и технология наружных работ в условиях непогоды или при воздействии отрицательных температур и др. Вместе с тем капитальному ремонту могут быть присущи и проблемы, в ходе строительства не встречающиеся. Например, при проведении капитального ремонта зданий и сооружений, являющихся объектами культурного наследия, памятниками архитектуры, возникают проблемы, характерные для другого «родственника» строительства – реставрации.

В 20-е годы XXI в. тема капитального ремонта недвижимости стала весьма популярной у авторов научных публикаций. Во множестве современных исследований поднимаются вопросы, связанные с правовыми проблемами организации капитального ремонта зданий [1, 2, 3, 4, 5]. Привлекает внимание авторов проблематика в области ремонта

сооружений нефтегазового комплекса [6, 7, 8, 9], автодорожных сооружений [10, 11, 12] и повышения энергоэффективности зданий при их капитальном ремонте [13, 14]. Вопросам организации и технологии при капитальном ремонте посвящено также много публикаций последних лет [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]. Например, календарное и оперативное планирование капитального ремонта исследовали Р.М. Ершов, Д.В. Топчий, О.А. Король, С.И. Меркулов, Н.И. Трухина, Е.М. Хамракулов и др. [16, 17, 20, 23, 24]. Анализ строительных потоков проводили Е.В. Литвинов, Е.В. Маликов, В.К. Нефедова, А.А. Пастухов, А.А. Руденко и др. [18, 19, 21]. Технологию применения различных материалов разрабатывали М.С. Гусарова, О.А. Король, Е.Д. Михайлова, С.А. Стельмах и др. [12, 15, 21]. Однако ни в одной из указанных работ не поднимался вопрос оценки организационно-технологического уровня капитального ремонта.

Нами на базе ростовских организаций, занятых производством работ по капитальному ремонту, а также на базе ряда заказчиков капитального ремонта, было проведено исследование проблематики в области технологии и организации капитального ремонта и анализа подготовленности подрядчиков к осуществлению капитального ремонта. По результатам анализа этой подготовленности, которую можно назвать уровнем капитального ремонта, сформулированы рекомендации по преодолению проблем капитального ремонта и, соответственно, повышению его уровня.

Целью проведённого исследования является разработка модели определения организационно-технологического уровня капитального ремонта (ОТУКР). В силу чего мы поставили перед собой следующие задачи:

1) выявить проблемы в области организации и технологии проведения капитального ремонта;

2) выявить факторы, влияющие на ОТУКР;

3) выработать модель (формулу) определения ОТУКР;

4) сформулировать предложения по повышению ОТУКР.

Объектом данного исследования являются работы по капитальному ремонту зданий и сооружений.

Предмет исследования – факторы, влияющие на производство работ по капитальному ремонту зданий и сооружений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе исследования мы использовали теорию многочисленных начал, метод экспертных оценок и математическую статистику. Для проведения необходимых экспериментов и анализа их результатов применялась производственная база Донского государственного технического университета, а также данные ряда заказчиков работ по капитальному ремонту. Представители этих заказчиков, прежде всего, привлекались в качестве экспертов, оценивающих организационно-технологический уровень подрядчиков, производящих работы по капитальному ремонту.

При проведении капитальных ремонтов как заказчики ремонта, так и подрядчики сталкиваются с множеством проблем. Это, прежде всего, общие материальные проблемы: отсутствие необходимых материалов, повышение цен на необходимые материалы; отсутствие нужной техники или запасных частей к используемой технике, рост цен на запасные части и саму технику. Кроме того, это уже упомянутые нами правовые проблемы капитального ремонта [1, 2, 3, 4, 5]. Остановимся подробнее на проблемах организации и технологии капитального ремонта зданий и сооружений.

Такие проблемы можно условно разделить на несколько групп. Это, прежде всего, общая проблематика организации капитальных ремонтов, связанная с производством работ в стеснённых условиях. При ремонте административных зданий возникает проблема календарного планирования: как проводить ремонт в условиях продолжающейся работы персонала? Это требует «расселения» людей, работающих в ремонтируемом здании, в помещения, поначалу не охваченные ремонтными работами, а потом «переселения» их обратно вместе с иными работниками в помещения, в которые «приходит» ремонт. Затем можно вы-

делять проблемы документационного обеспечения ремонтов у организаций государственной (муниципальной) формой собственности. Кроме того, отдельную группу проблем может составить отсутствие взаимопонимания и плохое взаимодействие между разными субъектами процесса капитального ремонта, возникающие из-за вольной трактовки некоторых положений законодательства отдельными участниками отношений, связанных с проведением ремонтов зданий и сооружений.

Проблемы организации строительных работ, в т. ч. работ по капитальному ремонту, в стеснённых условиях достаточно хорошо исследованы к настоящему времени [25, 26, 27, 28, 29, 30]. Достаточно исследованы и проблемы календарного планирования [16, 20, 24]. Технологические проблемы капитального ремонта также изучены на высоком уровне [15, 18, 19, 31]. Другие группы проблем требуют пояснения.

Проблемы документационного обеспечения ремонтов у организаций государственной (муниципальной) формой собственности можно выделить следующие. Одну из таких проблем можно рассмотреть от противного. Например, когда заказчиком ремонтных работ является физическое лицо или организация частной формы собственности, то отношения между заказчиком и подрядчиком определяются только договором, одним из приложений к которому является расчёт стоимости ремонтных работ. Даже если капитальные работы проводятся в рамках финансирования Фондом капитального ремонта (ФКР) работ по ремонту многоквартирных жилых домов, где коллективным заказчиком являются собственники квартир и других помещений здания, требования к смете, определяющей стоимость ремонта, не относительно строгие. Главное, чтобы перечень работ устраивал собственников помещения дома, и чтобы стоимость ремонта не превышала лимит, определённый ФКР.

Если же заказчиком капитального ремонта является государственная или муниципальная организация, то к проектно-сметной документации на проведение ремонта предъявляются высокие требования. В этом случае все необходимые сметы должны быть разработаны в строгом соответствии с действующим на момент оформления договора на ремонт сметным законодательством. А разработка смет требует привлечения отдельных специалистов и специальных программ для ЭВМ, но специалистов-сметчиков может не быть в штате заказчика, да и программы для ЭВМ стоят

недешево. Поэтому, как правило, на стадии подготовки проектно-сметной документации на проведение ремонта приходится прибегать к услугам дополнительных подрядчиков – разработчиков сметной документации.

Проблемой является, например, идентификация вида ремонта. Для многих бюджетных организаций, или для унитарных предприятий, или даже для акционерных обществ, но для таких, которые имеют большую государственную долю в уставном капитале, важно подстроить ремонт помещений своих зданий под вид выделяемых средств. Вышестоящая организация, как правило, определяет статьи расходов своих дочерних или подчинённых им организаций заранее. В результате реальная потребность организации в ремонте может не совпадать с наименованием статьи выделенных средств. Организации нужно провести текущий ремонт помещения, а для освоения доступны только средства на капитальный ремонт.

Из такой ситуации выходят довольно просто, обозначая текущий ремонт капитальным, или наоборот. Дело в том, что законодательство позволяет довольно широко трактовать виды отдельных работ. Если исходить из общепринятого отличия капитального ремонта здания от текущего, то капитальный идентифицируется имеющейся в составе работ заменой конструктивных элементов, например, двери или окна. Но при желании можно объявить конструктивным элементом радиатор или сплит-систему, хотя на самом деле они относятся к оборудованию здания, а не к его конструктивным элементам. И наоборот, замену двери, окна или межкомнатной перегородки можно представить элементом текущего ремонта, объяснив это тем, что они не являются несущими конструкциями. Проверяющие (ревизоры) вышестоящих органов потом оставляют такие вольные трактовки без внимания, т. к. понимают необходимость решения проблемы соответствия вида ремонта наличию выделенных средств по определённой статье.

Вольная трактовка отдельных положений законодательства некоторыми участниками отношений сферы капитального ремонта зданий и сооружений тесно связана со второй группой проблем, но её следует всё-таки выделить, т.к. такая проблема может затрагивать не только государственный и муниципальный сектор. Это проявляется, например, в следующем: ресурсный метод требует проведения конъюнктурного анализа цен на материалы и оборудование, расценки на которые отсутствуют в сметно-нормативных базах.

Бывают случаи, когда подрядчик (исполнитель) – разработчик сметной документации ссылается на п. 14 приказа от 4 августа 2020 г. № 421 «Об утверждении методики определения сметной стоимости строительства, реконструкции, капитального ремонта, сноса объектов капитального строительства, работ по сохранению объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации на территории Российской Федерации» (в ред. приказа Минстроя России от 07.07.2022 № 557/пр) и требует от заказчика предоставления таблиц конъюнктурного анализа цен на материалы с приложением прайс-листов от поставщиков и/или коммерческих предложений от производителей, хотя логично, что исполнитель должен сам искать предложения цен на материалы в сети интернет и делать конъюнктурный анализ этих цен. Подобные случаи встречались и раньше [24], однако участились в переходный период от составления смет базисно-индексным методом к обязательной их разработке ресурсным методом. Действительно, п. 14 указанного приказа гласит: «Для проведения конъюнктурного анализа используется информация из открытых и (или) официальных источников о текущих ценах (в частности, печатные издания, информационно-телекоммуникационная сеть Интернет), подтверждаемая обосновывающими документами, подписанными производителями и (или) поставщиками соответствующих материальных ресурсов и оборудования (работ, услуг) и (или) заверенными подписями уполномоченного лица производителей и (или) поставщиков, при использовании обосновывающих документов из открытых источников – подписанные уполномоченным лицом заказчика». Но данное положение относится к предоставлению сметной и другой проектной документации заказчиком подрядчику перед началом выполнения ремонтных работ, но никак не разработчику сметной документации на этапе подготовки проектно-сметной документации. Хотя действия последнего вполне объяснимы желанием повысить цену на разработку сметы на стоимость проведения вышеупомянутого конъюнктурного анализа. Исполнитель (разработчик) сметной документации соглашается провести поиск и анализ коммерческих предложений после увеличения договорной цены на её разработку.

Организационно-технологические проблемы капитального ремонта собраны в таблице 1.

Таблица 1

Организационно-технологические проблемы капитального ремонта зданий и сооружений
Источник: составлено авторами.

Table 1

Organizational and technological problems of major repairs of buildings and structures
Source: compiled by the authors.

