

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



научный рецензируемый журнал

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

“Vestnik SibADI”

Том 22, № 4. 2025
Vol.22, No. 4. 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: 10.26518/2071-7296-2025-22-4

TOM 22, № 4. 2025

VOL. 22, No. 4. 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 22.08.2025. Дата выхода в свет 29.08.2025. 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 22.08.2025. Publication date is 29.08.2025. 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. АВН, ректор Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 57202984669, **ORCID ID** 0000-0002-8883-3167

Транспортное, горное и строительное машиностроение

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

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

Транспорт

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

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

Строительство и архитектура

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

Бурьянов Александр Федорович, д-р техн. наук, доц., исполнительный директор, НО «Российская Гипсовая Ассоциация», г. Москва, Россия
Scopus Author ID 55975665000; **Researcher ID** AAЕ-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 AuthorID 6603741286, **ResearcherID** P-7880-2015, **ORCID ID** 0000-0003-2164-9936

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

Гумаров Гали Сагингалиевич, д-р техн. наук, проф., член-кор. 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

Леонович Сергей Николаевич, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
Scopus Author ID 55887733300, **Researcher ID** A-4757-2016, **ORCID ID** 0000-0002-4026-820X

Лесовик Валерий Станиславович, д-р техн. наук, проф., член-кор. РААСН, БГТУ им. Шухова, г. Белгород, Россия
Scopus Author ID 55887733300, **Researcher ID** A-4757-2016 **ORCID ID** 0000-0002-2378-3947

Макеев Сергей Александрович, д-р техн. 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

Материмов 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***М.Ю. Йылмаз, С.Д. Иванов***АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ
КРАНОВЫХ ПРИВОДОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ 512***С.В. Савельев, И.К. Потеряев, Г.Г. Бурый***МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИБРОВАЛЬЦА
С ДЕФОРМИРУЕМЫМ ГРУНТОМ ПРИ УПЛОТНЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЛОЁВ
АВТОДОРОГИ 524***А.В. Синельщиков***ВЛИЯНИЕ ДЕТАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ СЪЕМНОГО ГРУЗОЗАХВАТНОГО
ПРИСПОСОБЛЕНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИЧЕСКОГО РАСЧЁТА МОСТОВОГО КРАНА 540***Д.В. Фурманов, Л.М. Шамахов, Е.С. Буданова***ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДИ ПОВЕРХНОСТИ БЕСПОРИСТЫХ КАМЕННЫХ
МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ В ПРОЦЕССЕ ФРЕЗЕРОВАНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ 554****РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ***А.В. Игнатов, В.Н. Басков***МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРА «АВТОМОБИЛЬ»
НА БЕЗОПАСНОСТЬ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ 568***А.М. Жданова, А.В. Старостенко, Д.А. Царев***СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОЛЬЦЕВЫХ ПЕРЕСЕЧЕНИЙ
ДЛЯ ВЫСОКОАВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ 578***С.М. Мочалин, О.В. Быкова, А.Ю. Шонин, И.А. Эйхлер***АНАЛИЗ РАЗВИТОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ
ПО ОБСЛУЖИВАНИЮ НАСЕЛЕНИЯ ОМСКОЙ ОБЛАСТИ 590***Е.А. Павленко, Н.А. Жданов, В.Л. Крячек-Ахиев***РЕКУПЕРАЦИЯ ТОРМОЗНОЙ ЭНЕРГИИ, ЕЁ ВИДЫ И ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ
НА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ АВТОМОБИЛЯХ 606***Л.С. Трофимова, В.С. Социховский***МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТНО-СКЛАДСКИХ ПРОЦЕССОВ
В СИСТЕМАХ РОЗНИЧНОЙ ПРОДАЖИ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ТРАДИЦИОННЫХ И ОНЛАЙН-ТЕХНОЛОГИЙ 618***А.И. Фадеев, А.М. Ильянков***ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ РЕЗЕРВНОГО ПАРКА АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ 630****РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА***А.С. Александров, Н.П. Александрова, Т.В. Семенова***АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СЛАБЫХ ОСНОВАНИЙ ДОРОЖНЫХ НАСЫПЕЙ 644***Р.В. Лесовик, Чжан Сюань***МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ БЕТОН НА КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ
ДЛЯ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ С УЧЕТОМ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ
УСЛОВИЙ КИТАЯ 672***Л.Д. Маилян, Н.О. Сизен***ФОРМИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПОТОКОВ С НЕПОСТОЯННЫМИ
РАБОЧИМИ КАДРАМИ 684**

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Mikhail Y. Yilmaz, Sergey D. Ivanov

ANALYSIS OF TRANSIENTS IN ASYNCHRONOUS MOTORS OF CRANE ACTUATORS FOR DIAGNOSTICS OF MECHANICAL FAULTS	513
--	------------

S.V. Savelyev, I.K. Poteyayev, G.G. Buryi

MODELING THE PROCESS OF INTERACTION BETWEEN VIBRATORY ROLLER AND DEFORMABLE SOIL DURING COMPACTION OF ROAD TECHNOLOGICAL LAYERS	525
--	------------

Alexey V. Sinelshchikov

INFLUENCE OF REMOVABLE LOAD-HANDLING ATTACHMENT MODEL DETAILING ON OVERHEAD CRANE STATIC CALCULATION RESULTS	541
---	------------

Denis V. Furmanov, Leonid M. Shamakhov, Ekaterina. S. Budanova

DETERMINATION OF THE SPECIFIC SURFACE AREA OF NON-POROUS STONE MATERIALS OBTAINED BY MILLING ASPHALT CONCRETE	555
--	------------

PART II. TRANSPORT

Anton V. Ignatov, Vladimir N. Baskov

METHODOLOGY FOR THE IMPACT ASSESSMENT OF THE «AUTOMOBILE» FACTOR ON ROAD SAFETY	569
--	------------

Anastasia M. Zhdanova, Andrey V. Starostenko, Danil A. Tsarev

COMPARATIVE RESEARCH INTO ROUNDABOUT PERFORMANCE FOR HIGHLY AUTOMATED VEHICLES	579
---	------------

Sergey M. Mochalin, Olga V. Bykova A.Y. Shonin, Ivan A. Eychler

ANALYSIS OF TRAFFIC ROUTES DEVELOPMENT IN TERMS OF TRANSPORTATION SERVICE OF THE OMSK REGION	591
---	------------

Evgeny Al. Pavlenko, Nikolay A. Zhdanov, Valentin L. Kryachek-Akhiev

BRAKE ENERGY RECOVERY, ITS TYPES AND THE POSSIBILITY OF APPLICATION ON DOMESTIC CARS	607
---	------------

Liudmila S. Trofimova, Vladislav S. Sotsikhovskiy

MATHEMATICAL MODEL OF TRANSPORT AND WAREHOUSE PROCESSES IN RETAIL SALES SYSTEMS EVOLVING TRADITIONAL AND ONLINE TECHNOLOGIES	619
---	------------

Alexander I. Fadeev, Alexey M. Ilyankov

DETERMINING THE SIZE OF THE MOTOR VEHICLE RESERVE FLEET	631
--	------------

PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Anatoly S. Aleksandrov, Nataliya P. Aleksandrova, Tatiana V. Semenova

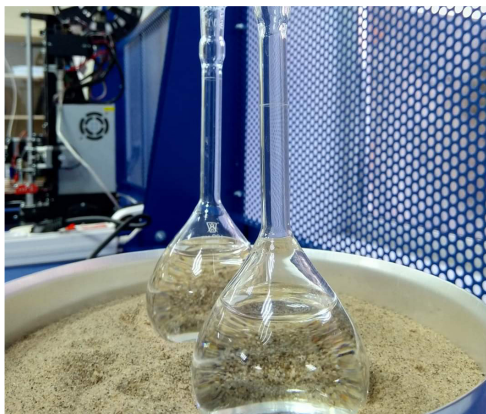
ANALYSIS OF CALCULATION METHODS FOR WEAK FOUNDATIONS OF ROAD EMBANKMENTS	645
---	------------

Ruslan V. Lesovik, Zhang Xuan

FINE-GRAINED CONCRETE WITH COMPOSITE BINDER FOR PILE FOUNDATIONS IN TERMS OF ENVIRONMENT AND CLIMATE IN CHINA	673
--	------------

Liya D. Mailyan, Nikolay O. Sizen

DESIGN OF CONSTRUCTION FLOWS WITH VARIABLE WORKING STAFF	685
---	------------



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



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

Научная статья

УДК 621.86

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-512-523>

EDN: NDLRWQ



АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ КРАНОВЫХ ПРИВОДОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

М.Ю. Йылмаз ✉, С.Д. Иванов

МГТУ им. Н.Э. Баумана,

г. Москва, Россия

✉ ответственный автор

mihailsolovev287@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Обоснована необходимость перехода от традиционных методов технического обслуживания к системам оперативного мониторинга, позволяющим выявлять дефекты в реальном времени. Поставлена задача повышения надежности крановых приводов через раннюю диагностику механических повреждений на основе анализа токов статора асинхронного двигателя. Доказана значимость исследования динамики переходных процессов для разработки эффективных диагностических алгоритмов.

Материалы и методы. Разработана математическая модель электромеханических процессов в системе координат α - β , учитывающая взаимное влияние момента сопротивления и электромагнитных характеристик двигателя. Модель параметризована на основе данных промышленных крановых приводов. Численное моделирование для исследования переходных процессов при скачкообразном изменении нагрузки выполнено в среде Wolfram Mathematica. Использованы уравнения электрического баланса, магнитных потоков и механического движения, адаптированные для условий работы кранового оборудования.

Результаты. Установлено, что изменение механических условий работы привода проявляется в специфических изменениях параметров токов статора, таких как увеличение периода колебаний при сбросе нагрузки. Показано, что период колебаний тока статора уменьшается на 10% при наложении нагрузки и возрастает на 15% после ее снятия.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты показывают возможности и ограничения для использования тока статора в качестве информативного параметра о работе кранового механизма для его диагностирования в реальном времени.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: асинхронный электродвигатель, динамические процессы, промышленная безопасность, математическое моделирование, крановые механизмы, дефекты привода, ток статора

Статья поступила в редакцию 07.06.2025; одобрена после рецензирования 04.07.2025; принята к публикации 22.08.2025.

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: Йылмаз М.Ю., Иванов С.Д. Анализ переходных процессов в асинхронных двигателях крановых приводов для диагностики механических неисправностей // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 4. С. 512-523. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-512-523>

© Йылмаз М.Ю., Иванов С.Д., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-512-523>

EDN: NDLRWQ

ANALYSIS OF TRANSIENTS IN ASYNCHRONOUS MOTORS OF CRANE ACTUATORS FOR DIAGNOSTICS OF MECHANICAL FAULTS

Mikhail Y. Yilmaz ✉, Sergey D. Ivanov
Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, Russia
✉ corresponding author
mihailsolovev287@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. The need of transitioning from traditional maintenance methods to operational monitoring systems that enable real-time defect detection is proved. The task of improving the reliability of crane drives through early detection of mechanical damage based on analysis of asynchronous motor stator currents is set. The importance of studying the dynamics of transient processes for the development of effective diagnostic algorithms is shown.

Materials and methods. A mathematical model of electromechanical processes in the α - β coordinate system has been developed, taking into account the mutual influence of the resistance torque and the electromagnetic characteristics of the motor. The model is parameterized based on data from industrial crane drives. Numerical simulation for the study of transient processes during sudden load changes was performed in the Wolfram Mathematica environment. Equations of electrical balance, magnetic fluxes, and mechanical motion adapted for the operating conditions of crane equipment were used.

Results. It has been found that changes in the mechanical operating conditions of the drive are manifested in specific changes in the stator current parameters, such as an increase in the oscillation period when the load is released. It has been shown that the stator current oscillation period decreases by 10% when the load is applied and increases by 15% after it is removed.

Discussion and conclusion. The results obtained show the possibilities and limitations for using the stator current as an informative parameter to study the operation of the crane mechanism for its diagnostics in real time.

KEYWORDS: asynchronous electric motor, dynamic processes, industrial safety, mathematical modeling, crane mechanisms, drive defects, stator current

The article was submitted: June 06, 2025; **approved after reviewing:** July 04, 2025; **accepted for publication:** August 22, 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: Yilmaz M.Y., Ivanov S.D. Analysis of transients in asynchronous motors of crane actuators for diagnostics of mechanical faults. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (4): 512-523. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-512-523>

© Yilmaz M.Y., Ivanov S.D., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасной работы грузоподъемного оборудования остается важнейшей задачей современных исследований в сфере подъемно-транспортных технологий [1, 2, 3]. Особый интерес представляет возможность оценки технического состояния крановых механизмов через анализ электротехнических характеристик их приводных систем [4, 5, 6].

Ключевой проблемой в данной области является поддержание эксплуатационной готовности оборудования. Хотя традиционная система технического обслуживания и ремонтов (ТОиР) доказала свою эффективность, ее результативность существенно зависит от качества планирования профилактических мероприятий. Как показывают исследования, современные подходы к планированию ТОиР не всегда обеспечивают необходимый уровень надежности¹ [7]. Данные по аварийности кранового оборудования подтверждают недостаточную эффективность существующих методов диагностики, применяемых при формировании графиков обслуживания [8, 9].

Актуальной задачей становится разработка систем оперативного мониторинга, позволяющих получать информацию о состоянии механизмов в реальном времени. Такие системы дают возможность оперативно корректировать графики ТОиР, что существенно повысит безопасность эксплуатации грузоподъемно-транспортных машин (ПТМ). Предлагаемое решение направлено на непрерывный контроль технического состояния приводных систем между плановыми обслуживаниями [10, 11, 12]. Совершенствование системы ТОиР через оперативное выявление и устранение возникающих неисправностей в приводах и механизмах кранов позволит существенно повысить надежность ПТМ.

Известно о существовании методик и зарубежных технических средств контроля состояния электродвигателя, встроенных в преобразователи частоты [13, 14]. Применение таких средств ограничено единственным элементом механизма – электродвигателем, в то время как задачей проводимого исследования является расширение объекта диагностирования

до целого механизма, при этом электродвигатель используется в качестве источника первичной информации.

Зарубежные системы безопасности, используемые на кранах Kone Cranes, Liebherr и др., укомплектованы датчиками тока электродвигателя, однако применение их ограничено контролем запуска электродвигателя для безопасного управления тормозом. Из этого следует, что наступил момент, когда технические средства диагностики стали доступными для крановой отрасли, а эффективное их применение ограничено неразработанностью методик обработки первичной информации (в данном случае тока статора электродвигателя).

Цель исследования – разработка математической модели связи электрических и механических параметров асинхронного электродвигателя кранового привода.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках теоретического анализа взаимосвязь между параметрами дефекта и электрическими характеристиками может быть установлена через электромеханические зависимости². Возникающие дефекты оказывают периодическое действие (выкрашивание зуба, проход стыка рельсов, увеличенный зазор в зубчатой передаче и др.) или плавно изменяющееся (изнашивание дорожки качения подшипника, увеличение промежутков контакта реборды колеса и головки рельса и др.). Второй тип нагрузки от дефекта может быть проанализирован как квазистатический режим в силу превышения периода действия нагрузки периода переходных процессов электрических параметров на несколько порядков. В ответ же на импульсную нагрузку электродвигатель оказывает демпфирующее действие, описываемое выражением (1):

$$M_{\text{дв}} = \Delta M e^{-\frac{t}{T}} + M_{\text{стат}}, \quad (1)$$

где ΔM – добавочная величина изменения момента электродвигателя, Н·м;

$M_{\text{стат}}$ – статический момент двигателя, Н·м;

$e^{-\frac{t}{T}}$ – коэффициент демпфирования двигателя.

¹ Агейчева М.М. Учет реальных условий работы крана при расчете остаточного ресурса по данным регистратора параметров // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: электронный сборник статей по материалам СХХХI Студенческой международной научно-практической конференции, Новосибирск, 9 ноября 2023 года. Новосибирск: Общество с ограниченной ответственностью «Сибирская академическая книга», 2023. С. 85–92. EDN ECQRWT.

² Кувшинов А.А., Греков Э.Л. Теория электропривода. Переходные процессы в электроприводе: учебное пособие для СПО. Саратов: Профобразование, 2020. 113 с. ISBN 978-5-4488-0563-9. EDN JJASTV.

Использование механических параметров для выявления дефектов имеет существенные ограничения, связанные с трудностями монтажа измерительных устройств и жесткими требованиями к их метрологическим характеристикам. Альтернативным решением является мониторинг электромеханических показателей. Современные исследования демонстрируют эффективность применения электрических параметров двигателя для решения задач ограничения грузоподъемности^{3,4} [15, 16, 17] и регистрации параметров [18, 19]. Наиболее информативными показателями являются токовые характеристики ротора и статора, потребляемая активная мощность, параметры питающего напряжения и частота сети. Комплексный анализ динамики этих параметров открывает возможности для создания эффективной системы диагностики, способной идентифицировать и классифицировать различные типы повреждений.

Ток статора представляет собой комплексный показатель, интегрирующий как электрические, так и механические аспекты работы двигателя. Ключевое преимущество данного параметра заключается в его чувствительности к различным видам неисправностей: изменения нагрузочного режима, появление дисбаланса, износ подшипниковых узлов и повреждения обмоточных систем. При этом методика измерения токовых характеристик не требует сложного оборудования и может быть легко внедрена в промышленных условиях, что определяет ее практическую ценность. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка комплексных диагностических алгоритмов на основе анализа множества электрических параметров.

Для теоретического обоснования методики выбрано моделирование электромеханических процессов [20]. Классический подход, предполагающий анализ асинхронного двигателя в стационарной системе координат (α - β) с применением фазового преобразования, хорошо описан в специализированной литературе⁵ [21, 22, 23]. Математическая модель

включает уравнения электрического баланса, описывающие динамику токов статора с учетом приложенного напряжения, омического сопротивления обмоток и влияния магнитного поля ротора; уравнения магнитных потоков, учитывающие токовые характеристики статора, электрические параметры ротора и угловую скорость вращения; а также механическое уравнение, связывающее электромагнитный момент, момент внешней нагрузки и инерционные характеристики системы.

Особое внимание в исследовании уделено адаптации базовой модели для анализа специфических режимов работы крановых электроприводов. В рамках работы выполнена параметризация коэффициентов уравнений с учетом реальных эксплуатационных характеристик и модификация модели для учета характерных рабочих условий: переменная нагрузка, частые пусковые режимы и динамические переходные процессы. Такой подход позволяет получить более точные результаты моделирования, соответствующие реальным условиям эксплуатации кранового оборудования.

Необходимые для расчета параметры модели не являются паспортными и в полном объеме доступны только заводу-изготовителю. Приблизительные значения нужных параметров известны для электродвигателей общепромышленной серии, отличающихся от крановых меньшим сопротивлением обмоток ротора и меньшим пусковым моментом (т.е. использование параметров двигателей другой серии будет являться причиной ошибки моделирования). В связи с этим замечанием рассмотрим способ получения коэффициентов, учитывающих параметры кранового двигателя:

$$R_e = R_s + R_r K_r^2, \quad (2)$$

где R_s – активное сопротивление обмотки статора, Ом;

R_r – активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора, Ом;

K_r – коэффициент индуктивности ротора;

³ Патент на полезную модель № 41460 U1 Российская Федерация, МПК В66С 23/90. Ограничитель грузоподъемности электрического крана: № 2004118956/22: заявл. 23.06.2004; опубл. 27.10.2004 / Д.Ю. Орлов, Ю.А. Орлов, Ю.Н. Румянцев, А.А. Обгольц; заявитель Томский государственный архитектурно-строительный университет. EDN GWMGDK.

⁴ Патент на полезную модель № 61700 U1 Российская Федерация, МПК В66С 23/90. Ограничитель грузоподъемности электрического крана: № 2006136721/22: заявл. 16.10.2006; опубл. 10.03.2007 / Г.И. Однокопылов, Ю.Н. Дементьев, Д.Ю. Орлов, И.Г. Однокопылов; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский политехнический университет. EDN YZVVAY.

⁵ Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2001. 327 с.: ил. Библиогр.: с. 320. ISBN 5-06-003861-0.

$$R_r = \frac{A_1}{(\beta + \frac{1}{s_K})C_1}, \quad (3)$$

где A_1 , C_1 , β – промежуточные коэффициенты;
 s_K – критическое скольжение;

$$R_s = C_1 R_r \beta; \quad (4)$$

$$A_1 = \frac{3U_f^2(1 - s_H)}{2C_1 k_{M\max} P}, \quad (5)$$

где U_f – фазное напряжение, В;
 s_H – номинальное скольжение;
 $k_{M\max}$ – коэффициент кратности максимального момента;
 P – номинальная мощность электродвигателя, Вт;

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2k_{I_H}}, \quad (6)$$

где I_0 – ток холостого хода электродвигателя, А;
 k_I – коэффициент кратности пускового тока;
 I_H – номинальный ток статора, А;

$$s_K = s_H \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - [1 - 2s_H\beta(k_{\max} - 1)]}}{1 - 2s_H\beta(k_{\max} - 1)}, \quad (7)$$

$$I_0 = \sqrt{\frac{0.5625I_H^2 - [\frac{0.75I_H(1-s_H)}{1-0.75s_H}]^2}{1 - [\frac{0.75I_H(1-s_H)}{1-0.75s_H}]^2}}, \quad (8)$$

$$I_H = \frac{P}{3U\cos(\varphi)\eta}, \quad (9)$$

где $\cos(\varphi)$ – коэффициент мощности электродвигателя;
 η – коэффициент полезного действия (КПД) электродвигателя;

$$K_r = \frac{L_m}{L_r}, \quad (10)$$

где L_m – индуктивность ветви намагничивания, Гн;
 L_r – полная индуктивность цепи ротора, Гн;

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f}, \quad (11)$$

где X_m – индуктивное сопротивление намагничивания, Ом;
 f – частота питающей сети, Гц;

$$X_m = \frac{E_m}{I_0}, \quad (12)$$

где E_m – электродвижущая сила ветви намагничивания, наведенная потоком воздушного

зазора в обмотке статора в номинальном режиме, В;

$$E_m = \sqrt{(U\cos(f) - R_s I_H)^2 + (U\sqrt{1 - \cos(f)^2} - X_s I_H)^2}, \quad (13)$$

где X_s – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, Ом;

$$X_s = 0.42X_{K3}, \quad (14)$$

где X_{K3} – сопротивление короткого замыкания, Ом;

$$X_{K3} = \gamma C_1 R_r, \quad (15)$$

где γ – промежуточный параметр;

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_K^2} - \beta^2}, \quad (16)$$

$$L_r = L_{\sigma r} + L_m, \quad (17)$$

где $L_{\sigma r}$ – индуктивность рассеяния роторной обмотки, приведенной к статорной;

$$L_{\sigma r} = \frac{X_r}{2\pi f}, \quad (18)$$

где X_r – индуктивное сопротивление рассеяния роторной обмотки, приведенное к статорной, Ом;

$$X_r = \frac{0.58X_{K3}}{C_1}, \quad (19)$$

$$L_e = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}, \quad (20)$$

где L_s – полная индуктивность цепи статора, Гн;

$$L_s = L_{\sigma s} + L_m, \quad (21)$$

где $L_{\sigma s}$ – индуктивность рассеяния статорной обмотки;

$$L_{\sigma s} = \frac{X_s}{2\pi f} \quad (22)$$

$$K_m = \frac{3}{2} K_r z_p, \quad (23)$$

где z_p – число пар полюсов электродвигателя;

$$A_r = \frac{R_r}{L_r}. \quad (24)$$

В результате была получена система дифференциальных уравнений в неподвижной системе координат α - β , записанная с помощью преобразования Кларка в нормальной форме Коши:

$$\begin{cases} \frac{di_{s\alpha}(t)}{dt} = \frac{1}{L_e} \cdot [U_{s\alpha}(t) - R_e \cdot i_{s\alpha}(t) + K_r \cdot A_r \cdot \psi_{r\alpha}(t) + K_r \cdot z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\beta}(t)] \\ \frac{di_{s\beta}(t)}{dt} = \frac{1}{L_e} \cdot [U_{s\beta}(t) - R_e \cdot i_{s\beta}(t) + K_r \cdot A_r \cdot \psi_{r\beta}(t) - K_r \cdot z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\alpha}(t)] \\ \frac{d\psi_{r\alpha}(t)}{dt} = R_r \cdot K_r \cdot i_{s\alpha}(t) - A_r \cdot \psi_{r\alpha}(t) - z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\beta}(t) \\ \frac{d\psi_{r\beta}(t)}{dt} = R_r \cdot K_r \cdot i_{s\beta}(t) - A_r \cdot \psi_{r\beta}(t) + z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\alpha}(t) \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J} \cdot \{K_m \cdot [\psi_{r\alpha}(t) \cdot i_{s\beta}(t) - \psi_{r\beta}(t) \cdot i_{s\alpha}(t)] - M_c\} \end{cases}, \quad (25)$$

где $i_{s\alpha}(t)$ – компонент пространственного вектора тока статора фазы α ;

$i_{s\beta}(t)$ – компонент пространственного вектора тока статора фазы β ;

$U_{s\alpha}(t)$ – компонент пространственного вектора напряжения статора фазы α ;

$U_{s\beta}(t)$ – компонент пространственного вектора напряжения статора фазы β ;

$\psi_{r\alpha}(t)$ – компонент пространственного вектора потокосцепления ротора фазы α ;

$\psi_{r\beta}(t)$ – компонент пространственного вектора потокосцепления ротора фазы β ;

$R_e, L_e, R_r, K_r, K_m, A_r$ – коэффициенты, учитывающие параметры электродвигателя;

z_p – количество пар полюсов;

J – момент инерции вала электродвигателя;

M_c – момент сопротивления.

Созданный математический аппарат на основе дифференциальных уравнений дает возможность анализировать поведение кранового электропривода в условиях динамических нагрузок, типичных для работы подъемных механизмов. Особенностью эксплуатации кранового оборудования являются частые кратковременные, но интенсивные механические воздействия, возникающие при преодолении рельсовых стыков, перекладке зазоров зубчатых передач или пусках механизма на номинальной скорости. Эти ударные нагрузки провоцируют скачкообразные изменения крутящего момента, вызывая существенные переходные процессы одновременно в меха-

нической и электрической составляющих привода, что необходимо выявлять и отделять от вновь возникших дефектов, а также отслеживать их увеличение. Анализ подобных режимов особенно важен для понимания реальных рабочих условий крановых механизмов, где периодические ударные воздействия являются нормой эксплуатации.

Для моделирования сопротивления на валу электродвигателя, несмотря на то что нагрузка прикладывается нелинейно, в первом приближении используется кусочно-заданная функция, зависящая от времени $M_c(t)$. С ее помощью на кратковременном отрезке моделируется возникающее сопротивление (скачок) (рисунок 1).

Преобразование трёхфазной системы в двухфазную (α - β -систему) существенно упрощает математическое описание асинхронного двигателя, уменьшая число переменных и исключая избыточные параметры. Такой подход облегчает анализ, сокращает объём вычислений и позволяет использовать современные алгоритмы управления. Кроме того, двухфазная модель обладает универсальностью, позволяя исследовать как симметричные, так и асимметричные режимы работы электродвигателя.

Для визуализации и экспериментальной проверки зависимостей, рассмотренных в предыдущем исследовании, в среде Wolfram Mathematica была разработана математическая модель асинхронного двигателя (АД).

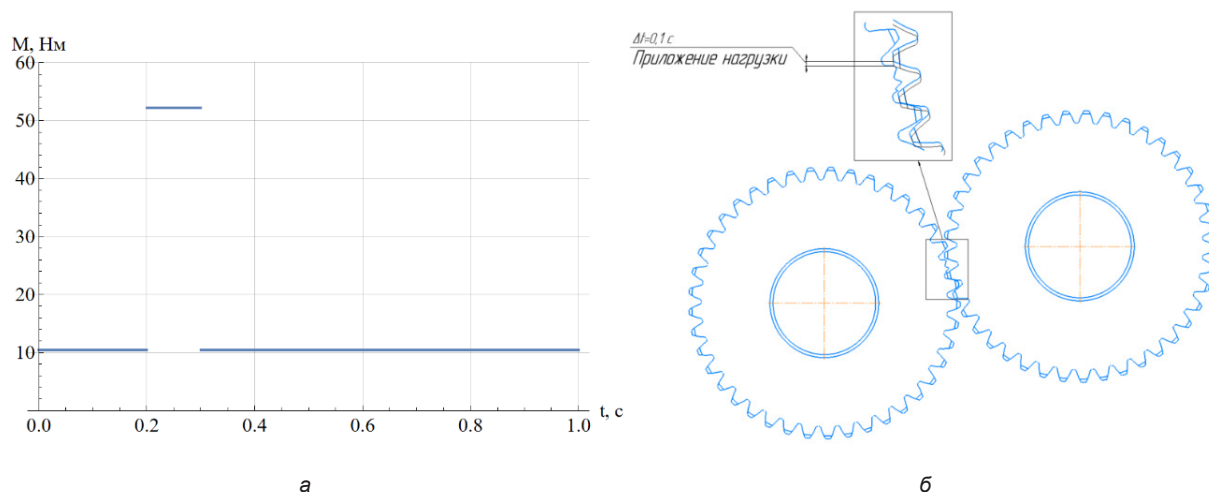


Рисунок 1 – Моделирование нагрузки: а – график кусочно-заданной функции; б – моделирование нагрузки – скол зуба в зубчатой передаче тихоходной ступени редуктора
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Load simulation: a – graph of a piecewise-defined function, b – load simulation – tooth chipping in the gear transmission of the low-speed stage of the reducer
Source: compiled by the authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При теоретическом изучении динамических свойств асинхронного электродвигателя кранового механизма анализируется математическая модель, отображающая его электромеханические процессы. Численное моделирование и проверка адекватности модели выполняются на основе исходных параметров, характерных для промышленного двигателя мощностью 5 кВт (таблица).

Указанные номинальные и рабочие характеристики дают возможность определить параметры системы дифференциальных уравнений и исследовать динамику электропривода в различных эксплуатационных режимах, в том числе при пуске и изменяющейся механической нагрузке.

Для имитации внешнего нагружения используется кусочно-определённая функция, принимающая следующие значения:

$$\begin{aligned} \{M_c = 0,2M_n, \quad t > 0 \\ M_c = M_n, \\ 0,2 \leq t \leq 0,3 \quad M_c = 0,2M_n, \\ t > 0,3. \end{aligned} \quad (26)$$

Численное решение системы дифференциальных уравнений с заданными параметрами позволило выявить характер переходных процессов токов статора (рисунок 2). При исследовании установившегося режима дополнительно был проанализирован вариант с постоянной нагрузкой при $t \geq 0,4$ с, $M_c = M_n$ (рисунок 3), что дало возможность выполнить сравнительный анализ динамических характеристик электродвигателя.

Таблица
Исходные параметры для теоретического расчета
Источник: составлено авторами.

Table
Initial parameters for theoretical calculation
Source: compiled by the authors.

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Мощность	P	5000	Вт
Номинальное линейное напряжение	U_l	380	В
Фазное напряжение	U_f	220	В
Синхронная частота вращения	ω_0	1000	об/мин
Номинальное скольжение	s_n	0.085	-
КПД	η	0.74	-
Коэффициент мощности	$\cos(\varphi)$	0.75	-
Кратность пускового тока	k_I	4.3	-
Кратность пускового момента	k_M	2	-
Кратность максимального момента	k_{Mmax}	2.3	-
Момент инерции ротора	J_d	0.056	кг·м ²
Частота питающей сети	f	50	Гц
Число пар полюсов	z_p	3	-
Номинальный момент электродвигателя	M_n	52	Н·м

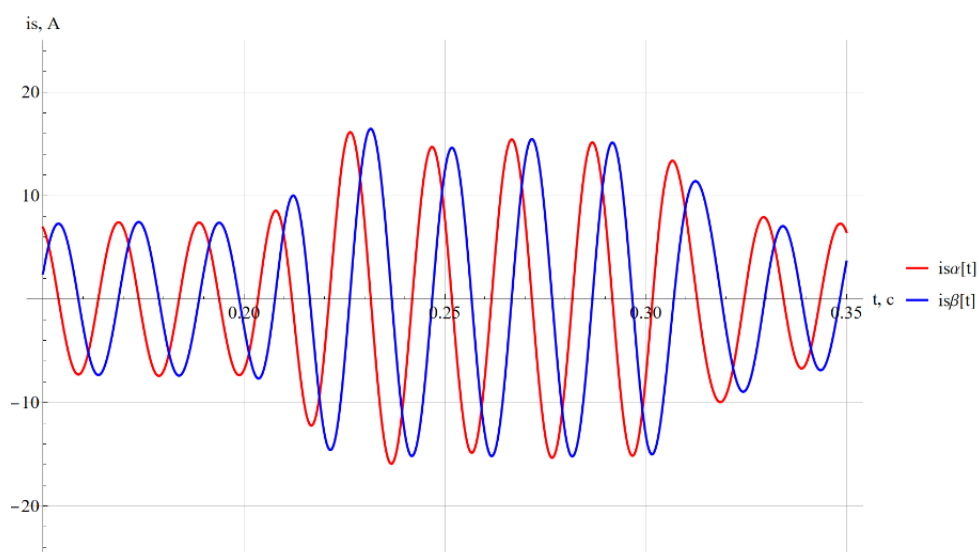


Рисунок 2 – Переходный процесс $i_{s\alpha}(t)$ и $i_{s\beta}(t)$ при кратковременном набросе нагрузки (при $0.2 \leq t \leq 0.3$)
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Transient process $i_{s\alpha}(t)$ and $i_{s\beta}(t)$ during a short-term load surge (at $0.2 \leq t \leq 0.3$)
Source: compiled by the authors.

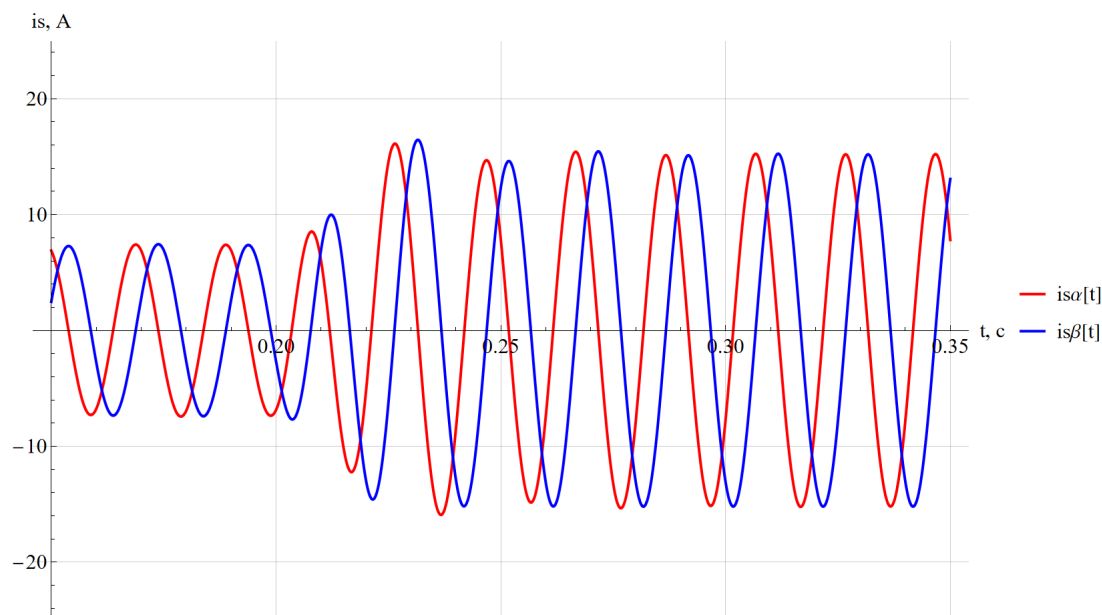


Рисунок 3 – Переходный процесс $i_{sa}(t)$ и $i_{sp}(t)$ при набросе нагрузки (при $t \geq 0,3$). Установившийся режим работы
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Transient process $i_{sa}(t)$ and $i_{sp}(t)$ during load application (at $t \geq 0,3$). Steady state operation.
Source: compiled by the authors.

Сразу после уменьшения момента сопротивления ток статора демонстрирует увеличение периода колебаний, что проявляется в изменении длительности синусоидального цикла (рисунок 4).