Технологи- ческие	Определение видов работ Технология применения новых материалов Придание новых свойств (повышение энергоэффективности и др.)		
Организа- ционные	Отсутствие единого управляющего субъекта	Высокие требования к документации	Идентификация вида ремонта. Необходимость разработки сметы по жестким правилам. Большое количество отчетных документов
		Плохая координация между субъектами	Недостаточная компетентность субъектов отношений. Вольная трактовка некоторых положений законодательства отдельными субъектами
	Производство работ в стесненных условиях	Отсутствие достаточного пространства для полного удовлетворения бытовых потребностей рабочих. Необходимость обеспечения беспрепятственного прохода и проезда пользователей ремонтируемой и соседней недвижимости. Стесненные условия для подъезда транспорта подрядчика	
	Специфика календарного планирования	Продолжающаяся при проведении ремонта эксплуатация здания. Специфика формирования строительных потоков. Особая логистика транспорта, подвозящего материалы и оборудование, в связи с затрудненным движением в оживленных районах и отсутствием пространства для складирования материалов	

Для того чтобы установить, насколько успешно интересующий нас субъект справляется с решением проблем в области организации капитального ремонта зданий и сооружений мы предлагаем определять организационно-технологический уровень капитального ремонта (ОТУКР).

Уровень организации капитального ремонта целесообразно определить тремя характеристиками – качество, скорость выполнения, цена. При высоких двух первых показателях и наиболее низком третьем можно сказать, что ОТУКР наиболее высокий.

В качестве факторов ОТУКР, обеспечивающих высокое качество ремонтных работ, можно принять следующие:

- применение современных материалов;
- наличие положительных характеристик по качественному выполнению ремонтных работ на других объектах;
- внедрение новых технических средств в производство работ;
- применение прогрессивных технологий;
- соблюдение организационной и технологической дисциплины.

Этот перечень можно продолжить. Более подробно факторы качества (не только в области организации и технологии, но и с учётом материальных показателей) мы разобрали в другой работе [32].

Перечень факторов, влияющих на сроки выполнения работ, не так обширен, но и не столь краток, как может показаться на первый взгляд. Это, например:

- высокий уровень организации труда ремонтных бригад (использование поточного метода и т. д.);
- внедрение техники и технологий, сокращающих сроки производства ремонтных работ;
- высокий уровень логистики, позволяющий доставлять необходимые материалы на объект в точно установленное время, даже в условиях загруженности подъездных путей;
- способность решать внешние проблемы, в т. ч. с органами власти (например, описанные выше проблемы в области документации, а также вопросы разрешения на работу как специалистам физическим лицам (к примеру, иностранцам), так и организации в це-

лом). Опыт ковидных ограничений апреля-мая 2020 г. показал, что когда более половины ростовских ремонтных подрядчиков находились в вынужденном простое, другие ремонтные организации продолжали выполнение работ на вполне легальных основаниях.

Ценовые характеристики выполнения ремонтных работ также во многом зависят от организационно-технологического уровня (в т. ч. стратегии управления) подрядчика, а не только от внешних обстоятельств. Здесь опять же можно назвать такие факторы, как высокий уровень организации труда и применение технологий, сокращающих сроки выполнения работ. Чем короче длительность совокупности необходимых процессов, тем ниже их себестоимость, т. к. снижается доля зарплаты специалистов-повременщиков, становятся меньше траты на аренду техники и др. Кроме того, понимание глобальных процессов позволяет закупить материалы и технику заранее, до повышения на них цен, и использовать их в производстве ремонтных работ на новых объектах.

Чтобы определить наиболее точное (общее) значение ОТУКР, нужно учитывать не только весомость показателей факторов, но и значения характеристик этих факторов, а также весомости показателей данных характеристик.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам проведённых нами исследований мы решили предложить следующую формулу определения организационно-технологического уровня капитального ремонта:

$$Y_o = \sum_{j=1}^m \beta_j \sum_{i=1}^n Y_i \alpha_i, \quad (13)$$

где Y_i – значение i -го показателя характеристик фактора ОТУКР;

α_i – коэффициент весомости i -го показателя характеристик фактора ОТУКР;

β_j – коэффициент весомости j -го показателя фактора ОТУКР;

m – число показателей фактора ОТУКР;

n – число показателей характеристик факторов ОТУКР.

При определении значений факторов ОТУКР и их характеристик в ходе нашего исследования мы применяли метод экспертных оценок. Для исследования были взяты следующие организации, занимающиеся капитальным ремонтом: Ремонт-на-Дону, АртСтрой, АльфаТехСтрой, Кит-Строй, Трендстрой. Эксперты оценили факторы, воздействующие на ОТУКР, по шкале от 0 до 1. Результаты сведены в таблицу 2.

Таблица 2
Значения факторов, влияющих на организационно-технологический уровень капитального ремонта исследуемых организаций Ростова-на-Дону
Источник: составлено авторами.

Table 2
The values of factors influencing the organizational and technological level of major repairs of organizations studied in Rostov-on-Don
Source: compiled by the authors.

Фактор Организация	Уровень организации труда	Внедрение новых техники и технологий	Уровень логистики	Применение современных материалов	Уровень производственной дисциплины	Способность решать проблемы	Итоговое значение ОТУКР
Ремонт-на-Дону	1	1	0,8	0,76	0,74	0,84	5,14
АртСтрой	1	0,6	0,87	0,68	0,9	1	5,05
АльфаТехСтрой	0,7	1	1	0,7	0,7	0,8	4,9
Кит-Строй	0,66	0,68	0,6	0,71	0,93	0,65	4,23
Трендстрой	0,69	0,52	0,53	0,63	1	0,75	4,12

Таблица 3
Соответствие характеристик факторам
Источник: составлено авторами.

Table 3
The correspondence of characteristics to the factors
Source: compiled by the authors.

Фактор Характеристика	Уровень организа- ции труда	Внедре- ние новой техники	Внедрение новых технологий	Уровень логистики	Примене- ние современ- ных материа- лов	Техноло- гическая дисципли- на	Организа- ционная дисципли- на	Способ- ность решать пробле- мы
Цена	-	+	+	-	+	-	-	-
Наличие специалистов	+	+	+	+	+	+	+	+
Наличие связей	-	-	+	+	+	-	-	+
Наличие предложений	-	+	+	-	+	-	-	-
Опыт на рынке	+	-	+	+	-	+	+	+
Брак в работе	+	+	+	+	+	+	+	-
Наличие внутренних регламентов	+	-	-	+	-	+	+	-

По итогам анализа ОТУКР организациям были даны рекомендации:

1. Для Ремонт-на-Дону – улучшить организационную и технологическую дисциплину.
2. Для АртСтрой – приобрести новую технику и новые технологии.
3. Для АльфаТехСтрой – улучшить организационную и технологическую дисциплину, поднять уровень организации труда, использовать более современные материалы.
4. Для Кит-Строй – приобрести новую технику и новые технологии, улучшить логику доставки материалов и оборудования.
5. Для Трендстрой – приобрести новую технику и новые технологии, улучшить логику доставки материалов и оборудования.

Примеры характеристик, которые могут оказывать влияние на факторы ОТУКР, приведены в таблице 3. Знаком «+» отмечены характеристики, влияющие на соответствующий фактор, а знаком «-» – характеристики, не оказывающие влияние на фактор.

В целом для определения организационно-технологического уровня капитального ремонта можно использовать следующий алгоритм:

1. Выявить факторы, влияющие на ОТУКР рассматриваемой организации.

2. Выявить характеристики, влияющие на соответствующие факторы.

3. Рассчитать значения характеристик факторов ОТУКР.

4. Рассчитать значения (весомости) факторов ОТУКР.

5. Выяснить, все ли характеристики рассмотрены.

6. Выяснить, все ли факторы рассмотрены.

7. Рассчитать общий показатель ОТУКР.

8. Рассчитать степень влияния факторов ОТУКР на показатели деятельности подрядчика.

9. Ранжировать факторы ОТУКР на результаты деятельности подрядчика.

10. Провести анализ результатов.

11. Разработать мероприятия по повышению уровня капитального ремонта.

В ходе анализа результатов (п. 10) следует сравнить полученные результаты с внутренними плановыми показателями организации и показателями в среднем по соответствующей отрасли (в данном случае – с другими подрядными организациями, занятыми производством ремонтных работ). В итоге определим собственно организационно-технологический уровень капитального ремонта (ОТУКР).

В ходе разработки мероприятий (п. 11) следует составить план повышения ОТУКР. Например: сократить лишние издержки; улучшить организацию труда и производства, технологическую дисциплину; приобрести современное оборудование; применить новые технологии и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге проведённого исследования мы достигли следующих результатов:

- 1) систематизировали организационно-технологические проблемы капитального ремонта;
- 2) определили факторы, влияющие на ОТУКР;
- 3) предложили модель определения ОТУКР;
- 4) определили характеристики факторов, влияющих на ОТУКР;
- 5) выработали модель (формулу) определения ОТУКР;
- 6) предложили алгоритм определения общего ОТУКР;
- 7) экспертным путём на практическом примере вывели весомости факторов, влияющих на ОТУКР;
- 8) дали предложения по повышению ОТУКР.

Научная новизна нашего исследования состоит в предложенной методике определения организационно-технологического уровня капитального ремонта (ОТУКР).

Практическая ценность работы для заказчиков капитального ремонта заключается в том, что, применяя предложенную методику, они могут выбрать подрядчика с более высоким уровнем (ОТУКР), а подрядчики могут повысить свой уровень, используя нашу методику. Выявление и систематизация нами проблем организации капитального ремонта могут помочь всем участникам отношений в области капитального ремонта в плане нейтрализации подобных проблем на ранних этапах подготовки капитального ремонта.

Полученные результаты нашего практического исследования прошли внедрение. Они учтены при разработке планов деятельности подрядчиков, на базе которых проводилось исследование. Кроме того, они проходят апробацию в Донском государственном техническом университете при выборе подрядчика для капитального ремонта помещений.