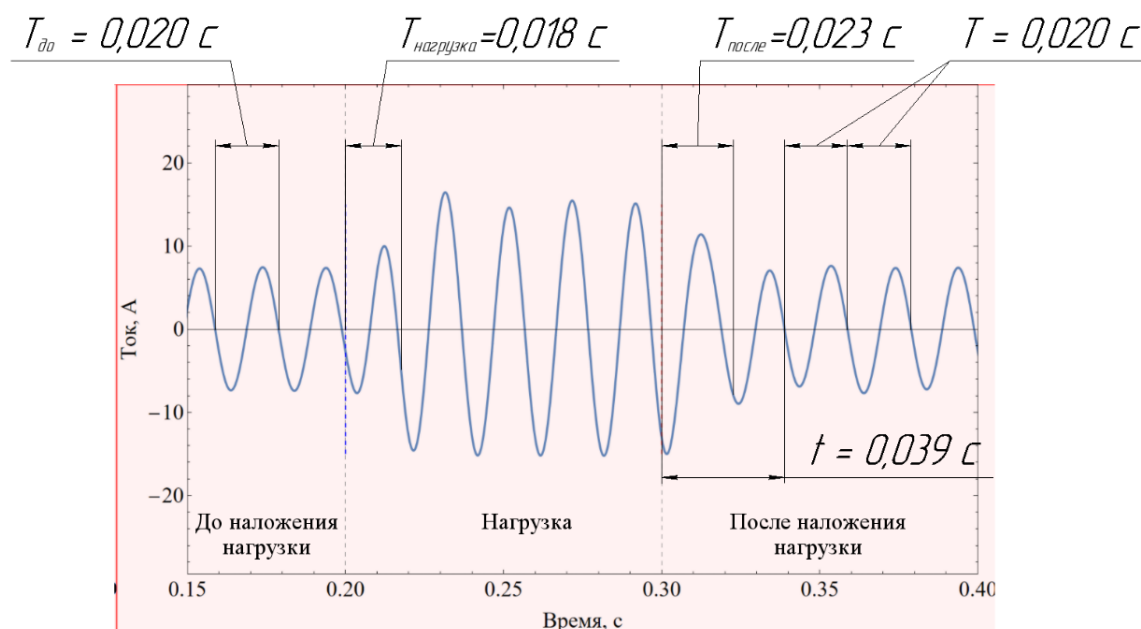


Рисунок 4 – Анализ переходного процесса тока статора $i_{sp}(t)$ при кратковременном набросе нагрузки
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Analysis of the transient process of stator current $i_{sp}(t)$ during a short-term load surge
Source: compiled by the authors.

Экспериментальные исследования демонстрируют существенное влияние импульсной механической нагрузки на колебания статорного тока: при наложении нагрузки период уменьшается с 0,020 до 0,018 с, а после ее снятия возрастает до 0,023 с. Время переходного процесса (при наложении и снятии нагрузки) превышает период колебаний тока в сети (0,039 против 0,020 с), что свидетельствует об ограниченности методики выявления дефектов только на основе измерений тока статора.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диагностика в режиме реального времени крановых механизмов является перспективным направлением развития подъемно-транспортной техники. В качестве одного из основных источников первичной информации может быть использован ток статора, реагирующий на изменение момента (причиной чего, в частности, являются возникающие дефекты) отклонением периода и амплитуды колебаний.

Ограниченность применения данного параметра обусловлена временем переходных процессов, обуславливающих задержку отклика тока статора на изменение момента, пропорциональную двум периодам колебаний питающей сети (для использованного в моделировании кранового двигателя). Таким образом, частота от дефекта, имеющего импульсный характер, приведенного к частоте вращения вала двигателя, принципиально не может быть больше 25 Гц.

Стоит отметить, что вычленение из полной нагрузки на электродвигатель составляющей, причиной которой являются дефекты, и повышение разрешения метода возможно только при использовании дополнительных источников информации о работе крановых механизмов (активная и реактивная мощность, скольжение, усилие на канатах и др.) и их совместной обработке.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Назаров А.Н. Исследования и разработки кафедры РК4 «Подъемно-транспортные системы» для создания современных приборов безопасности грузоподъемной техники // *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*. 2024. № 4. С. 34–40. EDN JIIQKE.
2. Иванов С.Д. Развитие направления «промышленная безопасность подъемных сооружений» на кафедре РК4 «Подъемно-транспортные системы» // *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*. 2024. № 4. С. 11–24. EDN GACZBH.
3. Назаров А.Н., Иванов С.Д. Разработка перспективного прибора безопасности кранов мостового типа // *Вестник СибАДИ*. 2024. Т. 21, № 6(100). С. 826–843. DOI 10.26518/2071-7296-2024-21-6-826-843. EDN TYGGUV.
4. Иванов С.Д., Назаров А.Н. Оценка применимости электрических параметров привода для определения нагрузки на механизм подъема кранов мостового типа // *Вестник СибАДИ*. 2022. Т. 19, № 1(83). С. 36–47. DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47. EDN XZSFJQ.
5. Система защиты мостового крана на основе мониторинга параметров электропривода механизма подъема / Ю.А. Орлов, Ю.Н. Дементьев, Г.И. Однокопылов [и др.] // *Известия Томского политехнического университета*. 2008. Т. 312, № 4. С. 119–124. EDN JRGNRR.
6. Орлов Ю.А., Столяров Д.П., Бурков В.П. Совершенствование системы защиты и контроля технического состояния электромеханической системы крана мостового типа // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011. № 2. С. 363–368. EDN ONBUND.
7. Иванова Н.Ю., Надеженков С.А., Назаров А.Н., Иванов С.Д. Объективная информация о работе подъемно-транспортных машин как основа повышения качества информационных систем грузообрабатывающих предприятий // *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*. 2023. № 2. С. 81–96. EDN MRGIFW.
8. Томаков В.И., Томаков М.В. Состояние промышленной безопасности при эксплуатации грузоподъемных кранов на объектах, подконтрольных Ростехнадзору // *Известия Юго-Западного государственного университета*. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 1(22). С. 27–41. EDN YLIIPX.
9. Никитин К.Д., Крыгина Т.А., Кузнецов А.А. Аварии грузоподъемных кранов как следствие опасных дефектов // *Подъемно-транспортное дело*. 2007. № 6(44). С. 17–21. EDN NJAPLL.
10. Pecinka P., Kocman S., Orsag P., Otypka J. Solutions to Increase the Efficiency of Induction Motors // *International Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2017. Vol. 8. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPE.2017.7967395>
11. Ban Y., Liu C., Yang F., Guo N., Ma X., Sui X., Huang Y. Failure Identification Method of Sound Signal of Belt Conveyor Rollers under Strong Noise Environment. *Electronics* 2024, 13, 34.
12. Liu C., Ban Y., Li H., Guo N., Ma X., Yang F., Sui X., Huang Y. Accurate Recognition Method for Rolling Bearing Failure of Mine Hoist in Strong Noise Environment. *Machines* 2023, 11, 632.
13. Yang S., Xiang D., Bryant A., Mawby P., Ran L., Tavner P. Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, vol. 25, no. 11, pp. 2734–2752. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2049377>.
14. Nahdi T., Maga D. Comparative Study of Frequency Converters for Doubly Fed Induction Machines. *Sustainability*. 2018, 10, 594. <https://doi.org/10.3390/su10030594>

15. Назаров А.Н., Иванов С.Д. Исследование влияния работы ограничителя грузоподъемности с промежуточными порогами на безопасность кранов мостового типа // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2023. № 1. С. 41–52. EDN SZRVVB.

16. Иванов С.Д., Назаров А.Н. Оценка применимости электрических параметров привода для определения нагрузки на механизм подъема кранов мостового типа // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19, № 1(83). С. 36–47. DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47. EDN XZSFJQ.

17. Михалев А.В., Назаров А.Н. Применение алгоритма скользящего среднего для задачи определения массы груза // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2023. № 2. С. 44–57. EDN XLXJRI.

18. Орлов Ю.А., Столяров Д.П., Орлов Д.Ю., Хахив Р.Н. Способ контроля состояния тормоза лебедки с электроприводом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 2. С. 357–362. EDN ONBUNT.

19. Назаров А.Н. Движущее усилие двигателя механизма подъема кранов мостового типа в реальных условиях эксплуатации // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 1(89). С. 34–50. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-34-50>. EDN DJBHGB.

20. Копылов И.П., Амбарцумова Т.Т. Развитие методов и средств макро моделирования электрических машин // Электротехника. 2007. № 8. С. 19–24. EDN KYMUXZ.

21. Santana N.H.B., Oliveira F.D.C., Amorim A.E.A. et al. Enhancing Power Efficiency of Induction Motor with Field-Oriented Control Strategy under Sensor Noise Impact and Overmodulation Prevention. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. 2025; 36: 498–514.

22. Ebadpour M., Jamshidi M., Talla, J., Hashemi-Dezaki H., Peroutka Z. Digital Twin Model of Electric Drives Empowered by EKF. *Sensors*. 2023; 236: 2006. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23042006>

23. Копылов И.П. Обобщенная электрическая машина и обобщенный электромеханический преобразователь // Электротехника. 2008. № 2. С. 50–54. EDN LAFKQR.

REFERENCES

1. Nazarov A.N. Research and development of the RC4 Department «Lifting and transport systems» for the creation of modern safety devices for hoisting machines. *Machines and Plants: Design and Exploiting*. 2024; (4): 34–40. (In Russ.) EDN JIIQKE.

2. Ivanov S.D. Development of the direction «Industrial safety of lifting structures» at the Department of RC4 «Lifting and transport systems». *Machines and Plants: Design and Exploiting*. 2024; (4): 11–24. (In Russ.) EDN GACZBH.

3. Nazarov A.N., Ivanov S.D. Developing an advanced safety device for bridge-type cranes. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(6): 826–843. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-826-843>. EDN TYGGUV

4. Ivanov S.D., Nazarov A.N. Drive electrical parameters applicability evaluation to determine loads on bridge crane lifting mechanism. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19(1): 36–47. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47>

5. Orlov Yu.A., Dementiev Yu.N., Odnokopylov G.I. Bridge crane protection system based on monitoring the parameters of the electric drive of the lifting mechanism. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2008; Vol. 312, No. 4: 119–124. (In Russ.) EDN JRGNNR.

6. Orlov Yu.A., Stolyarov D.P., Burkov V.P. Improvement of the protection and control system for the technical condition of the electromechanical system of a bridge crane. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2011; No. S2: 363–368. (In Russ.) EDN ONBUND.

7. Ivanova N.Yu., Ivanov S.D., Nadezhenkov S.A., Nazarov A.N. Objective information about the operation of lifting and transport machines as a basis for improving the quality of information systems of cargo handling enterprises. *Machines and Plants: Design and Exploiting*. 2023; (2): 81–96. (In Russ.)

8. Tomakov V.I., Tomakov M.V. The state of industrial safety at operation of load-lifting cranes at facilities controlled by rostekhnadzor. *Izvestiia Ugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Tehnika i tehnologii*. 2017; Vol. 7, No. 1(22); 27–41. (In Russ.) EDN YLIIPX.

9. Nikitin K.D., Krygina T.A., Kuznetsov A.A. Accidents involving lifting cranes as a result of dangerous defects. *Lifting and Transport Business*. 2007; 6(44): 17–21. (In Russ.) EDN NJAPLL.

10. Pecinka P., Kocman S., Orsag P., Otypka J. Solutions to Increase the Efficiency of Induction Motors. *International Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2017; Vol. 8: 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPE.2017.7967395>

11. Ban Y., Liu C., Yang F., Guo N., Ma X., Sui X., Huang Y. Failure Identification Method of Sound Signal of Belt Conveyor Rollers under Strong Noise Environment. *Electronics*. 2024; 13: 34.

12. Liu C., Ban Y., Li H., Guo N., Ma X., Yang F., Sui X., Huang Y. Accurate Recognition Method for Rolling Bearing Failure of Mine Hoist in Strong Noise Environment. *Machines*. 2023; 11: 632.

13. Yang S., Xiang D., Bryant A., Mawby P., Ran L., Tavner P. Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2010; vol. 25, no. 11: 2734–2752. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2049377>.

14. Nahdi, T., Maga, D. Comparative Study of Frequency Converters for Doubly Fed Induction Machines. *Sustainability*. 2018; 10: 594. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10030594>

15. Nazarov A.N., Ivanov S.D. Influence of capacity limiter operation with tripping thresholds on the overhead cranes safety. *Machines and Plants: Design and Exploiting*. 2023; 1(1): 41–52. (In Russ.)

16. Ivanov S.D., Nazarov A.N. Drive electrical parameters applicability evaluation to determine loads on bridge crane lifting mechanism. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19(1): 36–47. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47>

17. Mikhalev A.V., Nazarov A.N. Applying the moving average algorithm for the weight calculation task. *Machines and Plants: Design and Exploiting*. 2023; (2): 44–57. (In Russ.)

18. Orlov Yu.A., Stolyarov D.P., Orlov D.Yu., Kakhiev R.N. Method for monitoring the condition of an electric winch brake. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2011; S2: 357–362. (In Russ.) EDN ONBUMT.

19. Nazarov A.N. Motor driving force of bridge-type crane lifting mechanism under real operating use. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(1): 34–50. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-34-50>

20. Kopylov I.P., Ambartsumova T.T. Development of methods and means of macromodeling of electric machines. *Electrical engineering*. 2007; 8: 19–24. (in Russ.) EDN KYMUXZ.

21. Santana N.H.B., Oliveira F.D.C., Amorim A.E.A. et al. Enhancing Power Efficiency of Induction Motor with Field-Oriented Control Strategy under Sensor Noise Impact and Overmodulation Prevention. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. 2025; 36: 498–514.

22. Ebadpour M., Jamshidi M., Talla, J., Hashemi-Dezaki H., Peroutka Z. Digital Twin Model of Electric Drives Empowered by EKF. *Sensors*. 2023; 236: 2006. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23042006>

23. Kopylov I.P. Generalized electric machine and generalized electromechanical converter. *Electrical Engineering*. 2008; 2: 50–54. (in Russ.) EDN LAFKQR.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Иванов С.Д. Вклад в общую работу заключается в постановке цели и задач исследования, анализа результатов математического моделирования, подготовке текста статьи.

Йылмаз М.Ю. Вклад в общую работу заключается в разработке математической модели, ана-

лиза результатов математического моделирования, подготовке текста статьи.

CO-AUTHORS' CONTRIBUTION

S.D. Ivanov Contribution to the entire work made through setting the research goals and objectives, analyzing the results of mathematical modeling, and preparing the text of the manuscript.

M.Yu. Yilmaz Developing a mathematical model, analyzing the results of mathematical modeling, and writing the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванов Сергей Дмитриевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7912-609X>,

SPIN-код: 8035-2780,

e-mail: ptm-diagnostics@yandex.ru

Йылмаз Михаил Юминович – аспирант кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7246-4116>,

SPIN-код: 9311-4187,

e-mail: mihailosolovev287@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey D. Ivanov – Associate Professor, Department of Hoisting and Transport Systems, Bauman Moscow State Technical University (2nd Baumanskaya St., 5, bldg. 1, Moscow, 105005).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7912-609X>,

SPIN code: 8035-2780,

e-mail: ptm-diagnostics@yandex.ru

Mikhail Y. Yilmaz – Postgraduate Student, Department of Hoisting and Transport Systems, Bauman Moscow State Technical University (2nd Baumanskaya St., 5, bldg. 1, Moscow, 105005).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7246-4116>,

SPIN code: 9311-4187,

e-mail: mihailosolovev287@gmail.com

Научная статья
УДК 625.08:624.131
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-524-539>
EDN: OJIOLE



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИБРОВАЛЬЦА С ДЕФОРМИРУЕМЫМ ГРУНТОМ ПРИ УПЛОТНЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЛОЁВ АВТОДОРОГИ

С.В. Савельев, И.К. Потеряев ✉, Г.Г. Бурый

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

✉ ответственный автор
ilya_poter@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена моделированию процесса взаимодействия вибровальца с деформируемым грунтом при уплотнении технологических слоев автодороги. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения качества и долговечности земляного полотна автомобильных и железно-дорожных дорог, что напрямую зависит от эффективности уплотнения грунтов.

Методы и материалы. Приводятся исследования с помощью метода математического моделирования колебательной системы «вибровалец катка – деформируемая среда». Система включает в себя взаимодействующие между собой элементы, обладающие жесткими и вязкими свойствами. Эти свойства соответствуют реологическим характеристикам рабочего органа катка и деформируемой им среды. Модель основана на системе дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих взаимодействие масс вибровальца и грунтовой среды с учетом их упруго-пластических и вязкостных свойств.

Результаты. Представлены впервые полученные зависимости коэффициента вязкого трения и жесткости деформируемого грунта от влияния внешней деформирующей силы. На основе этих данных решается система дифференциальных уравнений движения колеблющихся масс, позволяющая определить средние значения виброускорений в объеме уплотняемого грунта. Впервые предложена функциональная зависимость, уточняющая массу активно деформируемого грунта в зависимости от параметров вибрации, геометрических характеристик вальца и типа грунта.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования рациональной частоты колебаний вибровозбудителя и других режимных параметров дорожных катков, что способствует повышению эффективности транспортного строительства. Усовершенствованная математическая модель взаимодействия вибровальца катка с деформируемым грунтом даёт возможность определить величины виброускорений частиц деформируемого грунта. Результаты исследования могут быть использованы для повышения эффективности дорожно-строительной техники, в частности при проектировании дорожных катков.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: каток, уплотнение, грунт, вибровалец, коэффициент уплотнения, автомобильная дорога, жесткость, вибровозбудитель, виброускорение, уплотнение

Статья поступила в редакцию 19.03.2025; одобрена после рецензирования 27.04.2025; принята к публикации 22.08.2025.

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: Савельев С.В., Потеряев И.К., Бурый Г.Г. Моделирование процесса взаимодействия вибровальца с деформируемым грунтом при уплотнении технологических слоёв автодороги // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 4. С. 524-539. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-524-539>

© Савельев С.В., Потеряев И.К., Бурый Г.Г., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-524-539>

EDN: OJLOE

MODELING THE PROCESS OF INTERACTION BETWEEN VIBRATORY ROLLER AND DEFORMABLE SOIL DURING COMPACTION OF ROAD TECHNOLOGICAL LAYERS

S.V. Savelyev, I.K. Poteyaev ✉, G.G. Buryi

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

✉ corresponding author
ilya_poter@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The article is devoted to modeling the process of interaction between a vibratory roller and deformable soil during compaction of technological layers of a highway. The relevance of the study is determined by the need to improve the quality and durability of the earth bed of roads and railroads, which directly depends on the efficiency of soil compaction.