Развивая исследование, можно будет дополнить перечень факторов, влияющих на организационно-технологический уровень ка-

питального ремонта, а также выявить ещё ряд характеристик этих факторов и систематизировать перечни факторов и характеристик.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Байрашев В.Р. Об особенностях закупки капитального ремонта автономным учреждением // Госзаказ: управление, размещение, обеспечение. 2021. № 66. С. 74–78. EDN: DYTKIM
2. Картавов С.А., Сидоров Ю.В. Капитальный ремонт многоквартирных домов: особенности полномочий по установлению видов работ // Законы России: опыт, анализ, практика. 2021. № 1. С. 92–97. EDN: PUGWKM
3. Павлова А.Ю. Современное правовое регулирование капитального ремонта общего имущества многоквартирных домов // Наука через призму времени. 2024. № 8 (89). С. 5–7. EDN: MRINBV
4. Санникова Е.С. К вопросу о правах и обязанностях плательщиков взносов на капитальный ремонт и фондов капитального ремонта // Право и общество. 2024. № 1 (14). С. 57–59. EDN: OGCJNG
5. Суслова С.И. Передача обязанности по оплате взносов на капитальный ремонт многоквартирных домов // Вестник Московского университета им. С.Ю. Витте. Серия 2: Юридические науки. 2024. № 1 (41). С. 26–31. DOI: 10.21777/2587-9472-2024-1-26-31
6. Алексеев А.О., Афанасьев В.Я., Байкова О.В., Большакова О.И., Воробьева Е.С. Регрессионная модель оценки стоимости затрат на капитальный ремонт скважин // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2022. № 3 (207). С. 34–37. DOI: 10.33285/1999-6942-2022-3(207)-34-37
7. Зименков С.В., Сабитов Л.Н., Таргоний С.Н. Модернизация действующих подъемных агрегатов и оборудования для проведения текущего и капитального ремонта скважин // ПРОнефть. Профессионально о нефти. 2022. Т. 7, № 1 (23). С. 134–139. DOI: 10.51890/2587-7399-2022-7-1-134-139
8. Пахлян И.А. Повышение эффективности строительства и капитального ремонта скважин за счет совершенствования струйных технологий и технических средств // Нефтяное хозяйство. 2024. № 10. С. 64–68. DOI: 10.24887/0028-2448-2024-10-64-68
9. Gardok N., Ponomareva Ye., Ponomareva M. Optimizing a complex of geophysical surveys in the course of well workover at the karazhanbas deposit // Труды университета. 2023. № 4 (93). С. 144–150. DOI: 10.52209/1609-1825_2023_4_144
10. Морева Е.С., Кудрявцев А.Н. Техничко-экономическое обоснование гарантийных сроков службы покрытий и оснований при капитальном ремонте и ремонте дорожных одежд // Транспортное дело России. 2024. № 6. С. 194–198. EDN: AEWAFY
11. Филиппова С.В., Романов И.Б. Особенности капитального ремонта автомобильной дороги в Самарской области // Тенденции развития науки и образования. 2024. № 111-9. С. 197–200. DOI: 10.18411/trnio-07-2024-540

12. Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Mailyan L.R., Meskhi B.C., El'shaeva D., Varavka V. Developing environmentally sustainable and cost-effective geopolymer concrete with improved characteristics // *Sustainability*. 2021. Vol. 13(24). DOI: 10.3390/su132413607
13. Король О.А., Плотноков А.Д. Резервы повышения энергоэффективности многоквартирных домов при капитальном ремонте // *Строительство и архитектура*. 2021. Т. 9, № 1. С. 31–35. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-1-31-35
14. Mishchenko V.Ya., Gorbaneva E.P., Ovchinnikova E.V. The "rebound effect" of energy efficient actions to be performed as part of a major renovation of apartment buildings // *Real Estate: Economics, Management*. 2021. № 1. pp. 44–48. DOI: 10.22337/2073-8412-2021-1-44-48
15. Гусарова М.С., Михайлова Е.Д. Сравнительный анализ покрытий полов при капитальном ремонте производственных зданий // *Аллея науки*. 2023. Т. 1, № 4 (79). С. 375–380. EDN: YWJNVU
16. Ершов Р.М., Топчий Д.В. Оперативное планирование капитального ремонта и реконструкции общественных зданий на основе нечетких ситуационных сетей // *Строительное производство*. 2021. № 4. С. 70–78. DOI: 10.54950/26585340_2021_4_11_70
17. Король О.А., Дехтярь Е.В., Петров А.А. Совершенствование календарного планирования капитального ремонта зданий с учетом прогноза потребления и пролонгации срока службы теплоизоляционных материалов // *Строительство и архитектура*. 2022. Т. 10, № 4. С. 46–50. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-10-4-46-50
18. Литвинов Е.В., Руденко А.А. Капитальный ремонт многоквартирных жилых домов и основные виды работ по его проведению // *Интернаука*. 2021. № 17-1 (193). С. 22–24. EDN: RBKVCK
19. Маликов Е.В., Пастухов А.А., Воробьев Д.О., Чупашев С.В. Сравнительный анализ существующих технологических процессов ремонта ВВСТ при организации капитального ремонта // *Интернаука*. 2023. № 19-4 (289). С. 53–55. EDN: EWDDAU
20. Меркулов С.И., Есипов С.М., Голиков Г.Г. О формировании методики оптимизации планирования капитального ремонта жилых зданий на этапах эксплуатации и ремонта // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2023. № 5. С. 62–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-5-62-70
21. Нефедова В.К. Формирование и расчет комплексных потоков при капитальном ремонте гостиниц // *Инженерный вестник Дона*. 2023. № 7. Режим доступа: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8546> (дата обращения: 26.11.2024). EDN: KWFHEU
22. Спицына И.Н., Прудников А.А., Северова М.О. Инженерно-экономический мониторинг процесса организации капитального ремонта пути в режиме «оконных» технологий // *Финансовый менеджмент*. 2024. № 9. С. 273–282. EDN: KNDQSY
23. Хамракулов Е.М., Абдукаримов Ш.У. Норматив на капитальный и текущий ремонт карьерных автосамосвалов // *Вестник науки*. 2022. Т. 1, № 1 (46). С. 141–146. EDN: IKUJYP
24. Trukhina N.I., Trukhin Yu.G., Vyazov G.B. Scheduling capital repairs of municipal real estate facilities in the context of drafting integrated land development programmes // *Real Estate: Economics, Management*. 2022. № 1. pp. 44–48. DOI: 10.22337/2073-8412-2022-1-44-48
25. Бельчевский Р.О. Классификация стесненных условий, влияющих на выбор организационно-технологических систем по возведению зданий и сооружений // *Экономика строительства*. 2023. № 4. С. 126–130. EDN: FQZXWV
26. Король Е.А., Петросян Р.С. Обеспечение безопасных условий труда при обустройстве бытовых городков капитально ремонтируемых зданий // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17, № 8. С. 1046–1053. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.8.1046-1053
27. Манжилевская С.Е. Планирование и реализация строительных работ при точечной застройке для определения удельных пылевых выбросов // *Строительство и техногенная безопасность*. 2024. № 32 (84). С. 75–84. DOI: 10.29039/2413-1873-2024-32-75-84
28. Сапрыкина Т.К. Особенности разработки строительных генеральных планов в условиях стесненной строительной площадки // *Вестник евразийской науки*. 2024. Т. 16, № 1. EDN: DANGLM
29. Чебанова С.А., Растяпина О.А., Гончар Т.С., Карпов А.А. Повышение эффективности строительных работ в стесненных городских условиях // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2022. № 3 (88). С. 186–191. EDN: VFIXAS
30. Шеина С.Г., Батаев Д.К.-С., Батаева П.Д., Батаева Х.М. Технические устройства для повышения безопасности работ при подъеме и перемещении грузов в стесненных условиях // *Вестник КНИИ РАН. Серия: Естественные и технические науки*. 2022. № 2 (10). С. 45–56. DOI: 10.34824/VKNIIRAN.2022.10.2.006
31. Fayed S., Madenci E., Özkiliç Y.O., Zakaria, M.H. Improving Bond Performance of Near-Surface Mounted Steel Ribbed and Threaded Rods in the Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2024; 18(1), 3. DOI: 10.1186/s40069-023-00643-y
32. Маилян Л.Д., Сизен Н.О. Оценка показателей качества в строительстве // *Вестник СибАДИ*. 2024. Т. 21, № 3. С. 464–474. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-464-474>

REFERENCES

1. Bajrashev V.R. On the specifics of purchasing capital repairs by an autonomous institution. *Goskazak: upravlenie, razmeshchenie, obespechenie*. 2021; 66: 74–78. EDN: DYTkim (In Russ.)
2. Kartavov S.A., Sidorov Yu.V. Major repairs of apartment buildings: features of powers to establish

types of work. *Zakony Rossii: opyt, analiz, praktika*. 2021; 1: 92–97. EDN: PUGWKM (In Russ.)

3. Pavlova A.Yu. Modern legal regulation of major repairs of common property of apartment buildings. *Nauka cherez prizmu vremeni*. 2024; 8 (89): 5–7. EDN: MRINBV (In Russ.)

4. Sannikova E.S. On the issue of the rights and obligations of payers of contributions for capital repairs and capital repair funds. *Law and Society*. 2024; 1 (14): 57–59. EDN: OGCJNG (In Russ.)

5. Suslova S.I. Transfer of the responsibility to pay contributions for capital repairs of apartment buildings. *Journal of Legal Sciences*. 2024. № 1 (41). S. 26–31. DOI: 10.21777/2587-9472-2024-1-26-31 (In Russ.)

6. Alekseev A.O., Afanas'ev V.Ya., Bajkova O.V., Bol'shakova O.I., Vorob'eva E.S. Regression model for estimating the cost of well overhaul. *Problems of economics and management of oil and gas complex*. 2022; 3 (207): 34–37. DOI: 10.33285/1999-6942-2022-3(207)-34-37 (In Russ.)

7. Zimenkov S.V., Sabitov L.N., Targoni S.N. Upgrading of existing lifting units and equipment for current and workover of wells. *PROneft. Professionally about Oil*. 2022; 7(1): 134–139. (In Russ.) <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2022-7-1-134-139>

8. Pahlyan I.A. Improving the efficiency of well construction and overhaul by improving jet technologies and technical means. *Oil Industry Journal*. 2024; 10: 64–68. DOI: 10.24887/0028-2448-2024-10-64-68 (In Russ.)

9. Gardok N., Ponomareva Ye., Ponomareva M. Optimizing a complex of geophysical surveys in the course of well workover at the karazhanbas deposit. *Trudy universiteta*. 2023; 4 (93): 144–150. DOI: 10.52209/1609-1825_2023_4_144

10. Moreva E.S., Kudryavcev A.N. Feasibility study of warranty periods for the service life of coatings and bases during major repairs and repairs of road surfaces. *Transport business of Russia*. 2024; 6: 194–198. EDN: AEWAFY (In Russ.)