Methods and Materials. The research using the method of mathematical modeling of the oscillating system “roller vibration roller - deformable medium” is presented. The system includes interacting elements possessing rigid and viscous properties. These properties correspond to the rheological characteristics of the working body of the roller and the medium deformed by it. The model is based on the system of second-order differential equations describing the interaction between the masses of the vibratory roller and the ground medium taking into account their elastic-plastic and viscous properties.

Results. For the first time relations between viscous friction coefficient and stiffness of deformed soil on the influence of external deforming force have been presented. On the basis of these data the system of differential equations of motion of oscillating masses has been considered, which allows determining average values of vibration accelerations in the volume of compacted soil. A functional dependence specifying the mass of actively deformed soil depending on vibration parameters, geometric characteristics of the roller and soil type has been proposed for the first time.

Discussion and conclusion. The obtained results can be used to substantiate the rational frequency of vibration exciter vibrations and other mode parameters of road rollers, which helps to improve the efficiency of transportation construction. The improved mathematical model of interaction between the roller's vibrating roller blade and deformed soil makes it possible to determine the values of vibration accelerations of particles of deformed soil. The results of the study can be used to improve the efficiency of road-building machinery, in particular, in the design of road rollers.

KEYWORDS: roller, compaction, soil, vibratory drum, compaction coefficient, road, rigidity, vibration exciter, vibration acceleration, compaction

The article was submitted: March 19, 2025; approved after reviewing: April 27, 2025; accepted for publication: August 22, 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. Savelyev S.V., Poteyaev I.K., Buryi G.G. Modeling the process of interaction between vibratory roller and deformable soil during compaction of road technological layers. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (4): 524-539. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-524-539>

© Savelyev S.V., Poteyaev I.K., Buryi G.G., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Развитие дорожно-транспортной инфраструктуры в современных условиях требует постоянного повышения качества и долговечности инженерных сооружений, среди которых ключевую роль играют земляное полотно автомобильных дорог и другие насыпи инженерного назначения. Надежность и устойчивость этих элементов дорожной сети напрямую связаны с качеством уплотнения грунтов. Этот фактор оказывает значительное влияние на прочность, стабильность и срок службы не только самого земляного полотна, но и возводимых на нем инженерных сооружений.

Актуальность развития дорожно-транспортной инфраструктуры требует повышения интенсивности строительства и обеспечения качества всех технологических слоёв автомобильной дороги и слоёв земляного полотна в частности. Повышение эксплуатационных характеристик этих сложных инженерных сооружений зависит от качества уплотнения грунтов земляного полотна, которое является ответственным основанием для всех верхних слоёв автодороги. Данный фактор непосредственно влияет на устойчивость, работоспособность и долговечность основания дороги – земляного полотна и верхних технологических слоёв: щебёночных оснований и дорожного полотна. Причём вышесказанное относится не только к автодорогам, но и к железнодорожным и другим грунтовым насыпям инженерных сооружений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения исследований будем использовать метод математического моделирования и программные инструменты – программные продукты Microsoft Excel, Mat Cad. Методы математического моделирования физических процессов подразумевают принятия ряда определённых допущений, в нашем случае рассмотрим:

- масса вальца m_2 , включает не только массу самого вальца, но и часть массы катка и рамы, приходящиеся на него;
- деформируемый грунт принимается сплошной упруговязкопластичной средой, с которой валец активно взаимодействует по всей толщине уплотняемого слоя;
- валец не отрывается от поверхности грунта (режим вибротрамбования не рассматривается);
- основание, на котором расположен уплотняемый слой грунта, считается абсолютно жестким;
- рассматривается система с сосредоточенными параметрами.

Рабочий орган вибрационного катка, взаимодействующий с деформируемым грунтом, – это сложная колебательная система, требующая определенного описания для происходящих в ней процессов. В приведенных исследованиях она представляет собой два колеблющихся массивных элемента, связанных между собой элементами вязкости и жесткости^{1,2,3}, характеризующими реологические свойства рабочего органа катка и деформируемой грунтовой среды (рисунок) [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

¹ Fratta D., Kim K.-S. Effective Depth of Soil Compaction in Relation to Applied Compactive Energy. University of Wisconsin – Madison, WisDOT ID no. 0092–08–11 February 2015.

² Kopf F., Paulmichl I., Adam D. Modelling and simulation of heavy tamping dynamic response of the ground // From Research to Design in European Practice, Bratislava, Slovak Republic, June 2–4. – 2010.

³ Головин О.В. Вибрационные машины // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: сборник докладов, Белгород, 20–21 мая 2024 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. С. 48–52

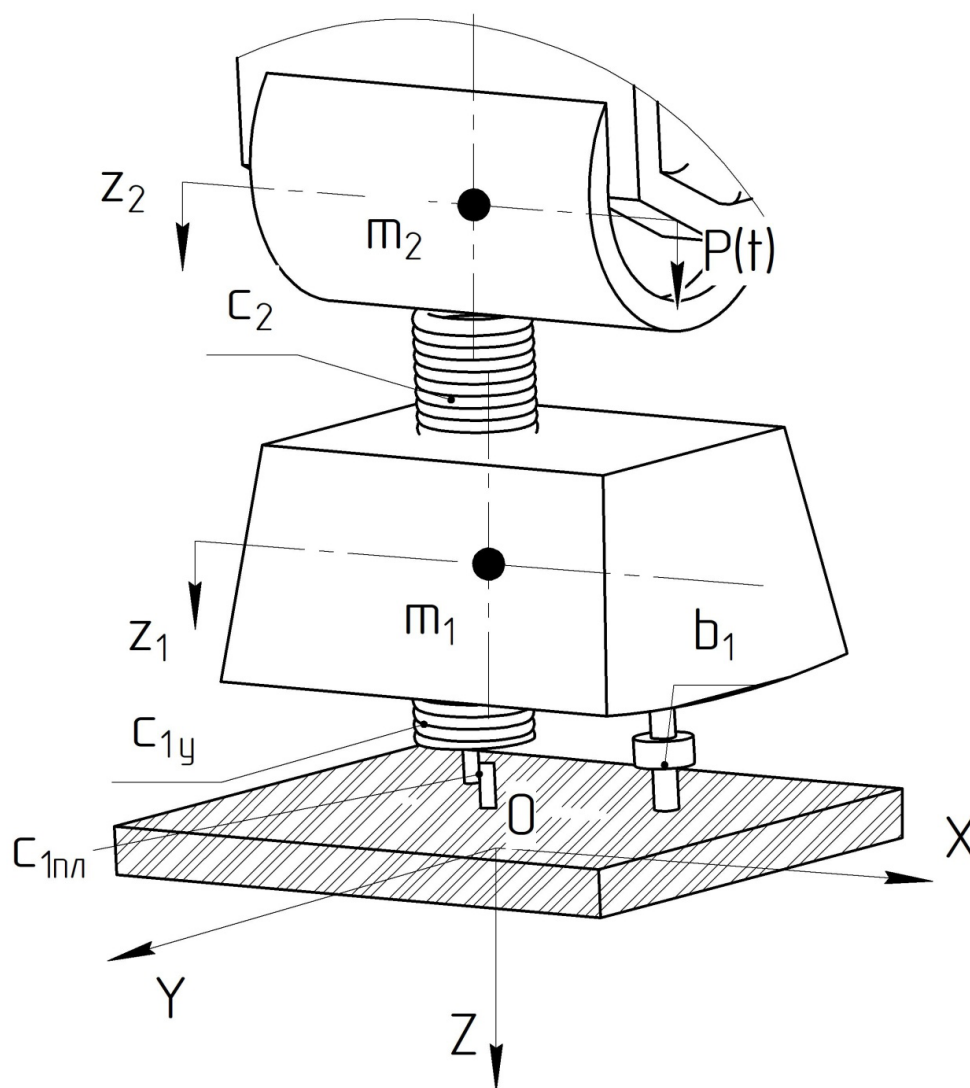


Рисунок – Колебательная система «вибровалец катка – деформируемая среда»
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Model of the oscillatory system «roller vibratory drum – deformable soil»
Source: compiled by the authors.

На рисунке b_1 – коэффициент, характеризующий вязкость грунтовой среды, Н·с/м; c_2 – коэффициент, характеризующий жесткость рабочего органа; c_{1y} и $c_{1пл}$ – коэффициенты, характеризующие упруго-пластичные деформации среды, Н/м; m_2 – масса, приходящаяся на рабочий орган катка; m_1 – масса деформируемой грунтовой среды; P – периодическая сила от вибровозбудителя вальца, Н; z_1 и z_2 – относительное смещение колеблющихся масс, соответственно.

Определение коэффициента, характеризующего упруго-пластичные свойства грунтовой среды

$$c_1 = \frac{c_{1y} \cdot c_{1пл}}{c_{1y} + c_{1пл}} = \frac{E_y \cdot E_{пл}}{E_y + E_{пл}} \cdot \frac{S}{h}, \quad (1)$$

где $E_{пл}$ – модуль пластических деформаций грунта, МПа; E_y – модуль упругой деформации грунта, МПа; S – площадь отпечатка контакта вибровальца на грунте, м²; h – толщина слоя деформируемого грунта, м.

Величину коэффициента, характеризующего вязкость грунта b_1 , можно определить как

$$b_1 = \eta \cdot \frac{S}{h}, \quad (2)$$

где η – показатель динамической вязкости грунта, П.

Разработанный модельный подход опирается на теоретические исследования в области математического и физического моделирования процесса уплотнения таких учёных, как О.А. Савинова, М. Новака, Д.Д. Баркана, О.Я. Шехтера, описывающих взаимодействие колеблющихся масс дифференциальными уравнениями второго порядка [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]:

$$\begin{cases} m_2 a_2 + c_2 (z_2 - z_1) = P \cos \omega t + m_2 g; \\ m_1 a_1 + b_1 \dot{z}_1 + c_1 z_1 + c_2 (z_1 - z_2) = m_1 g, \end{cases} \quad (3)$$

где m_i – взаимодействующие массы колебательной системы, кг; ω – частота угловых колебаний вибровозбудителя, рад/с; t – время контакта вальца с грунтом, с; c_1 – коэффициенты, характеризующие упруго-пластичные деформации грунтовой среды, Н/м; c_2 – коэффициент, характеризующий жесткость вибровальца, Н/м [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28].

Определим вынуждающую силу вибровозбудителя P :

$$P = m_d r_d \cdot \omega^2, \quad (4)$$

где $m_d r_d$ – дебалансный момент вибровозбудителя, кг·м.

Определим угловую частоту колебаний ω :

$$\omega = 2\pi \cdot f, \quad (5)$$

где f – частота колебаний вибровозбудителя, Гц.

Новой доработкой существующих математических моделей, описывающих подобные колебательные процессы, является введение в модель функциональной зависимости (6), которая учитывает изменение массы активно деформируемого грунта от текущего момента процесса уплотнения, массо-геометрических характеристик вальца и параметров вибрации, что является оригинальным фактором, уточняющим достоверность и точность результатов при использовании представленной матмодели:

$$m_1 = f(f, P, B, R, m_2, K_y, \text{тип грунта}), \quad (6)$$

где P – вынуждающая сила вибровозбудителя, Н; f – частота колебаний вибровозбудителя,

Гц; B – ширина вибровальца, м; R – радиус вибровальца, м; m_2 – масса, приходящаяся на вибрационный рабочий орган катка, кг; K_y – коэффициент, характеризующий степень уплотнения грунта.

Новую, впервые полученную зависимость для определения массы уплотняемого грунта в зоне активного действия вибрации получили в виде

$$m_1 = \rho \cdot \left(\frac{1}{3} h \cdot ((B + 2h \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot (d + 2h \cdot \operatorname{tg} \beta) + \sqrt{d \cdot B \cdot (B + 2h \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot (d + 2h \cdot \operatorname{tg} \beta)} + d \cdot B) \right), \quad (7)$$

где ρ – плотность грунта, кг/м³; h – толщина уплотняемого слоя грунта в зоне активного действия вибрации, м; α и β – углы распространения зоны активного действия вибрации от пятна контакта, град; B – ширина вальца, м; d – длина дуги пятна контакта вальца с грунтом, м.

Углы распространения зоны активного действия вибрации составили при уплотнении связного грунта: $\alpha=5^\circ$, $\beta=14^\circ$; несвязного грунта: $\alpha=8^\circ$, $\beta=18^\circ$.

Общим решением для данной системы дифференциальных уравнений будет сумма для частного решения уравнений колебательной системы и общего решения однородных уравнений. Общее решение характеризуется слагаемым, которое соответствует свободным колебаниям системы с собственной. Второе слагаемое характеризуется вынужденными колебаниями масс системы с частотой вынуждающей силы вибровозбудителя [29, 30, 31, 32, 33, 34, 35].

$z_1 = z_1(t)$, $z_2 = z_2(t)$, $t \in (0, T)$, где T – период.

Данные решения системы в полной мере удовлетворяют исходным данным

$$z_1(0)=0, \quad \dot{z}_1(0) = 0; \quad (8)$$

$$z_2(0)=0, \quad \dot{z}_2(0) = 0. \quad (9)$$

При средних значениях параметров системы решим задачу Коши [36, 37, 38].

Сложим почленно все уравнения системы (3) и выразим их как $a_2(t)$, через $z_1(t)$ определим производные этой функции.

$$m_2(a_2 - g) + m_1(a_1 - g) + b_1 \dot{z}_1 + c_1 z_1 = P \cos \omega t; \quad (10)$$

$$m_2(a_2 - g) = -m_1(a_1 - g) - b_1 \dot{z}_1 - c_1 z_1 + P \cos \omega t; \quad (11)$$

$$m_2 a_2 = -m_1 a_1 - b_1 \dot{z}_1 - c_1 z_1 + P \cos \omega t + m_2 g + m_1 g; \quad (12)$$

$$a_2 = -\frac{m_1}{m_2} a_1 - \frac{b_1}{m_2} \dot{z}_1 - \frac{c_1}{m_2} z_1 + \frac{P \cos \omega t}{m_2} + \frac{m_1 + m_2}{m_2} g. \quad (13)$$

Определим $\ddot{z}_2$.

$$\ddot{z}_2 = -\frac{m_1}{m_2} \ddot{z}_1 - \frac{b_1}{m_2} \dot{a}_1 - \frac{c_1}{m_2} \dot{z}_1 - \frac{P}{m_2} \omega \sin \omega t. \quad (14)$$

Произведя дифференцирование второго уравнения системы (3) дважды, получим

$$m_1 \ddot{z}_1 + b_1 \ddot{z}_1 + c_1 a_1 + c_2 (a_1 - a_2) = 0. \quad (15)$$

Проведём преобразованиеданного выраженияпри помощи равенств (13), (15) в дифференциальное уравнение четвертого порядка относительно функции $z_1(t)$:

$$\ddot{z}_1 + \left(\frac{b_1}{m_1} \right) \ddot{z}_1 + \left(\frac{c_1}{m_1} \right) a_1 + \left(\frac{c_2}{m_1} \right) a_1 - \left(\frac{c_2}{m_1} \right) a_2 = 0; \quad (16)$$

$$\ddot{z}_1 + \left(\frac{b_1}{m_1} \right) \ddot{z}_1 + \left(\frac{c_1}{m_1} \right) a_1 + \left(\frac{c_2}{m_1} \right) a_1 - \left(\frac{c_2}{m_1} \right) \cdot \left(-\frac{m_1}{m_2} a_1 - \frac{b_1}{m_2} \dot{z}_1 - \frac{c_1}{m_2} z_1 + \frac{P \cos \omega t}{m_2} + \frac{m_1 + m_2}{m_2} g \right) = 0; \quad (17)$$

$$\ddot{z}_1 + \left(\frac{b_1}{m_1} \right) \ddot{z}_1 + \left(\frac{c_1}{m_1} \right) a_1 + \left(\frac{c_2}{m_1} \right) a_1 + \frac{c_2}{m_2} a_1 + \frac{c_2}{m_1} \frac{b_1}{m_2} \dot{z}_1 + \frac{c_2}{m_1} \frac{c_1}{m_2} z_1 - \frac{c_2}{m_1} \frac{P \cos \omega t}{m_2} - \frac{c_2}{m_1} \frac{m_1 + m_2}{m_2} g = 0; \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
& \overset{IV}{z_1} + \left(\frac{b_1}{m_1} \right) \overset{\bullet\bullet\bullet}{z_1} + \left(\frac{c_1}{m_1} + \frac{c_2}{m_2} \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1} \right) \dot{a}_1 + \left(\frac{b_1}{m_1} \frac{c_2}{m_2} \right) \dot{z_1} + \\
& + \frac{c_1}{m_1} \frac{c_2}{m_2} z_1 = \frac{P}{m_1} \frac{c_2}{m_2} \cos \omega t + \frac{c_2}{m_2} \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1} g.
\end{aligned} \quad (19)$$

Преобразуем полученные уравнения в соответствии с теоремой о структуре решения дифференциальных уравнений, имеющих специальный вид правой части [36, 37]:

$$z_1(t) = z_1^0(t) + z_1^*(t), \quad (20)$$

где $z_1^0(t)$ – общее решение для однородного дифференциального уравнения, соответствующего (18), а $z_1^*(t)$ – это его частное решение (19).

Выявим $z_1^0(t)$ однородного дифференциального уравнения

$$\overset{IV}{z_1} + \bar{A} \overset{\bullet\bullet\bullet}{z_1} + \bar{B} \dot{a}_1 + \bar{C} \dot{z_1} + \bar{D} z_1 = 0 \quad (21)$$

представим характеристическое уравнение

$$F(e) = e^4 + \bar{A} e^3 + \bar{B} e^2 + \bar{C} e + \bar{D} = 0; \quad (22)$$

$$\bar{A} = \frac{b_1}{m_1}; \quad (23)$$

$$\bar{B} = \frac{c_1}{m_1} + \frac{c_2}{m_2} \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1}; \quad (24)$$

$$\bar{C} = \frac{b_1}{m_1} \frac{c_2}{m_2}; \quad (25)$$

$$\bar{D} = \frac{c_1}{m_1} \frac{c_2}{m_2}. \quad (26)$$

Известно, что многочлен четвертой степени $e^4 + \bar{A} e^3 + \bar{B} e^2 + \bar{C} e + \bar{D}$ имеет два комплексных сопряженных и два действительных различных корня [36, 37].

В равносильном виде представим уравнение (21)

$$e = f(e) = -\frac{\bar{D}}{\bar{C}} - \frac{1}{\bar{C}} e^4 - \frac{\bar{A}}{\bar{C}} e^3 - \frac{\bar{B}}{\bar{C}} e^2. \quad (27)$$

Используем метод итераций, где в качестве первого приближения корня примем

$$e_1^{(1)} = -\frac{\bar{D}}{\bar{C}}. \quad (28)$$

Вычисляем дальнейшие приближения

$$e_1^{(n)} = f(e_1^{(n-1)}). \quad (29)$$

Известно [29], если функция $f(e)$ определяется и дифференцируется на определённом отрезке $[\bar{a}, \bar{b}]$ и $|f'(e)| < 1$ при $\bar{a} < e < \bar{b}$, тогда процесс итерации $e_1^{(n)} = f(e_1^{(n-1)})$, $n=1,2,\dots$ сходится независимо от исходного значения $e_1^{(1)} \in [\bar{a}, \bar{b}]$, а предельное значение $e_1 = \lim_{n \rightarrow \infty} e_1^{(n)}$ будет являться единственным корнем уравнения $e = f(e)$ на определённом отрезке $[\bar{a}, \bar{b}]$ [36, 37].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Найдено частное решение уравнения (21), т.к. уточнение корней не имеет особого практического значения, при $e_1 = e_1^{(1)} + p$ получим

$$z_1^{(1)}(t) = u^{e_1 t} = u^{(e_1^{(1)} + p)t} = u^{e_1^{(1)} t} \cdot u^{pt} = u^{e_1^{(1)} t}, \quad (30)$$

где p – стремится к бесконечности.

Правая часть выражения (22) разлагается по методу Тейлора в экстремуме точки $e_1^{(1)}$. Запишем более удобную форму уравнения:

$$F(e) = F(e_1^{(1)}) + \frac{F'(e_1^{(1)})}{1}(e - e_1^{(1)}) + \frac{F''(e_1^{(1)})}{2!}(e - e_1^{(1)})^2 + \\ + \frac{F'''(e_1^{(1)})}{3!}(e - e_1^{(1)})^3 + \frac{F^{IV}(e_1^{(1)})}{4!}(e - e_1^{(1)})^4 = 0. \quad (31)$$

Представив $F(e_1^{(1)}) \approx 0$, разделив (31) на $e - e_1^{(1)}$ выявленный многочлен, получим выражение

$$\hat{f}(e) = e^3 + \tilde{A}e^2 + \tilde{B}e + \tilde{C} = 0, \quad (32)$$

где $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}$ – выявленные коэффициенты полученного многочлена, приведённые к стандартному виду.

Изучим ситуацию, когда многочлен имеет лишь один действительный и два сопряженных комплексных корня [36].

Рассмотрим корни полученного уравнения

$$\begin{cases} e_2 + e_3 + e_4 = -\tilde{A}; \\ e_2(e_3 + e_4) + e_3e_4 = \tilde{B}; \\ e_2 \cdot e_3 \cdot e_4 = -\tilde{C}. \end{cases} \quad (33)$$

и значения корней $e_2, e_{3,4} = j_1 \pm i \cdot j_2$.

Запишем общее решение уравнения (20) с учётом всех преобразований:

$$z_1^0(t) = U_1 u^{e_1 t} + U_2 u^{e_2 t} + U_3 u^{j_1 t} \cos(j_2 \cdot t) + U_4 u^{j_1 t} \sin(j_2 \cdot t). \quad (34)$$

Рассмотрим частное решение $z_1^*(t)$ для правой части уравнения (20).

$$\begin{aligned} & {}^{IV} z_1 + \left(\frac{b_1}{m_1} \right) \ddot{\ddot{z}}_1 + \left(\frac{c_1}{m_1} + \frac{c_2}{m_2} \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1} \right) \dot{a}_1 + \\ & + \left(\frac{b_1}{m_1} \frac{c_2}{m_2} \right) \dot{z}_1 + \frac{c_1}{m_1} \frac{c_2}{m_2} z_1 = \\ & = \frac{P}{m_1} \frac{c_2}{m_2} \cos \omega t + \frac{c_2}{m_2} \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1} g; \end{aligned} \quad (35)$$

$$z_1^*(t) = M \cos \omega t + N \sin \omega t + \bar{L}. \quad (36)$$

Получены производные $z_1^*(t)$.

$$\dot{z}_1^*(t) = -M \omega \sin \omega t + N \omega \cos \omega t; \quad (37)$$

$$a_1^*(t) = -M \omega^2 \cos \omega t - N \omega^2 \sin \omega t; \quad (38)$$

$$\ddot{\ddot{z}}_1^*(t) = M \omega^3 \sin \omega t - N \omega^3 \cos \omega t; \quad (39)$$

$${}^{IV} z_1^*(t) = M \omega^4 \cos \omega t + N \omega^4 \sin \omega t. \quad (40)$$

Используя выражения (37) и производные $Z_1^*(t)$ до четвертого порядка в уравнении (20), запишем

$$\begin{aligned}
 & + \left(\frac{c_1}{m_1} + \frac{c_2}{m_2} \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1} \right) (-M\omega^2 \cos \omega t - N\omega^2 \sin \omega t) + \\
 & + \left(\frac{b_1}{m_1} \frac{c_2}{m_2} \right) (-M\omega \sin \omega t + N\omega \cos \omega t) + \\
 & + \left(\frac{c_1}{m_1} \frac{c_2}{m_2} \right) \left(M \cos \omega t + N \sin \omega t + \bar{L} \right) = \\
 & = \frac{P}{m_1} \frac{c_2}{m_2} \cos \omega t + \frac{c_2}{m_2} \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1} g;
 \end{aligned} \tag{41}$$

$$\begin{aligned}
 & M\omega^4 \cos \omega t + N\omega^4 \sin \omega t + A M\omega^3 \sin \omega t - A N\omega^3 \cos \omega t - \\
 & - \bar{B} M\omega^2 \cos \omega t - \bar{B} N\omega^2 \sin \omega t - \bar{C} M\omega \sin \omega t + \\
 & + \bar{C} N\omega \cos \omega t + \bar{D} M \cos \omega t + \bar{D} N \sin \omega t + \bar{L} \bar{D} = \\
 & = \frac{P}{m_1} \frac{c_2}{m_2} \cos \omega t + \frac{c_2}{m_2} \frac{m_1 + m_2}{m_1} g = \\
 & = \bar{\mu} \cdot \cos \omega t + \bar{\eta} \cdot \sin \omega t + \frac{c_2}{m_2} \frac{m_1 + m_2}{m_1} g;
 \end{aligned} \tag{42}$$

$$\bar{\mu} = \frac{P}{m_1} \frac{c_2}{m_2}; \tag{43}$$

$$\bar{\eta} = 0; \tag{44}$$

$$\bar{\eta} = \bar{\eta}(\omega). \tag{45}$$

Сравнивая тригонометрические многочлены в исследуемых выражениях, определим

$$\bar{L} \bar{D} = \frac{c_2}{m_2} \frac{m_1 + m_2}{m_1} g. \tag{46}$$

Определяем неявные коэффициенты M и N для системы двух линейных уравнений:

$$\begin{cases} M(\omega^4 - \bar{B}\omega^2 + \bar{D}) + N(-\bar{A}\omega^3 + \bar{C}\omega) = \bar{\mu}; \\ M(\bar{A}\omega^3 - \bar{C}\omega) + N(\omega^4 - \bar{B}\omega^2 + \bar{D}) = 0. \end{cases} \quad (47)$$

Используя метод Крамера, получаем

$$M = \frac{s_M}{s}; \quad (48)$$

$$N = \frac{s_N}{s}. \quad (49)$$

$$\begin{aligned} s &= \begin{vmatrix} \omega^4 - \bar{B}\omega^2 + \bar{D} & -(\bar{A}\omega^3 - \bar{C}\omega) \\ \bar{A}\omega^3 - \bar{C}\omega & \omega^4 - \bar{B}\omega^2 + \bar{D} \end{vmatrix} = \\ &= \left(\omega^4 - \bar{B}\omega^2 + \bar{D}\right)^2 + \left(\bar{A}\omega^3 - \bar{C}\omega\right)^2 > 0; \end{aligned} \quad (50)$$

$$s_M = \begin{vmatrix} \bar{\mu} & -(\bar{A}\omega^3 - \bar{C}\omega) \\ 0 & \omega^4 - \bar{B}\omega^2 + \bar{D} \end{vmatrix} = \bar{\mu}(\omega^4 - \bar{B}\omega^2 + \bar{D}); \quad (51)$$

$$s_N = \begin{vmatrix} \omega^4 - \bar{B}\omega^2 + \bar{D} & \bar{\mu} \\ \bar{A}\omega^3 - \bar{C}\omega & 0 \end{vmatrix} = -\bar{\mu}(\bar{A}\omega^3 - \bar{C}\omega). \quad (52)$$

Включим M , N , $\bar{L}$ в (52) [36].

Определим константы интегрирования с учётом начальных условий для общего решения выражения. Анализируем задачу $U_3 = U_4 = 0$.

Определим решение уравнения (20)

$$z_1(t) = U_1 u^{(1)} e^{i_1 t} + U_2 u^{(2)} e^{i_2 t} + M \cos \omega t + N \sin \omega t + \bar{L}. \quad (53)$$

Значения вибрационных ускорений массы уплотняемого грунта $a_1(t)$ и вибрационного вальца $a_2(t)$ определится дифференцированием (53) дважды:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1(t) &= e_1^{(1)} \cdot U_1 u^{e_1^{(1)}t} + e_2 \cdot U_2 u^{e_2 t} - \\ &- M \cdot \omega \cdot \sin \omega t + N \cdot \omega \cdot \cos \omega t; \end{aligned} \quad (54)$$

$$\begin{aligned} a_1(t) &= e_1^{(1)2} \cdot U_1 u^{e_1^{(1)}t} + e_2^2 \cdot U_2 u^{e_2 t} - \\ &- M \cdot \omega^2 \cdot \cos \omega t - N \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t. \end{aligned} \quad (55)$$

Определим $a_2(t)$ по формуле

$$\begin{aligned} a_2(t) &= -\frac{m_1}{m_2} \cdot \\ &\cdot \left(e_1^{(1)2} \cdot U_1 u^{e_1^{(1)}t} + e_2^2 \cdot U_2 u^{e_2 t} - M \cdot \omega^2 \cdot \cos \omega t - N \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t \right) - \\ &- \frac{b_1}{m_2} \cdot \left(e_1^{(1)} \cdot U_1 u^{e_1^{(1)}t} + e_2 \cdot U_2 u^{e_2 t} - M \cdot \omega \cdot \sin \omega t + N \cdot \omega \cdot \cos \omega t \right) - \\ &- \frac{c_1}{m_2} \cdot \left(U_1 u^{e_1^{(1)}t} + U_2 u^{e_2 t} + M \cos \omega t + N \sin \omega t + \bar{L} \right) + \\ &+ \frac{P \cos \omega t}{m_2} + \frac{m_1 + m_2}{m_2} g. \end{aligned} \quad (56)$$

Окончательное решение для выявления величины виброускорений может быть найдено с использованием программных продуктов Microsoft Excel, Maple, Mathcad [39].

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая, что собственные колебания рассматриваемой системы зависят от начальных условий и быстро затухают с течением времени, рассмотрим частное решение для системы дифференциальных уравнений при установившихся вынужденных колебаниях. Определим значение виброускорений массы деформируемой грунтовой среды [29].

В соответствии с исследованиями известных учёных Д.Д. Баркана и Н.Я. Хархуты критерий эффективности процесса вибрацион-

ного деформирования грунтовой среды—это значения величины виброускорений активной массы грунтовой среды. А общеизвестный физический закон ускорения частиц колеблющегося грунта – это вторая производная по времени от смещения частиц грунта при его деформировании и напрямую влияет на интенсивность деформирования грунтовой среды и на полученную степень уплотнения грунтовой среды.

Усовершенствованная математическая модель взаимодействия вибровальца катка с деформируемым грунтом даёт возможность определить величины виброускорений частиц деформируемого грунта. Анализ их значений позволяет выявить экстремумы этих функций при максимально интенсивном накоплении

пластических деформаций и определить условия, при которых они возникают. А условиями в нашем случае являются технологические и режимные параметры вибрационных катков, при которых они показывают максимальную производительность и эффективность.

Экстремумы функций значений виброускорений определяются по результатам построенных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) в результате реализации построенной математической модели в программных средах Maple, Mathcad. Они соответствуют максимальным значениям (максимальная величина виброускорений колебаний грунта на АЧХ) виброускорениям массы m_1 . Именно эти условия отвечают максимально интенсивному накоплению пластических деформаций грунта.

Научные исследования проводятся в соответствии с научным заданием по гранту Российского научного фонда (РНФ) и Минпрома развития Омской области, тема № 23-29-10010 «Разработка дорожных катков для повышения эффективности транспортного строительства с учетом региональных условий Омской области».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тюремнов И.С. Анализ технических характеристик различных типов ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин // Вестник СибаДИ. Т. 20, № 6(94). С. 706–716. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>. EDN IGOKXE.
2. Шабанова Г.И., Савельев С.В., Бурый Г.Г. Математическое описание колебательной системы «вибрационный рабочий орган – грунт» // Вестник СибаДИ. 2013. № 3(31). С. 102–107. EDN QAMUGF.
3. Fervers C.W. Improved FEM simulation model for tire–soil interaction // Journal of Terramechanics. 2004. Vol. 41. pp. 87–100.
4. Клигунова З.А., Шишкин Е.А., Клигунов Е.С. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния грунта в процессе уплотнения дорожным катком // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2024. № 25. С. 67–72. DOI: <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-25-67-72>. EDN SGRHRN
5. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Моделирование взаимодействия вибрационного вальца дорожного катка с уплотняемым грунтом // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2024. № 26. С. 60–67. DOI: <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-26-60-67>. EDN LAOAAY.
6. Михеев В.В., Угрюмов И.А., Раздобарин Б.А. Принципы повышения эффективности уплотняющих дорожно-строительных машин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 10. С. 663–668. DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-10-663-664>. EDNASTIYX
7. Feng Jia, Jie Zhang, Jianjun Shen, Liangfan Wu, Sinuo Ma. Compaction quality assessment of road subgrades using explainable deep graph learning framework // Computers and Geotechnics. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106795>.
8. Feng Jia, Fangtao Dong, Sinuo Ma, Jianjun Shen, Zhen Liu. Vibratory compaction characteristics of the subgrade under cyclical loading based on finite element simulation // Construction and Building Materials. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135378>.
9. Yuan Ma, Wei Lu, Ying-cheng Luan, Tao Ma, Chuan-le Wang. Research on global optimization mechanism of intelligent compaction parameters of soil subgrade based on difference method // Journal of Building Engineering. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108381>.
10. Мотова М.И., Шалфеев В.Д. От теории колебаний – к нелинейной динамике // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22, № 1. С. 93–103. DOI: <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2014-22-1-93-103>. EDNSWKELJ
11. Qinwu Xu, George K. Chang. Evaluation of intelligent compaction for asphalt materials // Automation in Construction. 2013. Pp. 104–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.015>
12. Ma Y. et al. Intelligent compaction: An improved quality monitoring and control of asphalt pavement construction technology // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2021. Т. 23. № 9. Pp. 14875–14882.
13. Xu C. et al. Compaction of subgrade by high-energy impact rollers on an airport runway // Journal of performance of constructed facilities. 2014. Т. 28. № 5. Pp. 04014021.
14. Stepien J, Chomicz-Kowalska A, Tutaj-Dudala M, Dudala M, Maciejewski K, Ramiaczek P, Iwanski MM. Influence of Compaction Methods on Properties of Roller-Compacted Concrete Pavement Wearing Surfaces. Materials. 2025; 18(3): 492. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18030492>.
15. Shi M. et al. Accelerated earth-rockfill dam compaction by collaborative operation of unmanned roller fleet // Journal of Construction Engineering and Management. 2022. Т. 148. № 7. Pp. 04022046.
16. Jiao Y. et al. A switched servo constraints control for the smart vibratory roller in unmanned compaction // Automation in Construction. 2023. Т. 152. Pp. 104883.
17. Савельев С.В., Сачук Ю.С., Литовченко Р.Е. Обоснование параметров вибрационного пневмошинного катка для уплотнения грунтов при строительстве автодорог // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2023. № 2(73). С. 33–39. EDN GYZEFE.
18. Jonsson, A. Modelling, simulation and experimental investigation of a rammer compactor

machine // Department of Mechanical Engineering Blekinge Institute of Technology, Sweden, 2001. 24 p.

19. Зеленков Г.А., Каратаева Н.Г. Математическое моделирование в процессе формирования профессиональных компетенций // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10, № 5-2. С. 76–79. EDN UHGVPF.

20. Савельев С.В., Михеев В.В., Сачук Ю.С. Эффективность использования вибрации в пневмошинных дорожных катках при устройстве автомобильных дорог // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 12. С. 640–644. DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-12-640-641>. EDN XVSTAZ.

21. Yao Y.P. et al. Research on a real-time monitoring platform for compaction of high embankment in airport engineering // Journal of Construction Engineering and Management. 2018. Т. 144. № 1. С. 04017096.

22. Zhang X. et al. Algorithm for optimal path planning of impact roller in high-embankment airport // Japanese Geotechnical Society Special Publication. 2020. Т. 8. № 5. С. 159–163.

23. Kuenzel R. et al. SmartSite: Intelligent and autonomous environments, machinery, and processes to realize smart road construction projects // Automation in Construction. 2016. Т. 71. pp. 21–33.

24. Вялов С.С. Некоторые проблемы механики грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1970. № 2. С. 10–13. EDN YTDLLN.

25. Тюремнов И.С., Шорохов Д.А. Моделирование взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 2(96). С. 202–216. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216>. EDN BSOEFX.

26. Тюремнов И.С., Игнатьев А.А., Филатов И.С. Статистический анализ технических характеристик грунтовых вибрационных катков // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2014. № 3(34). С. 81–88. EDN STVNAD.

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

28. Jianhua Li, Xuefei Wang, Jiale Li, Jianmin Zhang, Guowei Ma. A generative adversarial learning strategy for spatial inspection of compaction quality // Advanced Engineering Informatics. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102791>.

29. Савельев С.В. Повышение эффективности динамического уплотнения грунтов вибрационными катками при строительстве транспортных объектов // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. № 1. С. 229–236. EDN WZZQTH.