11. Filippova S.V., Romanov I.B. Features of major repairs of the road in the Samara region. *Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2024; 111-9: 197–200. DOI: 10.18411/trnio-07-2024-540 (In Russ.)

12. Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Mailyan L.R., Meskhi B.C., El'shaeva D., Varavka V. Developing environmentally sustainable and cost-effective geopolymer concrete with improved characteristics. *Sustainability*. 2021; Vol. 13(24). DOI: 10.3390/su132413607

13. Korol' O.A., Plotnikov A.D. Creasing energy efficiency of apartment buildings during a capital repair. *Construction and architecture*. 2021; T. 9. no 1: 31–35. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-1-31-35 (In Russ.)

14. Mishchenko V.Ya., Gorbaneva E.P., Ovchinnikova E.V. Reserves for increasing energy efficiency of apartment buildings during major repairs. *Real Estate: Economics, Management*. 2021; 1: 44–48. DOI: 10.22337/2073-8412-2021-1-44-48

15. Gusarova M.S., Mihajlova E.D. Comparative analysis of floor coverings during major repairs of industrial buildings. *Alley-science*. 2023; T. 1. no 4 (79): 375–380. EDN: YWJNVU (In Russ.)

16. Ershov R.M., Topchij D.V. Econstruction of public buildings based on fuzzy situational networks. *Construction production*. 2021; 4: 70–78. DOI: 10.54950/26585340_2021_4_11_70 (In Russ.)

17. Korol' O.A., Dekhtyar' E.V., Petrov A.A. Improving the calendar planning of capital repairs of buildings, taking into account the forecast of consumption and prolongation of the service life of thermal insulation materials. *Construction and architecture*. 2022; T. 10. no 4: 46–50. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-10-4-46-50 (In Russ.)

18. Litvinov E.V., Rudenko A.A. Major repairs of apartment buildings and the main types of work involved in its implementation. *Internauka*. 2021; 17-1 (193): 22–24. EDN: RBKVCK (In Russ.)

19. Malikov E.V., Pastuhov A.A., Vorob'yov D.O., Chupashev S.V. Comparative analysis of existing technological processes for repair of military equipment during major repairs. *Internauka*. 2023; 19-4 (289): 53–55. EDN: EWDDAU (In Russ.)

20. Serykh I.R., Chernyshova E.V., Degtyar A.N., Masyagina N.I., Serykh V.D. Reasons of damage to residential balcony slabs. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024; 2: 16–23. (In Russ.) DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-2-16-23

21. Nefedova V.K. Organization of complex flows at capital repair of hotels. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2023; 7. URL: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8546> (accessed: 26.11.2024). EDN: KWFHEU (In Russ.)

22. Spicya I.N., Prudnikov A.A., Severova M.O. Engineering and economic monitoring of the process of organizing major track repairs in the “window” technology mode. *Financial Management*. 2024; 9: 273–282. EDN: KNDQSY (In Russ.)

23. Hamrakulov E.M., Abdurkarimov Sh.U. Standards for major and current repairs of quarry dump trucks. *Vestnik nauki*. 2022; T. 1. No 1 (46): 141–146. EDN: IKUJYP (In Russ.)

24. Trukhina N.I., Trukhin Yu.G., Vyazov G.B. Scheduling capital repairs of municipal real estate facilities in the context of drafting integrated land development programmes. *Real Estate: Economics, Management*. 2022; 1: 44–48. DOI: 10.22337/2073-8412-2022-1-44-48

25. Bel'chevskij R.O. Classification of constrained conditions influencing the choice of organizational and technological systems for the construction of buildings and structures. *Construction economy*. 2023; 4: 126–130. EDN: FQZXWV (In Russ.)

26. Korol E.A., Petrosyan R.S. Ensuring safe working conditions in the arrangement of household towns of overhauled buildings. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(8): 1046–1053. (In Russ.) DOI: 10.22227/1997-0935.2022.8.1046-1053

27. Manzhilevskaya S.E. Planning and implementation of construction work in spot development to determine specific dust emissions. *Construction and industrial safety*. 2024; 32 (84): 75–84. (In Russ.) DOI: 10.29039/2413-1873-2024-32-75-84

28. Saprykina T.K. Features of development of construction master plans in conditions of a cramped construction site. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024. T. 16. № 1. EDN: DAHGLM (In Russ.)

29. Chebanova S.A., Rastyapina O.A., Gonchar T.S., Karpov A.A. Improving the efficiency of construction work in cramped urban conditions. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*. 2022; 3 (88): 186–191. EDN: VFIXAS (In Russ.)

30. Sheina S.G., Bataev D.K.S., Bataeva P.D., Bataeva H.M. Technical devices to improve safety when lifting and moving loads in confined spaces. *Vestnik KNII RAN. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2022; 2 (10): 45–56. (In Russ.) DOI: 10.34824/VKNIIRAN.2022.10.2.006

31. Fayed S., Madenci E., Özkiliç Y.O., Zakaria, M.H. Improving Bond Performance of Near-Surface Mounted Steel Ribbed and Threaded Rods in the Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2024; 18(1), 3. DOI: 10.1186/s40069-023-00643-y

32. Mailyan L.D., Sizen N.O. Assessment of quality indicators in construction. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(3): 464–474. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-464-474>. EDN: BKBYOI

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Майлян Л.Д. Формулирование темы, цели и задач исследования. Анализ разработанности темы другими исследователями. Руководство процессом проведения исследования. Выбор методов исследования. Подведение итогов исследования, выявление его результатов. Редактирование текста статьи.

Сизен Н.О. Сбор материалов и применение методов исследования. Сбор экспертной группы. Обработка полученных данных и представление их в виде таблиц. Подготовка текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Mailyan L.D. Formulating the theme, purpose and objectives of the study. Analyzing of the topic's development by other authors. Managing of the investigation process. Selecting the research methods. Summarizing and identifying the research results. Editing the text of the article.

Sizen N.O. Collecting materials and applying the research methods. Assembling of the expert group. Processing the obtained data and presenting it in the form of tables. Preparing the text of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Майлян Лиля Дмитриевна – канд. экон. наук, доц., зав. кафедрой «Организация строительства» Донского государственного технического университета (344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2600-5554>,

SPIN-код: 3286-4625,

e-mail: liya_mailyan@mail.ru

Сизен Николай Олегович – магистрант Донского государственного технического университета (344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0208-8090>,

e-mail: sizen0263@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Liya Dmitrievna Mailyan – Cand. of Sci. (Economic.), Associate Professor, Head of the Department «Organization of Construction» Don State Technical University (1, Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344000).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2600-5554>,

SPIN-code: 3286-4625,

e-mail: liya_mailyan@mail.ru

Nikolay O. Sizen – master student Don State Technical University (Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1, 344000).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0208-8090>,

e-mail: sizen0263@gmail.com

Научная статья
УДК 691.3
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-148-158>
EDN: FWXZVC



КОМПОЗИЦИОННЫЕ ВЯЖУЩИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫВЕТРЕННЫХ КВАРЦИТОПЕСЧАНИКОВ КУРСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ

И.А. Столетова (И.А. Черепанова) ✉, **В.С. Лесовик, Е.В. Фомина**
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия
✉ ответственный автор
irinadiusa@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальные проблемы качества жизни человека принимают глобальный характер и проявляются в деградации окружающей среды и активизации аномальных техногенных и природных процессов. Решение проблемы по созданию комфортных условий жизни человека возможно путем применения новых технологий и подходов; рационального использования минерального сырья с учетом его генезиса. Особо актуально применение горных пород, специально подготовленных геологическими процессами.

Методика исследования. Исследование характеристик сырьевых материалов осуществлялось при помощи растровой микроскопии и рентгенофазового анализа. Определялись также сравнительные показатели кварцитопесчаников, что позволило всесторонне оценить свойства этого сырья.

Результаты. Установлено, что состав и свойства выветренных кварцитопесчаников оказывают существенное влияние на процессы структурирования композиционного вяжущего. Выделяющийся при гидратации клинкерных минералов $\text{Ca}(\text{OH})_2$ взаимодействует с аморфными фазами этой породы с образованием гидросиликатов кальция второй генерации, что приводит к оптимизации структуры цементного камня.

Заключение. Результаты научных исследований говорят об улучшении прочностных характеристик композиционных вяжущих с использованием выветренного кварцитопесчаника во всех случаях по сравнению с вяжущими на невыветренном кварцитопесчанике. Максимальное значение достигается у композиционного вяжущего КВ20 (при расходе наполнителя в количестве 20%) и превышает прочностные показатели цемента на 23% при увеличении удельной поверхности цемента с 500 до 700 м²/кг, при этом происходит уплотнение композита.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: техногенное сырье, отходы производства, безопасность среды, минеральное сырье, отсеб дробления кварцитопесчаника, выветренные кварцитопесчаники, архитектурный бетон, композиционные вяжущие

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. В.С. Лесовик – член редакционного совета журнала «Вестник СиБАДИ». Журнал «Вестник СиБАДИ» не освобождает от рецензирования рукописи ученых вне зависимости от их статуса.

БЛАГОДАРНОСТИ: исследование выполнено за счет гранта РНФ № 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> и Правительства Белгородской области, Соглашение № 3 от 24.03.2022.

Статья поступила в редакцию 11.10.2024; одобрена после рецензирования 27.11.2024; принята к публикации 24.02.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Столетова И.А. (Черепанова И.А.), Лесовик В.С., Фомина Е.В. Композиционные вяжущие с использованием выветренных кварцитопесчаников курской магнитной аномалии // Вестник СиБАДИ. 2025. Т. 22, № 1. С. 148-158. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-148-158>

© Столетова И.А. (Черепанова И.А.), Лесовик В.С., Фомина Е.В., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-148-158>

EDN: FWXZVC

COMPOSITE BINDERS BASED ON WEATHERED QUARTZITE SANDSTONES OF THE KURSK MAGNETIC ANOMALY

Irina A. Stoletova (Irina A. Cherepanova) ✉, Valery S. Lesovik, Ekaterina V. Fomina

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

✉ *corresponding author
irinadiusa@gmail.com*

ABSTRACT

Introduction. Current problems of human life quality are taking on a global character and manifest themselves in environmental degradation and the activation of abnormal man-made and natural processes. The solution to the problem of creating comfortable human living conditions is possible through the use of new technologies and approaches; rational use of mineral raw materials, taking into account their genesis. The use of rocks specially prepared by geological processes is especially relevant.

Results. It has been established that the composition and properties of weathered quartzite sandstones have a significant effect on the structuring processes of the composite binder. $\text{Ca}(\text{OH})_2$, released during hydration of clinker minerals, interacts with amorphous phases of this rock to form calcium hydrosilicates of the second generation, which leads to optimization of the cement stone structure.

Conclusion. The results of scientific research indicate an improvement in the strength characteristics of composite binders based on weathered quartzite sandstone in all cases compared to binders based on unweathered quartzite sandstone. Maximal value is obtained for KV20 composite binder (with filler consumption up to 20 per cent), which is 23 per cent higher than strength characteristics for specific surface area of cement from 500 to 700 m^2/kg , with accompanying compaction of the composite material.

KEYWORDS: man-made raw materials, industrial waste, environmental safety, mineral raw materials, crushing screening quartzite sandstone, weathered quartzite sandstone, architectural concrete, composite binders

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest. Lesovik V.S. is a member of the editorial council 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.

ACKNOWLEDGEMENTS. The research was carried out at the expense of the RNF grant № 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> and the Government of Belgorod region, Agreement №3 from 24.03.2022.

The article was submitted: 11.10.2024; approved after reviewing: 27.11.2024; accepted for publication: 24.02.2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Stoletova I.A. (Cherepanova I.A.), Lesovik V.S., Fomina E.V. Composite binders based on weathered quartzite sandstones of the Kursk Magnetic Anomaly. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (1): 148-158. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-148-158>

© Stoletova I.A. (Cherepanova I.A.), Lesovik V.S., Fomina E.V., 2025



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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Предложены научно-технологические основы получения, проектирования и производства композиционных вяжущих для архитектурных бетонов с использованием подготовленных геологическими процессами минеральных добавок выветренного кварцитопесчаника¹, заключающиеся в управлении процессами структурообразования за счет связывания выделяющегося при гидратации клинкерных минералов гидроксида кальция с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция второй генерации, что обеспечивает уплотнение структуры и упрочнение бетона [1].

ВВЕДЕНИЕ

Основными источниками дестабилизации окружающей среды обитания человека на сегодняшний день являются: нарастание глобальных экологических проблем, деградация природной среды, истощение ресурсного потенциала и неблагоприятное воздействие техногенных факторов. Все это негативно сказывается на жизнедеятельности человека и снижает его иммунитет [2, 3]. Таким образом, проблема среды обитания человека является одной из важнейших задач современного общества². Ее решение возможно за счет применения новых технологий и подходов; комплексного использования горных пород и минералов, подготовленных естественными геологическими процессами с учетом последних научных достижений и инженерных разработок. Наиболее актуально применение минерального сырья с учетом его генезиса и факторов природного формирования [4, 5].

Таким образом, важным инструментом для успешного решения задачи по созданию качественной и комфортной среды обитания для человека становится архитектурный бетон на основе композиционного вяжущего с использованием выветренных кварцитопесчаников [6].

Данные горные породы обладают высокой реакционной способностью по сравнению с породами, незатронутыми процессами выветривания, за счет особенностей генезиса в условиях активно действующих экзогенных

геологических процессов, что приводит к снижению энергоемкости при производстве строительных материалов гидратационного твердения [7].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной статье мы рассматривали геологические процессы как этап технологии производства строительных материалов. Выветренные кварцитопесчаники, в отличие от традиционных, подвержены сложному комплексу механических, физических, химических и биологических процессов, вследствие чего происходит разрушение текстуры и структуры исходных горных пород, а породообразующие минералы испытывают определенные деформации [8].

При выветривании происходит разрушение текстуры и структуры исходных горных пород за счет целого комплекса процессов, в том числе неравномерного нагревания и охлаждения. Различные породообразующие минералы имеют неодинаковые коэффициенты теплового расширения, поэтому при изменении температуры испытывают деформации в различной степени. И в результате длительного воздействия колебаний температуры, а также других факторов (например, замерзания и оттаивания в микротрещинах воды и т.д.) кварцитопесчаники распадаются на отдельные обломки.

На основании предварительных исследований, произведенных путем микроскопического анализа, а также изучения фазовой структуры кварцитопесчаника, были зафиксированы различия в визуальных характеристиках и сформированы сравнительные показатели кварцитопесчаника, которые доказывают, что выветренный кварцитопесчаник значительно отличается по свойствам от традиционных пород кварцитопесчаника, не подверженных процессам выветривания. Поэтому данная порода непригодна для производства щебня [9].

Далее, с учетом вышеизложенных данных, были изучены особенности гранулометрического состава выветренных кварцитопесчаников и свойства композиционных вяжущих на их основе.

¹ Лесовик В.С., Воронцов В.М. Сырьевая база промышленности строительных материалов: учебное пособие. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. 207 с.

² Lesovik V.S., Elistratkin M.Yu., Fomina E.V., Sheremet A.A., Vodopyanova A.A. Composites and the human environment as a continuous process of interaction // Fundamental search and applied research of RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2022-2023. Scientific works of RAASN. In 2 volumes. Moscow, 2024. Publisher: ASV Publishing House. pp. 251–259.

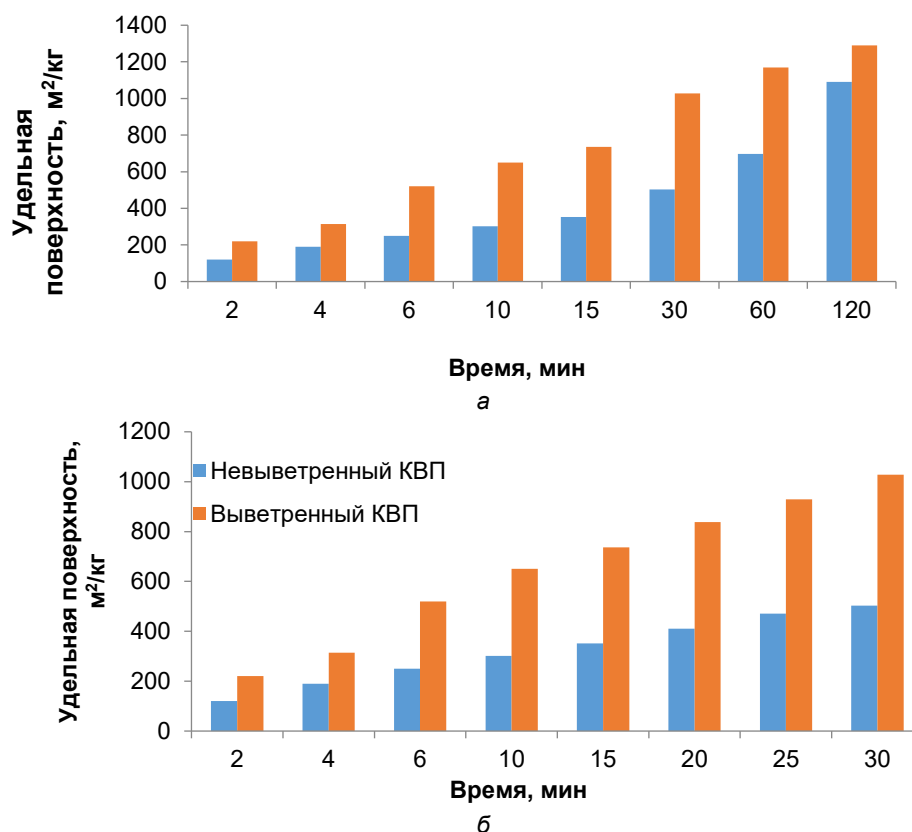


Рисунок 1 – Кинетика помола кварцитопесчаников:
 а – продолжительность помола до 30 мин;
 б – продолжительность помола до 120 мин
 Источник: составлено авторами.

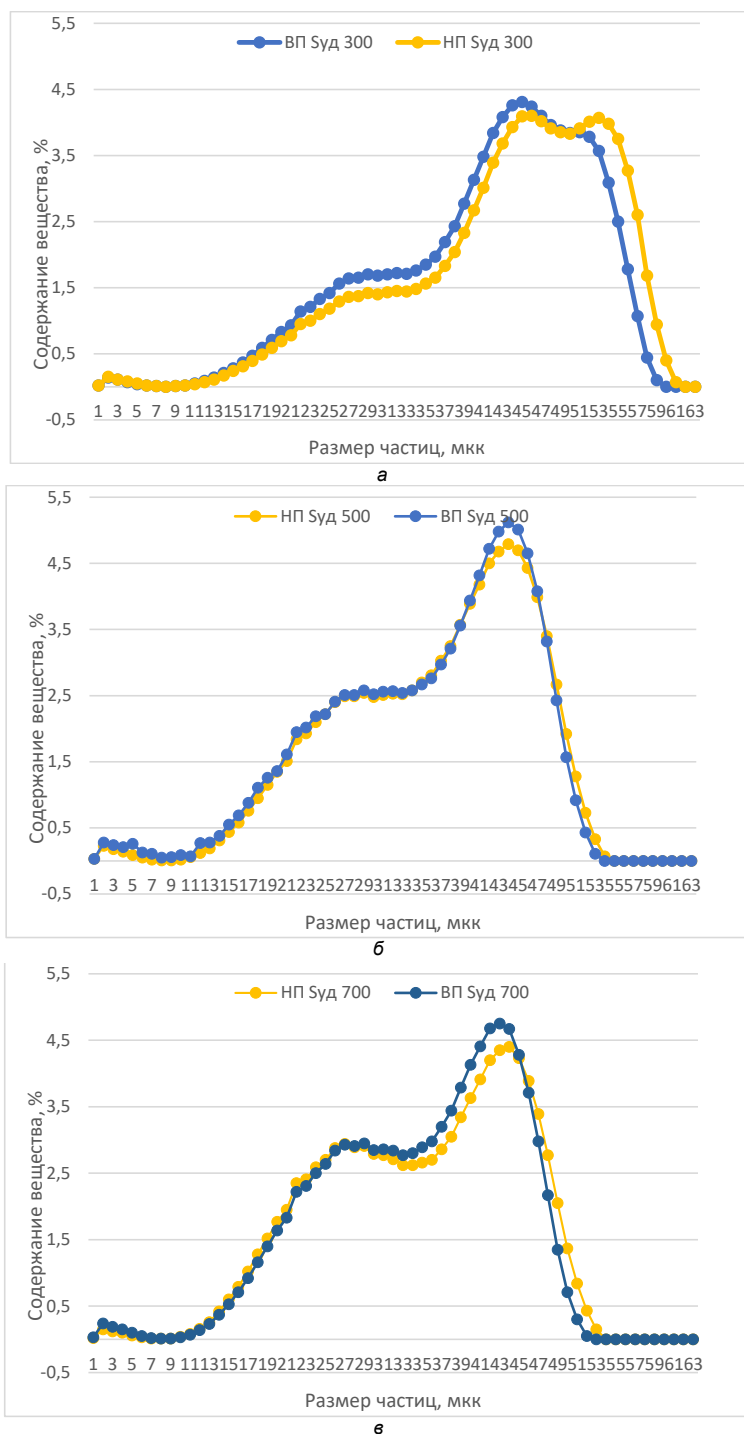
Figure 1 – Kinetics of quartzite sandstone grinding:
 a – grinding time up to 30 min;
 b – grinding time up to 120 min
 Source: compiled by the author.