30. Novak M., Han, Y.C. Impedances of soil layer with boundary zone // Journal of Geotechnical Engineering. 1990. V.16. №6. P. 1008–1014.

31. Novak M., Mitwally H. Random response of offshore towers with pile-soil-pile interaction // Journal of Offshore Mechanics & Arctic Engineering, Transact. 1990. V.112. P. 35–41.

32. Савельев С.В., Литовченко Р.Е., Юрченко А.А. Параметры отпечатка контакта перспективного рабочего органа дорожного катка с опорной поверхностью при уплотнении дорожных материалов // Вестник СибАДИ. 2023; 20(4): 432–442. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-432-442>. EDN: EETOYC

33. Mikheyev V.V. New type of vibration generator with vibratory force 326 oriented in preferred direction // Journal of Vibrational Engineering and Technologies. 2018. Vol. 6. No 2. pp. 149–154. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-018-0025-4>.

34. Шишкин Е.А. Метод расчета фазового угла между вынуждающей силой вибровозбудителя и перемещением вальца // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 3(97). С. 388–394. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-388-394>. EDN HQAJCW

35. Савельев С.В., Потеряев И.К., Араева О.А., Нигметова К.К. Моделирование взаимодействия вибрационных катков с уплотняемой средой в транспортном строительстве // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9. С. 14–16. DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-9-14-15>. EDN ZJBHPJ

36. Савельев С.В., Потеряев И.К., Раздобарин Б.А. Производительность дорожных катков при уплотнении земляных насыпей автодорог // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2024. № 3(150). С. 90–100. EDN SBIATO.

37. Савельев С.В., Михеев В.В., Иванова Ю.П. К вопросу о повышении эффективности вибрационных дорожных катков // Строительные и дорожные машины. 2023. № 2. С. 12–14. EDN JAZJWP.

38. Речицкий А.С., Речицкий С.В. Сравнительный анализ уплотнения дорожными катками с различными рабочими органами // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2024. № 1(12). С. 79–85. DOI: https://doi.org/10.52170/2712-9195_2024_1_79. EDN FINDAC

REFERENCES

1. Tyuremnov I.S. Technical parameters analyses of different types of impact-vibration soil compaction machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(6): 706–716. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>. EDN: IGOKXE

2. Shabanova G.I., Savel'ev S.V., Buryj G.G. Mathematical description of oscillating system "vibrating working body - ground". *Vestnik SibADI*. 2013; 3(31): 102–107. EDN QAMUGF.

3. Fervers C.W. Improved FEM simulation model for tire-soil interaction. *Journal of Terramechanics*. 2004; Vol. 41: 87–100.

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

5. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Modeling of interaction between road roller vibrating drum and soil being compacted. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2024; 26: 60–67. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-26-60-67>. EDN LAOAAY.
6. Mikheyev V.V., Ugryumov I.A., Razdobarin B.A. Principles of efficiency enhancement for the performance of road-building compaction machines. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU)*. 2024; 10: 663–668. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-10-663-664>. EDN AS-TIYX.
7. Feng Jia, Jie Zhang, Jianjun Shen, Liangfan Wu, Sinuo Ma. Compaction quality assessment of road subgrades using explainable deep graph learning framework. *Computers and Geotechnics*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106795>.
8. Feng Jia, Fangtao Dong, Sinuo Ma, Jianjun Shen, Zhen Liu. Vibratory compaction characteristics of the subgrade under cyclical loading based on finite element simulation. *Construction and Building Materials*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135378>.
9. Yuan Ma, Wei Lu, Ying-cheng Luan, Tao Ma, Chuan-le Wang. Research on global optimization mechanism of intelligent compaction parameters of soil subgrade based on difference method. *Journal of Building Engineering*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108381>.
10. Motova M.I., Shalfeev V.D. From theory of oscillations to nonlinear dynamics. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2014; T. 22, No 1: 93–103. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2014-22-1-93-103>. – EDN SWKELJ.
11. Qinwu Xu, George K. Chang. Evaluation of intelligent compaction for asphalt materials. *Automation in Construction*. 2013; 104–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.015>.
12. Ma Y. et al. Intelligent compaction: An improved quality monitoring and control of asphalt pavement construction technology. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021; T. 23. No 9: 14875–14882.
13. Xu C. et al. Compaction of subgrade by high-energy impact rollers on an airport runway. *Journal of performance of constructed facilities*. 2014; T. 28. No 5: 04014021.
14. Stepień J., Chomicz-Kowalska A., Tutaj-Dudala M., Dudala M., Maciejewski K., Ramiaczek P., Iwanski M.M. Influence of Compaction Methods on Properties of Roller-Compacted Concrete Pavement Wearing Surfaces. *Materials*. 2025; 18(3): 492. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18030492>.
15. Shi M. et al. Accelerated earth-rockfill dam compaction by collaborative operation of unmanned roller fleet. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2022; 148. no 7: 04022046.
16. Jiao Y. et al. A switched servo constraints control for the smart vibratory roller in unmanned compaction. *Automation in Construction*. 2023; T. 152: 104883.
17. Savel'ev S.V., Sachuk Ju.S., Litovchenko R.E. Justification of parameters of vibrating pneumatic tire roller for soil compaction during road construction. *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2023; 2(73): 33–39. (In Russ.) EDN GYZEFE.
18. Jonsson, A. Modelling, simulation and experimental investigation of a rammer compactor machine. *Department of Mechanical Engineering Blekinge Institute of Technology, Sweden*, 2001: 24.
19. Zelenkov G.A., Karataeva N.G. Mathematical modeling in the process of formation of professional competencies. *The Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2014; T. 10, No 5-2: 76–79. (In Russ.) EDN UHGVPF.
20. Savel'ev S.V., Miheev V.V., Sachuk Ju.S. The effectiveness of the use of vibration in pneumatic tire road rollers in the construction of highways. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU)*. 2023; 12: 640–644. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-12-640-641>. EDN XVSTAZ.
21. Yao Y. P. et al. Research on a real-time monitoring platform for compaction of high embankment in airport engineering. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2018. T. 144. no 1: 04017096.
22. Zhang X. et al. Algorithm for optimal path planning of impact roller in high-embankment airport. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*. 2020; T. 8. no 5: 159–163.
23. Kuenzel R. et al. SmartSite: Intelligent and autonomous environments, machinery, and processes to realize smart road construction projects. *Automation in Construction*. 2016; T. 71: 21–33.
24. Vjalov S.S. Some problems of soil mechanics. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1970; 2: 10–13. (In Russ.) EDN YDILLN.
25. Tyuremnov I.S., Shorohov D.A. Vibrating roller with compacted soil interaction modelling. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(2): 202–216. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216>. EDN: BSOEFX
26. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A., Filatov I.S. Statistical analysis of technical characteristics of soil vibratory rollers. *Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014; 3(34): 81–88. (In Russ.) EDN STVNAD.
27. Xuefei Wang, Xiangdong Li, Jiale Li, Jianmin Zhang, Guowei Ma. Training strategy and intelligent model for in-situ rapid measurement of subgrade compactness. *Automation in Construction*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105581>.
28. Jianhua Li, Xuefei Wang, Jiale Li, Jianmin Zhang, Guowei Ma. A generative adversarial learning strategy for spatial inspection of compaction quality. *Advanced Engineering Informatics*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102791>.
29. Savel'ev S.V. Increasing the efficiency of dynamic soil compaction by vibrating rollers during construction of transportation facilities. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin*. 2016; 1: 229–236. (In Russ.) EDN WZZQTH.
30. Novak M., Han Y.C. Impedances of soil layer with boundary zone. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1990; V.I 16. No 6: 1008–1014.

31. Novak M., Mitwally H. Random response of offshore towers with pile-soil-pile interaction. *Journal of Offshore Mechanics & Arctic Engineering, Transact.* 1990; V.12: 35–41.

32. Saveliev S.V., Litovchenko R.E., Yurchenko A.A. Perspective contact imprint parameters of road roller working body with bearing surface when compacting road materials. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2023; 20(4): 432–442. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-432-442>. EDN: EETOYC

33. Mikheyev V.V. New type of vibration generator with vibratory force 326 oriented in preferred direction. *Journal of Vibrational Engineering and Technologies.* 2018; Vol. 6. No 2: 149–154. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-018-0025-4>.

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

35. Savel'ev S.V., Poterjaev I.K., Agaeva O.A., Nigmatova K.K. Modeling the interaction of vibratory rollers with compacted medium in transport construction. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU).* 2024; 9: 14–16. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-9-14-15>. EDN: ZJBHPJ.

36. Savelyev S.V., Poteryaev I.K., Razdobarin B.A. Road roller performance in the highway earth embankment compacting. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering.* 2024; 3 (150): 90–100 (in Russ.). EDN: SBIATO

37. Savelyev S.V., Mikheev V.V., Ivanova Yu.P. To the question of improving the efficiency of vibrating road rollers. *Construction and Road Machines.* 2023; 2: 12–14. (In Russ.) EDN: JAZJWP.

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

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Савельев С.В. Разработка модели и анализ результатов (34%).

Потеряев И.К. Проведение обзора (33%).

Бурый Г.Г. Разработка модели (33%).

CONTRIBUTIONS CO-AUTHORS

S.V. Savelyev Development of the model and analysis of results (34%)

I.K. Poteryaev Literature review (33%)

G.G. Bury Development of the model (33%)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Савельев Сергей Валерьевич – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского госу-

дарственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 5).

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

Scopus Author: 57159787800,

Researcher ID: A-4081-2019,

SPIN-код: 4135-8370,

e-mail: saveliev_sergval@mail.ru

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

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

Scopus Author: 57203586410,

Researcher ID: W-7052-2018,

SPIN-код: 3684-9850,

e-mail: poteryaev_ik@mail.ru

Бурый Григорий Геннадьевич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Автомобильный транспорт» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5008-9176>,

Scopus Author: 57211267070,

Researcher ID: E-3422-2019,

SPIN-код: 4216-0384,

e-mail: buryy1989@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey V. Saveliev – Dr. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Prof. of the Department «Operation of oil, gas and construction equipment», Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

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

Scopus Author: 57159787800,

Researcher ID: A-4081-2019,

SPIN-code: 4135-8370,

e-mail: saveliev_sergval@mail.ru

Ilya K. Poteryaev – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor, head of the department «Operation of oil, gas and construction equipment», Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

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

Scopus Author: 57203586410,

Researcher ID: W-7052-2018,

SPIN-code: 3684-9850,

e-mail: poteryaev_ik@mail.ru

Grigory G. Bury – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Automobile Transport Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5008-9176>,

Scopus Author: 57211267070,

Researcher ID: E-3422-2019,

SPIN-код: 4216-0384,

e-mail: buryy1989@bk.ru

Научная статья
УДК 621.873.1
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-540-553>
EDN: JRJPER



ВЛИЯНИЕ ДЕТАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ СЪЕМНОГО ГРУЗОЗАХВАТНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИЧЕСКОГО РАСЧЁТА МОСТОВОГО КРАНА

А.В. Синельщиков

Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева,
г. Астрахань, Россия
Laex@bk.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Обеспечение безопасности при эксплуатации грузоподъемных кранов, особенно на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ) при транспортировке опасных грузов, таких как отработавшие тепловыделяющие сборки, требует высокой точности расчетов несущих конструкций. Существующие подходы к моделированию не всегда учитывают влияние детализации съемных грузозахватных приспособлений (СГП) на общую картину напряженно-деформированного состояния крана. Целью данного исследования является оценка влияния уровня детализации конечно-элементной модели СГП типа траверсы на гибком подвесе на сходимость и точность результатов статического расчета мостового крана.

Материалы и методы. Исследование проводилось на примере задачи транспортировки контейнеров ТУК-13 мостовым краном с использованием траверсы на гибком подвесе. Разработаны и проанализированы три варианта расчетно-статической модели (РСМ) крана, различающиеся способом моделирования СГП: 1) представление нагрузки от СГП и груза сосредоточенными массами (весом); 2) использование детализированной модели СГП с грузом с жесткими соединениями элементов; 3) применение детализированной модели СГП с грузом с учетом шарнирных соединений. Для каждой из трех моделей был выполнен статический расчет тремя различными методами: линейный статический анализ, статический расчет с учетом Р-Д и статический расчет с учетом Р-Д и больших перемещений.

Выводы. Сравнительный анализ показал, что учет гибких элементов подвеса и шарнирных соединений в конструкции СГП требует учета Р-Д эффекта и больших перемещений, для адекватного описания деформированного состояния системы «кран-СГП-груз». Линейные методы и упрощенные модели СГП могут приводить к существенным погрешностям. Выбор уровня детализации РСМ и метода расчета оказывает значительное влияние на достоверность получаемых результатов.

Рамки исследования и возможность последующего использования. Результаты применимы к статическому анализу мостовых кранов с гибкими подвесами и сложными СГП. В дальнейшем возможно расширение исследования на динамические режимы работы и другие типы СГП.

Практическое значение. Полученные выводы важны для инженерной практики при проектировании и проведении поверочных расчетов мостовых кранов, позволяя выбрать рациональное сочетание уровня детализации модели и метода расчета для обеспечения требуемой точности и безопасности.

Оригинальность и ценность. Новизна работы заключается в систематическом сравнении влияния как уровня детализации модели СГП (от сосредоточенных масс до детализированной модели с шарнирами), так и различных методов статического расчета на результаты для крана с гибким подвесом. Результаты будут полезны инженерам-конструкторам, расчетчикам и специалистам по безопасности, работающим с грузоподъемным оборудованием в ответственных отраслях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мостовой кран, съёмное грузозахватное приспособление, объект использования атомной энергии, расчетно-статическая модель, статический расчет, Р-Д эффект, большие перемещения, сходимость методов, детализация модели

Статья поступила в редакцию 28.04.2025; одобрена после рецензирования 23.06.2025; принята к публикации 22.08.2025.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

© Синельщиков А.В., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Синельщиков А.В. Влияние детализации модели съемного грузозахватного приспособления на результаты статического расчёта мостового крана // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 4. С. 540-553. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-540-553>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-540-553>

EDN: JRJPER

INFLUENCE OF REMOVABLE LOAD-HANDLING ATTACHMENT MODEL DETAILING ON OVERHEAD CRANE STATIC CALCULATION RESULTS

Alexey V. Sinelshchikov

Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev

Astrakhan, Russia

Laex@bk.ru

ABSTRACT

Introduction. Ensuring the operational safety of cargo lifting cranes, especially at nuclear power facilities when transporting hazardous loads such as spent fuel assemblies, requires high precision in the calculation of load-bearing structures. Existing modeling approaches do not always consider the influence of the detailing of removable load-handling attachments (RLHAs) on the overall stress-strain state of the crane. The objective of this study is to assess the influence of the finite element model's level of detail for a traverse type RLHA on a flexible suspension on the convergence and accuracy of the static calculation results for an overhead crane.

Materials and Methods. The study was conducted using the case of transporting TUK-13 containers with an overhead crane equipped with a traverse on a flexible suspension. Three variants of the crane's computational static model (CSM) were developed and analyzed, varying in the way the RLHA was modeled: 1) representation of the load from the RLHA and cargo as lumped masses (weight); 2) use of a detailed model of the RLHA with cargo, featuring rigid element joints; 3) application of a detailed model of the RLHA with cargo, taking into account hinged joints. For each of the three models, a static analysis was performed using three different methods: linear static analysis, static analysis considering the P - Δ effect, and static analysis paying attention to both the P - Δ effect and large displacements.

Conclusions. The comparative analysis showed that accounting for flexible suspension elements and hinged joints in the RLHA design requires consideration of the P - Δ effect and large displacements to adequately describe the deformed state of the "crane-RLHA-cargo" system. Linear methods and simplified RLHA models can lead to significant inaccuracies. The choice of the detailing level of RLHA and the calculation method significantly affects the reliability of the obtained results.

Research Scope and Future Use. The results are applicable to the static analysis of overhead cranes with flexible suspensions and complex RLHAs. Further research could be extended to dynamic operating modes and other types of RLHAs.

Practical Significance. The obtained information is important for engineering practice in the design and verification of overhead cranes' calculation, enabling the selection of a rational balance between the model's level of detail and the computing method to ensure the required accuracy and safety.

Originality and Value. The novelty of this work lies in the systematic comparison of the influence of both the RLHA model's level of detail (from lumped masses to a detailed model with hinged joints) and various static analysis methods on the results for a crane with a flexible suspension. The results will be useful for design engineers, stress-strain analysts, and safety specialists working with lifting equipment in critical industries.

KEYWORDS: overhead crane, removable load-handling attachment, nuclear power facilities, computational static model, static analysis, P -Delta effect, large displacements, convergence of methods, model detailing

The article was submitted: April 28, 2025; approved after reviewing: June 23, 2025; accepted for publication: August 22, 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.

© Sinelshchikov A.V., 2025



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

For citation. Sinelshchikov A.V. Influence of removable load-handling attachment model detailing on overhead crane static calculation results. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (4): 540-553. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-540-553>

ВВЕДЕНИЕ

Грузоподъемные краны играют важную роль в современной промышленности, обеспечивая эффективное пространственное перемещение материалов и изделий на всех этапах производственного цикла. Они являются неотъемлемой частью строительства, монтажа технологического оборудования, обслуживания производственных цехов, складов и логистических центров. Согласно статистике¹, происходит ежегодный рост эксплуатируемых подъемных сооружений, при этом доля подъемных сооружений, которые исчерпали нормативный срок службы, составляет приблизительно 50%. В промышленном производстве наибольшее распространение получили мостовые краны и кран-балки, которые отличаются высокой производительностью, способностью обслуживать значительные площади и адаптироваться к различным технологическим процессам.

Традиционно проектирование и расчетное обоснование грузоподъемных кранов сосредоточено на обеспечении их прочности и устойчивости при воздействии эксплуатационных нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации. Основное внимание уделяется анализу напряженно-деформированного состояния (НДС) металлоконструкций крана при подъеме и перемещении грузов в пределах установленной грузоподъемности [1]. Этот подход регламентируется рядом нормативных документов, устанавливающих требования к расчету и конструированию грузоподъемных кранов с целью обеспечения безопасности их эксплуатации, таких как ГОСТ 34017–2016², ФНП «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения»³.

В некоторых случаях стандартных расчетов на эксплуатационные нагрузки может быть недостаточно [2, 3]. Повышенные требования предъявляются к грузоподъемным кранам, выполняющим ответственные операции или включенным в технологические операции на опасных производствах⁴, например, при транспортировке опасных грузов, работе кранов над сложным и ответственным оборудованием, в условиях повышенной сейсмичности или вблизи взрывоопасных объектов [4]. Разрушение (падение) такого крана может привести к крупным авариям с тяжелыми экологическими, социальными и экономическими последствиями. Для таких кранов необходимо учитывать дополнительные факторы, влияющие на их надежность и безопасность.

Важно отметить, что падение кранов общепромышленного использования, не связанных с опасными производствами, также может приводить к человеческим жертвам и значительному материальному ущербу. Это подчеркивает необходимость рассматривать вопросы безопасности грузоподъемных кранов на всех этапах их жизненного цикла, от проектирования и изготовления до эксплуатации и технического обслуживания.

Определение адекватной степени детализации расчетной модели является ключевым аспектом при выполнении прочностных расчетов грузоподъемных кранов [5, 6]. Перед проектировщиком стоит научно-техническая задача поиска рационального компромисса, поскольку повышение детализации, способствуя более полному учету физических эффектов и повышению достоверности результатов, неизбежно сопряжено с усложнением расчетной модели и увеличением вычислительных и временных затрат. В то же время чрезмерное упрощение ведет к получению

¹ Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2023 году [Электронный ресурс] / Ростехнадзор. Электрон. дан. Москва, 2024. Режим доступа: [https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/Годовой отчет 2023.pdf](https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/Годовой%20отчет%202023.pdf). (дата обращения: 20.01.2025).

² ГОСТ 34017–2016 Краны грузоподъемные. Классификация режимов работы (с Поправкой) – Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2017. 21 с.

³ Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» (в ред. от 12.04.2016). СПб.: Изд-во ДЕАН, 2016. 160 с.

⁴ Синельщиков А.В., Панасенко Н.Н. Нормативно-техническая база обеспечения сейсмостойкости грузоподъемных кранов на ОИАЭ // Инновационное развитие подъемно-транспортной техники: материалы Всерос. науч.-практ. конф. (26–27 мая 2022 г., Брянск) / под ред. К.А. Гончарова. Брянск: БГТУ, 2022. С. 167–180.

некорректных результатов и существенной недооценке напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции, что недопустимо с точки зрения безопасности [7, 8, 9]. Таким образом, оптимальная расчетная модель должна с достаточной достоверностью описывать реальное поведение конструкции, оставаясь при этом вычислительно эффективной [10].

Выбор конкретного уровня детализации определяется совокупностью факторов, включающих как объективные ограничения, такие как доступные вычислительные ресурсы и временные рамки проекта, так и цель самого анализа, тип и назначение крана. Например, для кранов общепромышленного назначения часто применяются упрощенные подходы, тогда как оборудование для опасных производств требует более детального моделирования. Аналогично для предварительной оценки расчетных характеристик крана может использоваться упрощенная модель, в то время как для детального анализа НДС требуется более точная [11]. Для управления этой сложностью в инженерной практике сложились стандартные методы упрощения расчетных моделей, такие как замена массивных несущих элементов эквивалентными объектами упрощенной геометрии или сосредоточенными массами [5, 12].

Наконец, следует учитывать, что сам процесс проектирования является многоэтапным и итеративным [13]. Для сокращения трудозатрат одна и та же расчетная модель зачастую используется как для статических, так и для последующих динамических расчетов, что повышает требования к качеству и универсальности исходной статической модели [14, 15]. Первым этапом подтверждения ее адекватности традиционно служат результаты статического расчета. Однако важно понимать, что в зависимости от сложности и детализации модели простой линейный статический анализ может оказаться недостаточным для полной оценки ее качества⁵. Это, в свою очередь, может потребовать дальнейшего совершенствования как самой расчетной модели, так и применения более сложных методов анализа на последующих этапах проектирования [16]. Принятые проектировщиком упрощения, приведшие к снижению точности расчетного анализа, в некоторых случаях приходится

компенсировать уже на стадии эксплуатации грузоподъемного крана [17].

Целью работы является совершенствование методологии расчетного анализа несущих конструкций мостовых кранов путем исследования влияния уровня детализации СГП на сходимость и точность результатов, а также определение областей рационального применения различных методов статического расчета для обеспечения требуемого уровня безопасности.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Объектом исследования является мостовой кран грузоподъемностью 130/32 т и пролетом 33,5 м, применяемый в технологическом цикле на объекте использования атомной энергии. В качестве СГП рассматривается траверса на гибком подвесе (рисунок 1) общей массой 5,4 т и грузоподъемностью 160 т, предназначенная для транспортировки контейнеров ТУК-13 (рисунок 2). Указанные контейнеры используются для перемещения транспортно-упаковочных комплектов с отработавшими тепловыделяющими сборками (ОТВС) реактора ВВЭР-1000 массой 95,5 т. Суммарная рабочая нагрузка равна $Q_{\Sigma} = 100,9$ т (СГП и контейнер ТУК-13).

Сравнительное исследование реакции расчетно-статической модели (PCM) мостового крана проведено в программе SAP2000 для трех вариантов PCM мостового крана, отличающихся степенью детализации СГП и рабочим грузом. Для каждого варианта проведен статический расчет (трижды расчетными методами) без рабочего груза (только СГП) с нагрузкой от СГП $Q_{\Sigma} = 5,4$ т и с рабочей нагрузкой (СГП и контейнер ТУК-13) $Q_{\Sigma} = 100,9$ т.

Первый вариант (I) моделирует рабочую нагрузку сосредоточенными массами, приложенными к поперечным балкам тележки в четырех точках (рисунок 3). Для случая без транспортируемого груза $|F| = 1,35$ т, с рабочим грузом $|F| = (1,35 + 23,875) = 25,225$ т.

Второй (II) и третий (III) варианты PCM мостового крана соответствуют суммарной рабочей нагрузке $Q_{\Sigma} = 100,9$ т, но моделируют ее как составную часть PCM мостового крана, отражая конструктивные особенности и распределение масс СГП и контейнера ТУК-13. В этих вариантах СГП соединен с поперечными балками грузовой тележки посредством конеч-

⁵ Синельщиков А.В. Расчетно-динамические модели грузоподъемных кранов для целей обоснования их сейсмостойкости // Инновационное развитие подъемно-транспортной техники: материалы Всероссийской научно-практической конференции (26–27 мая 2022 г., Брянск) / под ред. К. А. Гончарова. Брянск: БГТУ, 2022. С. 140–153.

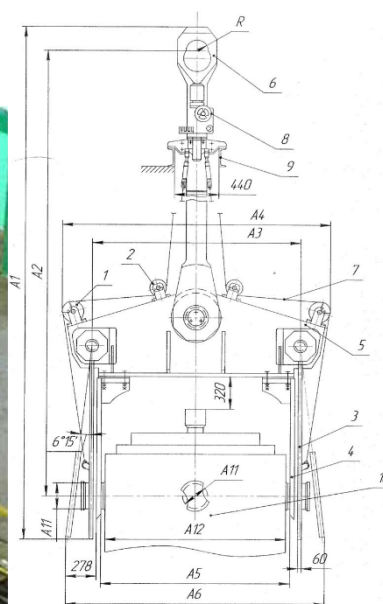
ных элементов (КЭ) типа «нить», моделирующих канат. Как отмечено в работе [18], включение в расчетную модель мостового крана груза на гибком подвесе позволяет точнее моделировать его НДС при исследовании режимов подъема груза. Включение СГП в РСМ приводит к добавлению 65 узлов, 45 стержневых КЭ и 4 КЭ типа «канат». Различие между вторым и третьим вариантами заключается в моделировании соединений элементов СГП: во втором варианте все соединения КЭ жесткие, в то время как в третьем варианте в РСМ введены шарнирные соединения в соответствии с конструкцией СГП (рисунок 4).

РСМ мостового крана г/п 130/32 т без СГП (рисунок 5) состоит из 2094 узлов (число степе-

ней свободы $n = 12564$), количество КЭ – 2398 (в том числе 124 стержня, 2140 пластинчатых КЭ, 122 – жестких связей и 12 объемных КЭ). Положение грузовой тележки на главных балках выбрано как 1/3 пролета мостового крана. Конечно-элементная сетка для пластинчатых КЭ генерировалась программным комплексом SAP2000 автоматически (в виде адаптивной сетки с переменным шагом) с учетом размера КЭ, соотношения его сторон, наличия примыкания других КЭ. Закрепление РСМ осуществлялось в местах контакта ходовых колес (ХК) с крановым рельсом в виде сферического шарнира для одного углового ХК и ограничений по направлениям Z и X для остальных ХК (крановый рельс не включен в РСМ).



а



б

Рисунок 1 – Съёмное грузозахватное приспособление для транспортировки контейнера ТУК-13:
а – траверса на гибком подвесе; б – траверса ТК-13
Источник: фотография и схема выполнены автором.

Figure 1 – Removable load-handling attachment for transporting TUK-13 container:
a – traverse on a flexible suspension; b – TK-13 traverse.
Source: compiled by the author.

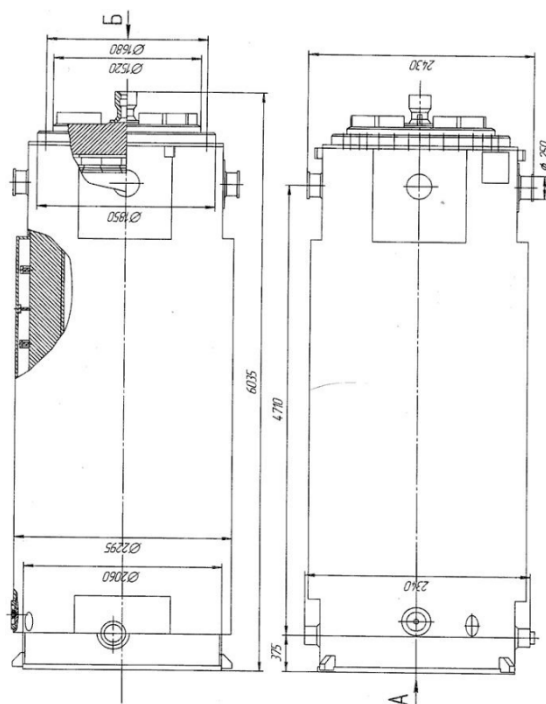


Рисунок 2 – Контейнер ТУК-13 на 12 ОТВС реакторов типа ВВЭР-1000 или АСТ500 массой $Q = 95,5$ т
Источник: схема выполнена автором.

Figure 2 – TUK-13 container for 12 spent fuel assemblies, water-water (cooled) energetic reactor type (WWER -1000) or boiling water-water reactor type (BWR-500) with a mass of $Q=95.5$ tons
Source: compiled by the author.

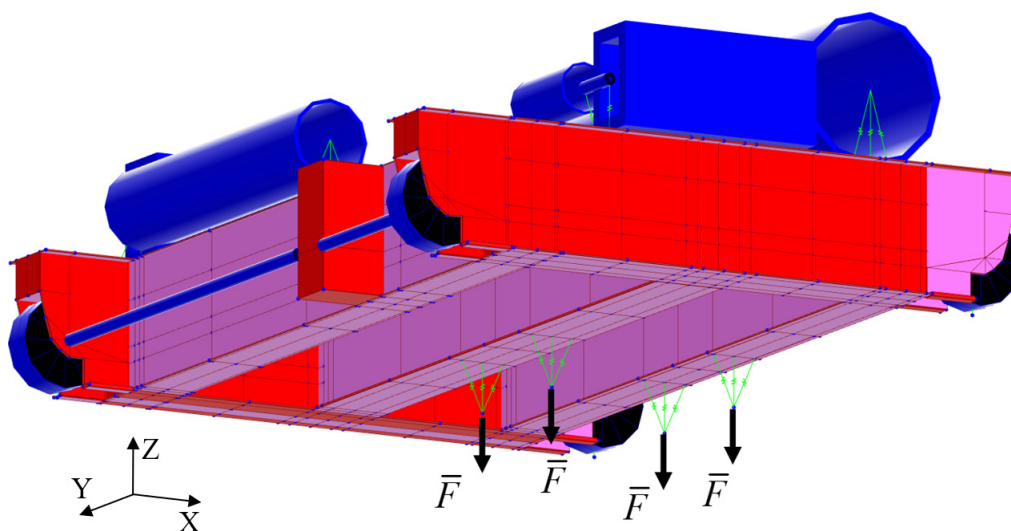


Рисунок 3 – Рабочая нагрузка задана сосредоточенными массами от СГП и контейнера ТУК-13, приведенными к поперечным балкам тележки в четырех точках
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Operational load defined by lumped masses from the removable load-handling attachment and TUK-13 container, applied to the trolley crossbeams at four points
Source: compiled by the author.

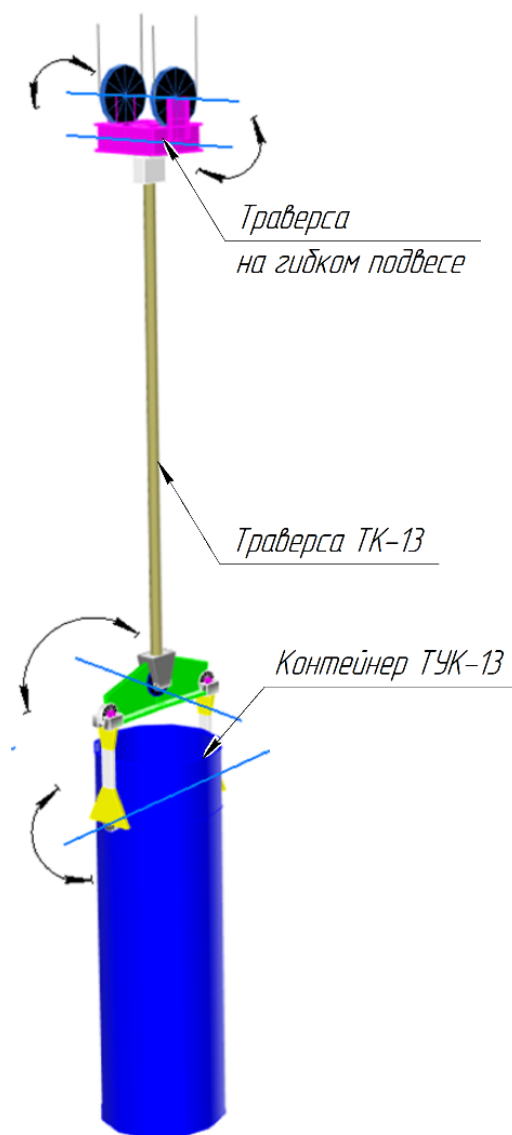


Рисунок 4 – Расчетно-статическая модель траверсы на гибком подвесе траверсы ТК-13 и контейнера ТУК-13 с шарнирным соединением КЭ
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Calculation and static model of the traverse on a flexible suspension of the TK-13 traverse, and TUK-13 container with a hinged connection of the finite element
Source: compiled by the author

Следует отметить, что в отличие от первого варианта РСМ, представляющего собой наиболее благоприятный случай для анализа методами строительной механики вследствие жесткого соединения всех конечных элементов РСМ [19], второй и третий варианты характеризуются особенностями, потенциально влияющими на устойчивость численного решения. Второй вариант включает в РСМ две условно разделенные части: мостовой кран

и рабочий груз (СГП и контейнер), соединенные гибкими элементами (канатами). Третий вариант, помимо этого, включает шарнирные соединения в конструкции рабочего груза, моделируя его как механизм. В связи с указанными особенностями для анализа второго и третьего вариантов применяются численные методы, учитывающие Р-Δ эффект и эффект больших перемещений [20].

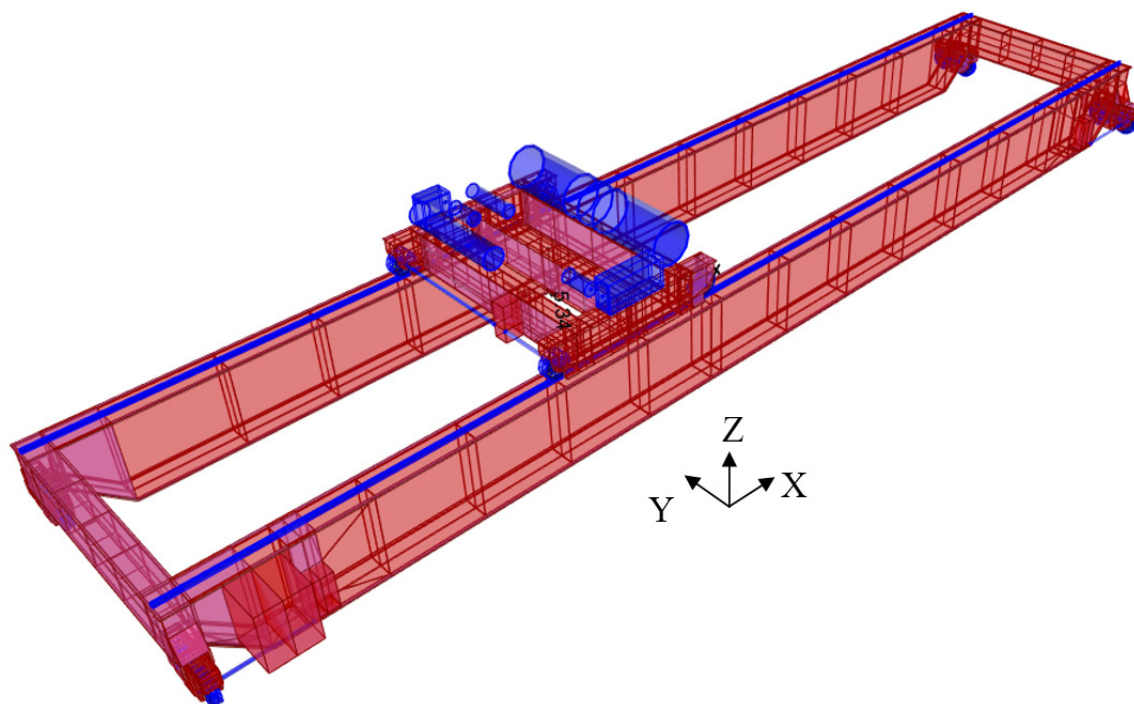


Рисунок 5 – Расчетно-статическая модель мостового крана грузоподъемностью 130/32 т без рабочего груза
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Calculation and static model of the overhead crane with load capacity of 130/32 tons without operational load
Source: compiled by the author.