Важным этапом научных исследований возможности использования выветренного кварцитопесчаника в композиционных вяжущих в качестве наполнителя стало изучение кинетики помола данной породы (рисунок 1). Помол производился в трубной шаровой мельнице при 30 об/мин в течение 30 мин. В первые 10 мин помола пробы отбирали каждые 2 мин для определения удельной поверхности, далее – каждые 10 мин.

В течение 30 мин помола удельная поверхность выветренного кварцитопесчаника составила 1000 м²/кг, а в случае невыветренного кварцитопесчаника за это время достигается только 500 м²/кг. При продолжении помола удельная поверхность невыветренного кварцитопесчаника 1000 м²/кг была зафиксирована лишь через 2 ч от начала эксперимента. За счет наличия микротрещин, пор и пустот, а также более дефектной аморфной фазы

в выветренной породе, процесс ее помола идет значительно эффективней по сравнению со свежим кварцитопесчаником. Данный факт дает существенное преимущество выветренным кварцитопесчаникам относительно экономической эффективности в масштабе промышленного производства строительных материалов [10, 11].

Далее в работе были изучены гранулометрические составы размолотых до удельной поверхности 300, 500 и 700 м²/кг кварцитопесчаников, чтобы проанализировать их возможные различия при одной и той же удельной поверхности (рисунок 2). Анализ результатов показал, что у кривых и на выветренном, и на свежем кварцитопесчанике наблюдается схожий характер распределений частиц по размерам относительно друг друга, но со смещением в область более мелких частиц кривой выветренного кварцитопесчаника во всех случаях.



*НП – невыветренный кварцитопесчаник, ВП – выветренный кварцитопесчаник

Рисунок 2 – Характер распределения частиц по размерам у тонкомолотого кварцитопесчаника:
 а – удельная поверхность кварцитопесчаника 300 м²/кг;
 б – удельная поверхность кварцитопесчаника 500 м²/кг;
 в – удельная поверхность кварцитопесчаника 700 м²/кг
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Particle size distribution pattern for finely ground quartzite sandstone:
 а – specific surface area of quartzite sandstone 300 m²/kg,
 б – specific surface area of quartzite sandstone 500 m²/kg,
 в – specific surface area of quartzite sandstone 700 m²/kg.
 Source: compiled by the author.

При помоле до 300 м²/кг заметно, что график невыветренного кварцитопесчаника смещен в сторону больших размеров. Это отражается и на среднем размере частиц, который составил 18 и 11 для невыветренного и выветренного кварцитопесчаника соответственно.

При дальнейшем увеличении удельной поверхности до 500 м²/кг графики распределения частиц максимально приближены к друг другу с двумя пиками: менее выраженным от 0,5 до 3,5 мкм и более ярко выраженном от 8 до 60 мкм. Здесь средний размер частиц составляет 8 и 6 мкм соответственно.

При помоле до $S_{уд} = 700$ м²/кг образуется 2 ярко выраженных пика в области 0,3–4 мкм; 4–50 мкм. При этом большее количество мельчайших частиц (область первого пика) наблюдается у выветренного кварцитопесчаника.

Полученные результаты повышения доли мельчайших частиц у выветренного кварцитопесчаника по сравнению с породой, незатронутой процессами выветривания, при разных удельных поверхностях кварцитопесчаников доказывают, что процессы выветривания оказывают положительное влияние на процесс помола кварцитопесчаника, значительно ускоряя его.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Способом получения композиционных вяжущих с использованием кварцитопесчаника в

количестве 20 и 50% был выбран отдельный помол, поскольку установлено, что исследуемые породы обладают разной размолоспособностью. Так при совместном помоле вяжущих и наполнителей в случае использования выветренного кварцитопесчаника возможно достижение общей удельной поверхности за счет более тонкого измельчения наполнителя, а при использовании невыветренного кварцитопесчаника – более тонкого помола цемента. В таком случае более тонкодисперсный минеральный порошок будет в большей степени способствовать активации процессов гидратации вяжущего и наоборот, что затруднит сравнительный анализ результатов [12, 13].

Предварительно цемент ЦЕМ I 42,5 Н был размолот до удельной поверхности 500 и 700 м²/кг. Далее цемент смешивали с наполнителями и домальвали в течение 1 мин на вибрационной мельнице для совместной гомогенизации [14]. Затем готовили образцы-кубики размером 3х3х3 см из теста нормальной плотности. Были определены показатели прочности в 28-суточном возрасте и реологические характеристики вяжущих. При этом нормальная плотность портландцемента составила 26,7%, а показатели удельной поверхности вводимого размолотого отсева кварцитопесчаника составили 300, 500 и 700 м²/кг (таблицы 1, 2).

Таблица 1
Влияние кварцевого сырья на прочность композиционного вяжущего
Источник: составлено авторами.

Table 1
The effect of quartz raw materials on the strength of a composite binder
Source: compiled by the author.

№ п/п	Состав (вяжущее)	Удельная поверхность, м²/кг		Предел прочности при сжатии, МПа	
		ПЦ	Кварцитопесчаник	Невыветренный кварцитопесчаник	Выветренный кварцитопесчаник
1	КВ20	500	300	46,9	49,1
			500	54,1	57,5
			700	55,5	58,5
2		700	300	58,3	60,7
			500	59,8	62,1
			700	59,2	65,5
3	КВ50	500	300	32,6	34,3
			500	46,5	49,2
			700	45,0	50,3
4		700	300	49,5	50,3
			500	52,3	53,4
			700	52,9	53,8
5	ПЦ	305	-	55,2	

*КВ20 (50) – замена цемента на 20 и 50% кварцитопесчаника

*KV20 (50) – replacement of cement with 20 and 50% quartzite sandstone

Таблица 2

Показатели нормальной густоты и сроки схватывания композиционных вяжущих
Источник: составлено авторами.

Table 2

Indicators of normal density and setting time of composite binders
Source: compiled by the author.

Класс	Суд, м ² /кг	Нормальная густота, %	Сроки схватывания, ч: мин	
			начало	конец
ЦЕМ I 42,5Н	320	26,7	1: 30	4: 30
KB20в	535	29,8	1: 50	2: 50
KB20н	513	28,2	1: 45	2: 35
KB50в	490	34,7	2: 05	3: 20
KB50н	500	33,8	1: 95	3: 10

Установлено, что при увеличении удельной поверхности цемента с 500 до 700 м²/кг происходит увеличение прочности у всех композиционных вяжущих. Однако такой эффект более значительно выражен у композиционных вяжущих с использованием выветренного кварцитопесчаника. Это объясняется большим содержанием аморфного кремнезема в составе такого кварцитопесчаника, который будет активнее реагировать с выделяющимся при гидратации гидроксидом кальция, образуя низкосоновые гидросиликаты кальция и уплотняя композит.

Анализ прочностных показателей вяжущих с 20% кварцитопесчаника в составе показал, что при удельной поверхности цемента $S_{\text{цемуд}} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$ увеличение удельной поверхности наполнителей до 700 м²/кг является нецелесообразным с точки зрения энергоёмкости процесса, поскольку не приводит к существенному возрастанию прочностных показателей смешанных вяжущих.

При удельной поверхности цемента $S_{\text{цемуд}} = 700 \text{ м}^2/\text{кг}$ выше прочностные показатели у KB20 с использованием наполнителя, размолотого до $S_{\text{уд}} = 700 \text{ м}^2/\text{кг}$. Так, у KB20 (выветренный кварцитопесчаник) прочность на 23% выше прочности ПЦ, для KB20 (невыветренный кварцитопесчаник) это значение составило 11%.

При сравнении KB50 наблюдаются немногие другие результаты. Прочности вяжущих на невыветренном кварцитопесчанике начинают снижаться по сравнению с цементом во всех случаях, тогда как у KB50 (выветренный кварцитопесчаник) прочностные показатели близ-

ки к цементным при удельной поверхности наполнителя 500 м²/кг и 700 м²/кг.

Таким образом, установлено, что прочностные характеристики композиционных вяжущих с использованием выветренного кварцитопесчаника во всех случаях имеют более высокие значения по сравнению с вяжущими на невыветренном кварцитопесчанике. Максимальное значение достигается у KB20 и превышает прочностные показатели цемента на 23%. Учитывая более высокие прочностные показатели вяжущих с 20% наполнителя, в работе использовали именно их, как наиболее экономически и энергетически выгодные.

Далее в работе были изучены показатели нормальной густоты и сроки схватывания композиционных вяжущих на основе цемента с $S_{\text{уд}} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$ (см. таблицу 2).

Было установлено увеличение величины нормальной густоты у композиционного вяжущего на основе выветренного кварцитопесчаника по сравнению с невыветренным кварцитопесчаником и цементом.

Проведённый анализ микроструктуры образцов с использованием в составе кварцитопесчаника показал хорошую адгезию цементного камня к зернам кварцитопесчаника как выветренного, так и не затронутого процессами выветривания (рисунок 3).

При этом у образца на основе выветренного кварцитопесчаника наблюдается более высокая плотность цементного камня. Что объясняется наличием аморфных минеральных фаз и более активно протекающего процесса гидратации KB20В, который происходит в момент связывания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при прохождении пуццолановой реакции.

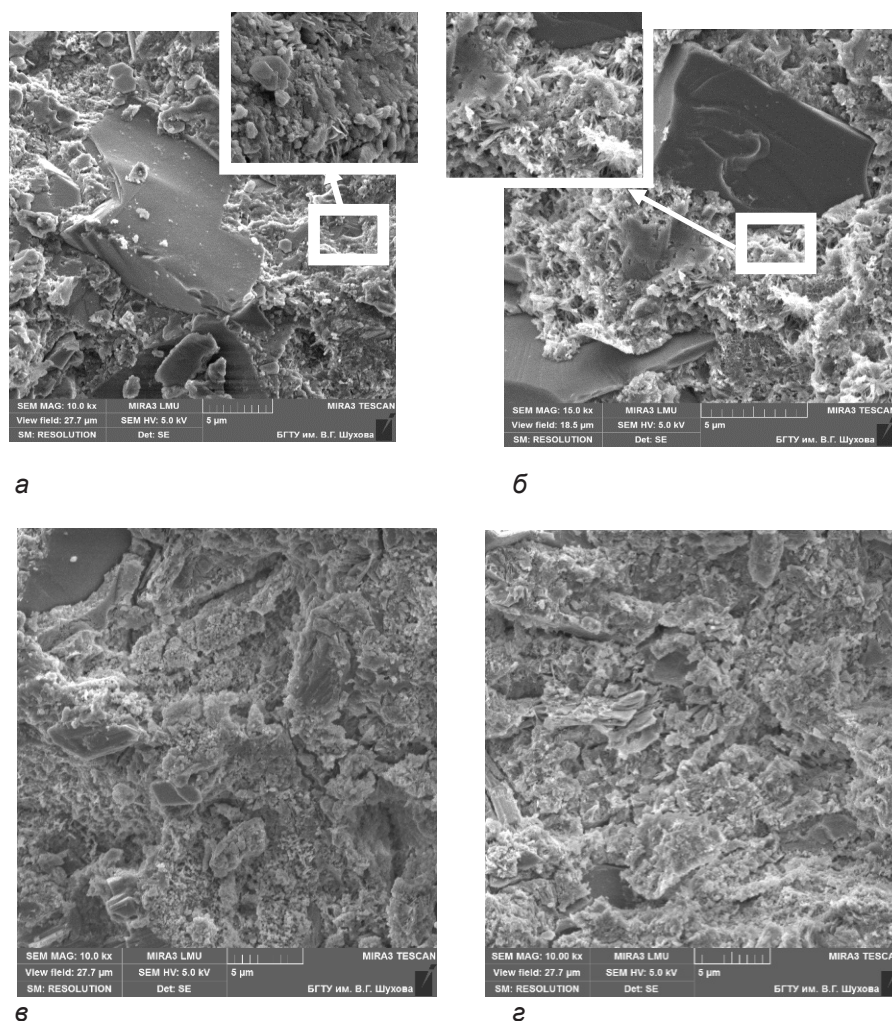


Рисунок 3 – Микроструктура затвердевшего композиционного вяжущего в 28-суточном возрасте: а – KV20V; б – KV20N; в – KV50V; г – KV50N
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Microstructure of the hardened composite binder at the age of 28 days:
а – KV20V; б – KV20N, в – KV50V, г – KV50N
Source: compiled by the author.

Совместное использование тонкомолотого выветренного кварцитопесчаника и цемента способствует синтезу большего числа гидратных фаз и уплотнению наиболее слабых мест контактной зоны при расходе наполнителя в количестве 20% (KB20). При этом активизируется процесс структурообразования путем заполнения пустот в кристаллической матрице цементного камня за счет образования дополнительного количества гидратных кристаллических фаз на рубеже контактной зоны.

Большой процент тонкодисперсного наполнителя приводит к возрастанию водопотребности смеси, а также к тому, что большая его часть останется не прореагировавшей с выделяющимся гидроксидом кальция цементной

системы, приводя к снижению прочности за счет формирующейся более дефектной структуры композита (рисунок 4, в, г).

В ходе дальнейшей работы оценивали изменение структуры фазового состава по РФА. Анализ полученных результатов также подтвердил более полное связывание гидроксида кальция, выделяющегося при гидратации клинкерных минералов, с образованием дополнительных порций гидросиликатов кальция низкоосновного типа у KB20B, поскольку интенсивность дифференциальных отражений, характерных для $\text{Ca}(\text{OH})_2$, в вяжущем уменьшается при использовании выветренного кварцитопесчаника [15].

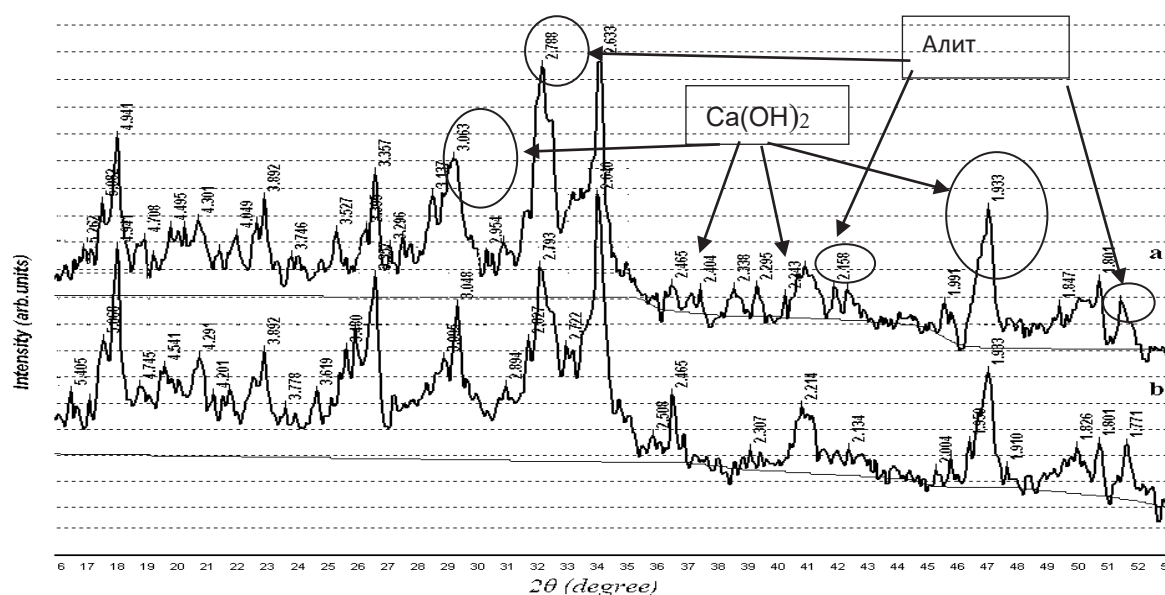


Рисунок 4 – Рентгенограмма при расходе 20% наполнителя (KV20) через 28 суток твердения:
 а – состав на невыветренном кварцитопесчанике (KV20H);
 б – состав на выветренном кварцитопесчанике (KV20B)
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – X-ray diffraction pattern with 20% filler consumption (KV20) after 28 days of hardening:
 а – composition on unweathered quartzite sandstone (KV20H);
 б – composition on weathered quartzite sandstone (KV20V)
 Source: compiled by the author.

У KV20B по сравнению с KV20H растворения клинкерных минералов происходят более активно, что подтверждается снижением интенсивности пиков алита $\text{Ca}_3[\text{SiO}_4]\text{O}$ и белита $\text{Ca}_2[\text{SiO}_4]$ (рисунок 4, б). Также высокая интенсивность дифракционных максимумов портландита в KV20H и одновременное уменьшение отражений $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в KV20B подтверждает меньшую степень его взаимодействия в гидратируемой системе на невыветренном кварцитопесчанике и указывает на его связывание в гидратные новообразования CSH у KV20B.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Доказано, что наличие кремнезема в структуре выветренного кварцитопесчаника оказывает положительное воздействие на механизм твердения композиционного вяжущего. Это связано с более высокой пуццолановой активностью при гидратации вяжущего по сравнению с композиционным вяжущим на свежем кварцитопесчанике, так как под воздействием процессов выветривания дефектность структуры выветренной горной породы значительно повышается.

При проведении комплексного анализа с привлечением методов РФА и СЭМ установлено, что образовавшиеся в процессах выветривания аморфные фазы кремнезема интенсифицируют гидратацию клинкерных минералов за счет высокой пуццолановой активности, что приводит к связыванию выделяющегося при гидратации гидроксида кальция с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция второй генерации. Установлено, что применение выветренного кварцитопесчаника в составе композиционных вяжущих в количестве 20% позволяет существенно снизить долю цемента и энергоемкость процесса помола с возможностью увеличения прочности готового композита.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Толстой А.Д., Лесовик В.С., Новиков К.Ю. Высокопрочные бетоны на композиционных вяжущих с применением техногенного сырья // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2016. № 2 (17). С.174–180.
2. Романович А.А., Глаголев Е.С., Бабаевский А.Н. Технология получения вяжущих с исполь-

зованием техногенных отходов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухов. 2014. № 5. С. 102–105.

3. Коренев Е.В. Проблемы сырьевой базы строительных композитов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 3 (50). С. 178–182.

4. Романович А.А. Энергосбережение при производстве строительных изделий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2011. № 3. С. 69–71.

5. Фролова М.А., Тутыгин А.С., Айзенштадт А.М., Махов Г.А., Лесовик В.С. Неразрушающий контроль качества бетонных строительных композитов // Строительные материалы. 2013. № 3. С. 20–22.

6. Лесовик В.С. Повышение эффективности производства строительных материалов с учетом генезиса горных пород: монография. М., 2000. 462 с.

7. Abrishambaf A., Pimentel M., Nunes S. Influence of fibre orientation on the tensile behaviour of ultra-high performance fibre reinforced cementitious composites // Cement and Concrete Research. 2017. No 97. Pp. 28–40.

8. Alsadey S. Influence of superplasticizer on strength of concrete // International Journal of Research in Engineering and Technology. 2017. No 1(3). Pp. 164–166.

9. Nehdi M., Mindess S., Atcin P.C. Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles // Cement and concrete research. 1998. No 5. Pp. 687–797.

10. Лесовик В.С., Фомина Е.В., Черепанова И.А., Ряпукhin А.Н. Выветренные кварцитопесчанники Курской магнитной аномалии – сырье стройиндустрии // Вестник СибАДИ. 2022; 19(5): 728–737. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-728-737>

11. Федюк Р.С., Мочалов А.В. Вопросы управления структурообразованием композиционного вяжущего // Alitinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2018. № 2 (51). С. 2–10.

12. Строкова В.В., Жерновский И.В., Фоменко Ю.В. О влиянии размерных параметров полиморфных модификаций кварца на его активность в композиционных вяжущих // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2007. № 3. С. 72–73.

13. Мытаева А.К., Асаналиева Ж.Д. Исследование техногенных продуктов и их эффективность применения в качестве сырья для стройиндустрии // Вестник международной ассоциации экспертов по сейсмостойкому строительству. 2009. № 7 (7). С. 29–34.

14. Панова В.Ф. Техногенные продукты как сырье для стройиндустрии: монография. Новокузнецк: СибГИУ, 2009. 244 с.

15. Аласханов А.Х., Таимасханов Х.Э., Саидумов М.С., Муртазаева Т.С. Современные подходы к разработке многокомпонентных вяжущих с использованием техногенного сырья // Вестник НГТУ. Технические науки. 2022. Том 18, № 1 (27). С. 63–70.

REFERENCES

1. Tolstoi A.D., Lesovik V.S., Novikov K.Iu. High endurance concretes on composite bindings with the use of man-made raw materials. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost.* 2016; 2 (17): 174–180. (in Russ.)

2. Romanovich A.A., Glagolev E.S., Babaevsky A.N. Technology of obtaining binders using technogenic waste. *Bulletin of Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov.* 2014; 5: 102–105. (in Russ.)

3. Korneeva E.V. Problems of resource base of building composites. *Vestnik of Tomsk state university of architecture and building.* 2015; (3): 178–182. (In Russ.)

4. Romanovich A.A. Energy saving in the production of building products. *Bulletin of Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov.* 2011; 3: 69–71. (In Russ.)

5. Frolova M.A., Tutygin A.S., Eisenstadt A.M., Makhov G.A., Lesovik V.S. Non-destructive quality control of concrete construction composites. *Stroitel'nye Materialy (Construction Materials).* 2013; 3: 20–22. (In Russ.)

6. Lesovik V.S. *Increase of efficiency of building materials production taking into account genesis of rocks*: monograph. Moscow, 2000: 462. (In Russ.)

7. Abrishambaf A., Pimentel M., Nunes S. Influence of fibre orientation on the tensile behaviour of ultra-high performance fibre reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Research.* 2017; 97: 28–40.

8. Alsadey S. Influence of superplasticizer on strength of concrete. *International Journal of Research in Engineering and Technology.* 2017; 1(3): 164–166.

9. Nehdi M., Mindess S., Atcin P.C. Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles. *Cement and concrete research.* 1998; 5: 687–797.

10. Lesovik V.S., Fomina E.V., Cherepanova I.A., Ryapukhin A.N. Weathered quartzite sandstones of the Kursk magnetic anomaly as a raw material for construction industry. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2022; 19(5): 728–737. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-728-737>

11. Fedyuk R.S., Mochalov A.V. Issues related to management of the structure formation of a composite binder. *Alitinform: Cement. Concrete. Dry mixes.* 2018; 2 (51): 2–10. (In Russ.)

12. Strokov V.V., Zhernovskiy I.V., Fomenko Yu.V. On the influence of dimensional parameters of polymorphic modifications of quartz on its activity in composite binders. *Bulletin of Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov.* 2007; 3: 72–73. (In Russ.)

13. Mytaeva A.K., Asanaliyeva Zh.D. Study of technogenic products and their efficiency of application as raw materials for construction industry: scientific. *Bulletin of the International Association of Experts in Earthquake Engineering.* 2009; No. 7 (7): 29–34. (In Russ.)

14. Panova V.F. *Technogenic products as raw materials for construction industry: monograph* / Sib-GIU. Novokuznetsk, 2009: 244. (In Russ.)

15. Alaskhanov A.Kh., Taimaskhanov Kh.E., Saidumov M.S., Murtazaeva T.S. Modern approaches to the development of multicomponent binders using technogenic raw materials. *Bulletin of NSTU. Technical sciences*. 2022; Vol. 18 No. 1 (27): 63–70. (In Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Столетова И.А. (Черепанова). Подготовка текста статьи, проведение экспериментов.

Лесовик В.С. Формулирование основной концепции исследования.

Фомина Е.В. Совместное осуществление анализа научной литературы по проблеме исследования, анализ и дополнение текста статьи.

CO-AUTHORS' CONTRIBUTION

Stoletova I.A. (Cherepanova) Writing the manuscript, conducting experiments.

Lesovik V.S. Design of the basic research concept.

Fomina E.V. Analysis of scientific literature on the research problem, contribution to the text of the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Столетова Ирина Александровна (Черепанова) – ассистент кафедры «Архитектура и градостроительство» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8946-451X>,

SPIN-код: 7387-5219,

e-mail: irinadiusa@gmail.com

Лесовик Валерий Станиславович – заслуженный деятель науки РФ, член-корреспондент РААСН, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Строительное материаловедение» Белгород-

ского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2378-3947>,

SPIN-код: 2873-6860,

e-mail: naukavs@mail.ru

Фомина Екатерина Викторовна – канд. техн. наук, старший научный сотрудник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0542-0963>,

SPIN-код: 5270-6285,

e-mail: fomina.katerina@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Stoletova Irina A. (Cherepanova) – assistant of the Department of Architecture and Urban Planning, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University (46 Kostyukova St., Belgorod, 308012).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8946-451X>,

SPIN-code: 7387-5219,

e-mail: irinadiusa@gmail.com

Lesovik Valery S. – Honored Scientist of the Russian Federation. Corresponding Member of RAASN academic degree: Dr.Sci.Tech., academic title: Professor, Head of the Department of Building Materials Science, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University (308012, Belgorod, Kostyukova str., 46).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2378-3947>,

SPIN-code: 2873-6860,

e-mail: naukavs@mail.ru

Fomina Ekaterina V. – Cand. of Sci. (Eng), Senior Researcher, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University (46, Kostyukova str., Belgorod, 308012).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2378-3947>,

SPIN-code: 5270-6285,

e-mail: fomina.katerina@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, 20–40 ссылок; **обзорные статьи** – (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – от 10 и более страниц, от 5 и более рисунков, до 80 ссылок.

Статья должна быть неопубликованной ранее в других изданиях, написана в контексте современной литературы, обладать новизной и соответствовать профилю журнала. Автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирования и ссылок на официальные документы и другие источники. Редакция 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, указываются индекс по универсальной десятичной классификации (УДК) (размер шрифта 10 пт).

2. Заглавие статьи. Заголовок (максимально 10-12 слов) должен быть информативным, лаконичным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы. Приводится на русском и английском языках, по центру полужирным шрифтом размером 12 пт. прописными буквами.

3. Фамилии авторов. Количество авторов не должно превышать четырех. Для англоязычных метаданных важно соблюдать вариант написания сведений об авторе в последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия (Anna V. Ivanova). При латинизации фамилии можно воспользоваться системой 1 BSI – Британский Институт Стандартов (British Standards Institution) транслитерации на сайте <https://translit.ru>, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи обычным шрифтом (размер шрифта 12 пт.).

4. Аннотация. Аннотация включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе научная статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению, объем от 200 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Приводится на русском и английском языках. Начинается словом «Аннотация» с прописной буквы (шрифт полужирный, курсив, 10 пт); точка; затем с прописной буквы текст (курсив, 10 пт).

5. Ключевые слова служат ориентиром для читателя и используются для поиска статей в электронных базах, поэтому должны отражать дисциплину (область науки, в рамках которой написана статья), тему, цель и объект исследования. Рекомендуемое количество ключевых слов – 10–12, количество слов внутри ключевой фразы – не более трех.

Размещаются после аннотации, на русском и английском языках.

6. Благодарности. Раздел включен в требования всеми крупными издательствами. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

7. Основные положения. Отражают ключевые результаты исследования, основное содержание статьи, изложенные тезисно и оформленные в виде 3–5 пунктов маркированного списка.

8. Основной текст статьи излагается на русском или английском языках, в электронном и бумажном виде (шрифт «Arial» (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный), в следующей последовательности:

Введение (1–4 стр.) В этом разделе описываются общая тема исследования, цели и задачи планируемой работы, теоретическая и практическая значимость, приводятся наиболее известные и авторитетные публикации по изучаемой теме, обозначаются нерешенные проблемы. Данный раздел должен содержать обоснование необходимости и актуальности исследования. Информация во Введении должна быть организована по принципу «от общего к частному».

Подразделы введения представлены на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Методы и материалы (от 2 стр. и более) В этом разделе в деталях описываются методы, которые использовались для получения результатов. Обычно сначала дается общая схема экспериментов/исследования, затем они представляются настолько подробно и с таким количеством деталей, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, организационных или структурных диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. Если было получено много похожих зависимостей, представляемых в виде графиков, то приведите только один типичный график, а данные об имеющихся количественных отличиях между ними, представьте в таблице.

Способы представления результатов представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Обсуждение и заключение. Раздел содержит интерпретацию полученных результатов исследования, предположения о полученных фактах, сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

9. Список источников (References)

В список источников включаются только те источники, которые автор использовал при подготовке статьи. Оформление библиографического списка регламентируется ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 20–40 источников, но не более 50. Из них за последние 3 года – рекомендуется указать не менее 20, иностранных – не менее 15. Важно правильно оформить ссылку на источник.

Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет.

Источники указываются в конце статьи в алфавитном порядке либо в порядке упоминания в тексте статьи.

Приводится на русском языке и в латинице по образцу, представленному на сайте журнала.

Аффилиация. Фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, ORCID i, Scopus Author ID, ResearcherID, далее указать все места работы, должность, название организации, служебный адрес, электронная почта, телефон, e-mail.

Приводится на русском и английском языках.

Технические требования к оформлению.

Формат А4, шрифт Arial (10 pt), 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 подписанной подписью, и отдельными файлами с расширением (JPEG, GIF, BMP). Должны быть пронумерованы (Таблица 1 – Заголовок, Рисунок 1 – Наименование), озаглавлены (таблицы должны иметь заглавие, выравнивание по левому краю, а иллюстрации – подписанной подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы 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. Корректуре 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.