С целью последующего сравнительного анализа результатов, для вариантов нагружения расчеты проведены тремя расчетными методами – линейный статический расчет (А), статический расчет с учетом Р-Δ эффекта (с учетом геометрической нелинейности) [21] (Б) и статический расчет с учетом Р-Δ эффекта и больших перемещений (анализ по деформированной схеме) [22] (В). Принципиальная разница между вариантом Б и В заключается в степени учета изменения геометрии и в физических эффектах, которые каждый метод способен учесть. Если при учете Р-Δ эффекта деформации все еще считаются малыми, то анализ по деформированной схеме на каждом шаге итерационного процесса полностью пересчитывает геометрию и жесткость всей конструкции. При этом учитывается не только Р-Δ эффект, но и большие повороты и влияние продольного растягивающего усилия на изгибную жесткость, что особенно важно для гибких растянутых элементов типа канат. Расчеты проводились без учета физической нелинейности, пластические свойства материала не учитывались.

Сводные результаты расчета приведены в конце настоящей работы в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнительный анализ результатов статического расчета РСМ мостового крана, выполненного тремя различными методами для первого варианта РСМ, демонстрирует полное совпадение полученных значений. На рисунке 6 представлена визуализация деформированного состояния РСМ, полученная в результате статического расчета с учетом Р-Δ эффекта и больших перемещений.

Применение линейного статического расчета (А) для второго варианта оказалось неэффективным. Наличие в расчетной модели гибких элементов (канатов) с низкой изгибной жесткостью, обеспечивающих соединение двух частей модели, привело к получению неприемлемых результатов, характеризующихся чрезмерной деформацией канатов.

Результаты расчета второго варианта методами (Б) и (В) дали схожие результаты. Для иллюстрации на рисунке 7 приведено деформированное состояние мостового крана г/п 130/32 т с рабочей нагрузкой $Q_{\Sigma} = 100,9$ т, полученное статическим расчетом с учетом Р-Δ эффекта.

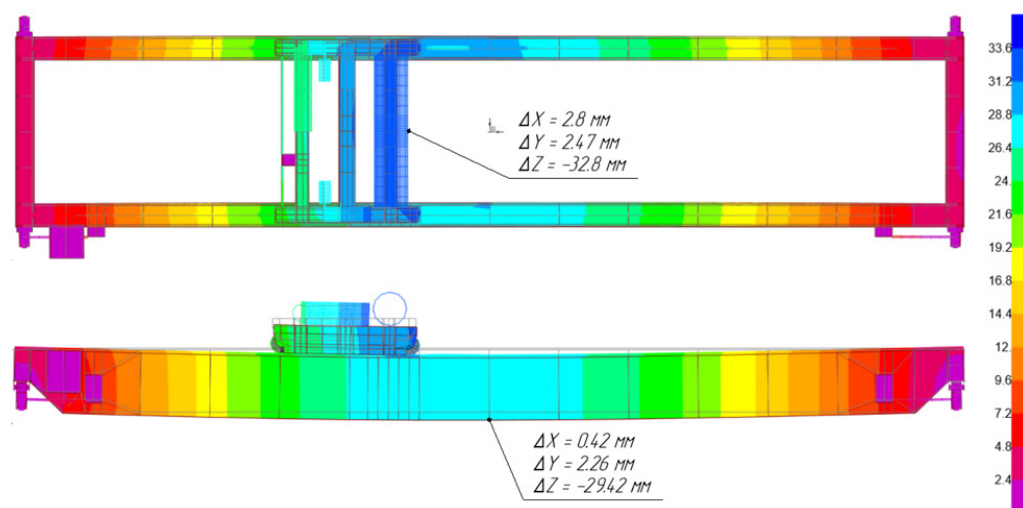


Рисунок 6 – Деформированное состояние мостового крана г/п 130/32 т с рабочей нагрузкой $Q_{\Sigma} = 100,9$ т, полученное для первого варианта РСМ статическим расчетом с учетом Р-Δ эффекта и больших перемещений
Источник: составлено автором.

Figure 6 – Deformed state of the overhead crane with a lifting capacity of 130/32 tons under the operational load of $Q_{\Sigma} = 100.9$ tons, obtained for the first variant of the Computational Static Model by static analysis with consideration of the P-Δ effect and large displacements.
Source: compiled by the author.

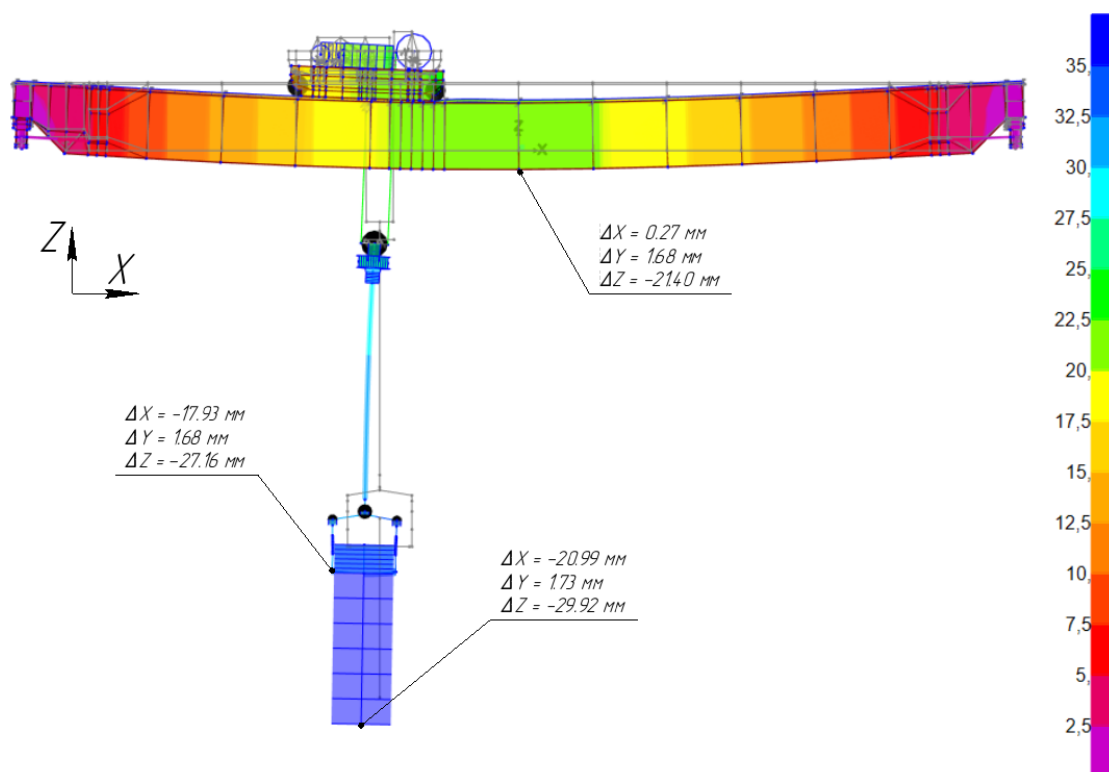


Рисунок 7 – Деформированное состояние мостового крана г/п 130/32 т с рабочей нагрузкой $Q_{\Sigma} = 100,9$ т, полученное для второго варианта статическим расчетом с учетом Р-Δ эффекта
Источник: составлено автором.

Figure 7 – Deformed state of the overhead crane with a lifting capacity of 130/32 tons under the operational load of $Q_{\Sigma} = 100.9$ tons, obtained for the second variant of the Computational Static Model by static analysis with consideration of the P-Δ effect.
Source: compiled by the author.

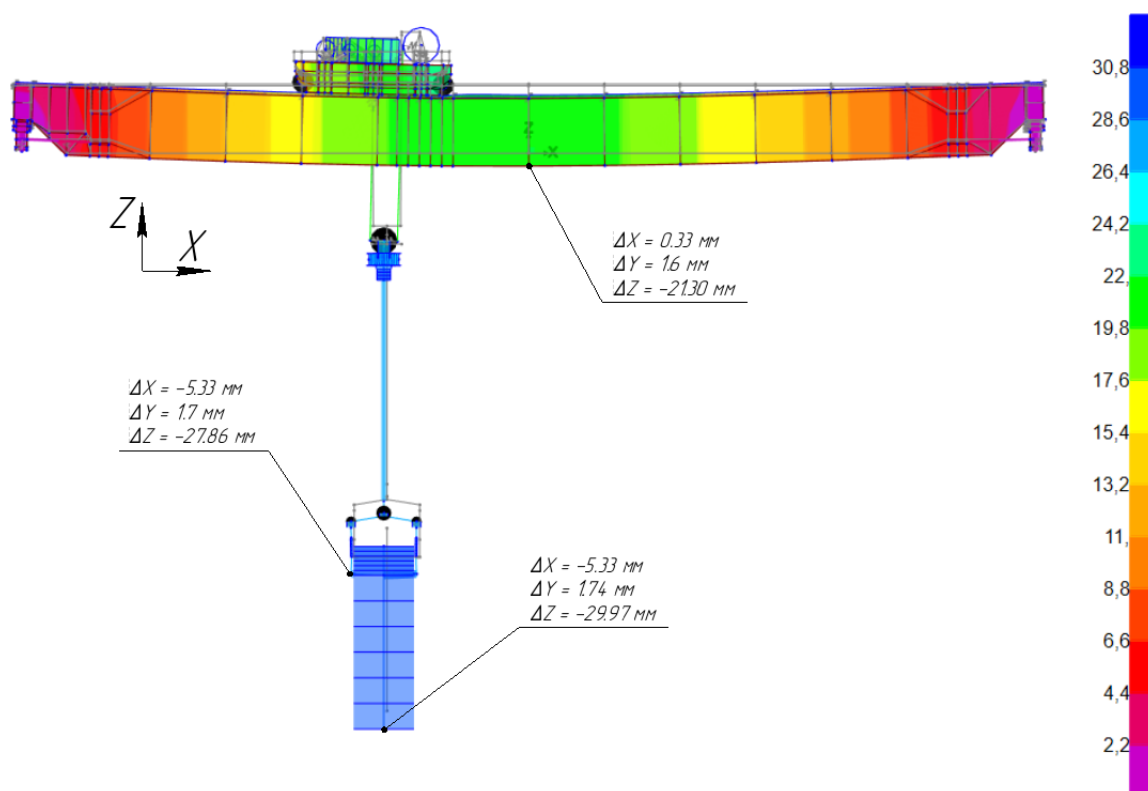


Рисунок 8 – Деформированное состояние мостового крана г/п 130/32 т с рабочей нагрузкой $Q_{\Sigma} = 100,9$ т, полученное для третьего варианта РСМ статическим расчетом с учетом Р-Δ эффекта
Источник: составлено автором.

Figure 8 – Deformed state of the overhead crane with a lifting capacity of 130/32 tons under the operational load of $Q_{\Sigma} = 100.9$ tons, obtained for the third variant of the Computational Static Model by static analysis with consideration of the P-Δ effect.
Source: compiled by the author.

Включение в РСМ мостового крана СГП с грузом, как показано на рисунке 7, приводит к снижению расчетного прогиба главных балок мостового крана с 29,42 мм до 21,4 мм. При этом величина вертикального смещения нижней поверхности контейнера ТУК-13 сопоставима с перемещением нижней плоскости главных балок, полученным для первого варианта РСМ. Значительная часть вертикальных перемещений (приблизительно треть) обусловлена упругим растяжением канатного подвеса СГП. Несмотря на учет геометрической нелинейности, жестко-связанная подсистема «канат – СГП-контейнер» отклоняется от вертикального положения, горизонтальное смещение нижней плоскости контейнера ТК-13 составляет 21 мм.

Введение шарнирных соединений в СГП в третьем варианте РСМ позволило частично

компенсировать отклонение рабочего груза от вертикали. При этом применение расчетных методов (А) и (В) не привело к получению удовлетворительных результатов. Адекватное решение получено при учете Р-Δ эффекта (рисунок 8).

В таблице приведены сводные результаты всех проведенных расчетов для различных вариантов РСМ мостового крана и различных вариантов рабочей нагрузки. Следует обратить внимание на то, что помимо результатов, изложенных на настоящей работе, в таблице приведены результаты серии аналогичных статических расчетов, проведенных для таких же расчетных случаев детализации СГП и такими же расчетными методами за исключением того, что в РСМ не был включен рабочий груз – контейнер ТУК-13 массой $Q = 95,5$ т (группа столбцов «Без рабочего груза (только СГП)»).

Ключевыми в таблице являются строчки «Деформированное состояние корректно», принимающие следующие значения:

1. «Да» – полученные деформации сопоставимы (и имеют тот же порядок) со статическим линейным расчетом.

2. «Да*» – полученные деформации сопоставимы (и имеют тот же порядок) со статическим линейным расчетом, но наблюдается

отклонение от вертикали нижней точки СГП ($\Delta X \neq 0$).

3. «Нет» – полученные деформации не сопоставимы (превышают на несколько порядков) со статическим линейным расчетом и/или наблюдаются перемещения конструктивных элементов РСМ как механизмов (прежде всего узлов СГП, соединенных с другими частями шарнирами и канатами).

Таблица

Сводные результаты всех проведенных расчетов для различных вариантов РСМ мостового крана и различных вариантов рабочей нагрузки
Источник: составлено автором.

Table

Summary results of all performed calculations for different variants of the Computational Static Model for overhead crane and different operational load varieties
Source: compiled by the author.

		Без рабочего груза (только СГП)			С рабочим грузом (СГП и контейнер ТУК-13)		
Расчетный вариант		I	II	III	I	II	III
Статический линейный расчет	Деформированное состояние корректно	Да	Нет	Нет	Да	Нет	Нет
	ΔZ (мм) середины главной балки	-14,04	-14,14	-14,14	-29,36	-21,38	-17,37
	ΔZ (мм) нижней точки СГП	–	$\approx -10^6$	$\approx -10^7$	–	$\approx -10^8$	$\approx -10^6$
Статический расчет с учетом Р-Δ эффекта	Деформированное состояние корректно	Да	Да*	Да*	Да	Да*	Да*
	ΔZ (мм) середины главной балки	-14,06	-14,15	-14,15	-29,40	-21,40	-21,42
	ΔZ (мм) нижней точки СГП	–	-15,02 ($\Delta X = -16$ мм)	-14,25 ($\Delta X = -7$ мм)	–	-27,16 ($\Delta X = -17,9$ мм)	-27,32 ($\Delta X = -5,33$ мм)
Статический расчет с учетом Р-Δ эффекта и боковых перемещений	Деформированное состояние корректно	Да	Да*	Да*	Да	Да*	Да*
	ΔZ (мм) середины главной балки	-14,06	-14,15	-14,16	-29,42	-21,42	-21,30
	ΔZ (мм) нижней точки СГП	–	-15,02 ($\Delta X = -12$ мм)	-14,26 ($\Delta X = -6$ мм)	–	-28,54 ($\Delta X = -17,9$ мм)	-27,86 ($\Delta X = -5,33$ мм)

Примечание: * результаты частично корректны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По представленным результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Линейный статический расчет применим только для упрощенных моделей. Когда СГП с грузом моделируется сосредоточенными массами (вариант I), линейный расчет дает адекватные результаты, совпадающие с методами статического расчета, учитывающие Р-Д эффект и/или большие перемещения. При большей детализации СГП с гибкими элементами (канаты) и шарнирными соединениями (варианты II и III) линейный расчет становится непригодным, приводя к нереалистичным деформациям.

2. Учет Р-Д эффекта целесообразен для моделей с гибкими элементами. Для моделей, включающих СГП с канатным подвесом (вариант II), учет Р-Д эффекта и/или больших перемещений дает корректные результаты. Учет больших перемещений в этом случае не приводит к существенным изменениям, но может быть важен для других типов нагрузок или конструкций.

3. Включение в РСМ шарнирных соединений требует особого внимания к результатам расчета. Введение шарниров в модель СГП (вариант III) усложняет расчет и требует учета Р-Д эффекта. Линейный расчет и расчет с учетом больших перемещений в этом случае не дают адекватных результатов.

4. Детализация СГП влияет на общую деформацию крана. Моделирование СГП как части конструкции крана (варианты II и III), а не как сосредоточенных масс (вариант I), приводит к изменению расчетных деформаций главных балок. Это говорит о важности учета конструкции СГП для получения более точных результатов.

5. Выбор метода расчета должен основываться на уровне детализации модели СГП. Для упрощенных моделей достаточен линейный расчет, но для более реалистичных моделей, учитывающих гибкие элементы и шарнирные соединения, необходим учет геометрической нелинейности и/или больших перемещений.

6. Учет особенностей конструкции СГП важен для точности моделирования. Различия в результатах для вариантов II и III подтверждают, что учет шарнирных соединений в СГП влияет на деформированное состояние системы и должен быть учтен в расчетной модели.

В целом исследование демонстрирует важность выбора правильного уровня детализа-

ции модели СГП и соответствующего метода расчета для получения достоверных результатов при оценке расчетных деформаций мостового крана, особенно при работе с тяжелыми и сложными грузами на опасных объектах, где требования к безопасности особенно высоки. Дальнейшие исследования связаны с изучением изменения динамического портрета РСМ мостового крана на моделях с различной степенью детализации СГП.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Niu C.M., Zhang H.W., Ouyang H.A. comprehensive dynamic model of electric overhead cranes and the lifting operations // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2012. Vol. 226, № 6. P. 1484–1503. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406211423586>.
2. Lei Z., Han S., Bouferguene A., Taghaddos H., Hermann U., & Al-Hussein M. Algorithm for Mobile Crane Walking Path Planning in Congested Industrial Plants. *Journal of Construction Engineering and Management-Asce*. 2015. 141(2), 05014016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000929](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000929)
3. Abel P., & Spaeth H. Method for measuring loads for cranes. 2006. <https://patents.google.com/patent/EP1748021B1/en>
4. Belleri A., Labo S., Marini A.C., Riva P. The Influence of Overhead Cranes in the Seismic Performance of Industrial Buildings// *Frontiers in Built Environment*. 2017. Vol. 3. Article 64. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2017.00064>.
5. Синельщиков А.В., Панасенко Н.Н. Сравнительный анализ расчетно-динамических моделей портовых кранов на основе одно- и двумерных конечных элементов // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. 2019. № 2. С. 127–144. DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2019-2-127-144>
6. Jia Z., Song X., Xu Y. and Gu H. Static Analysis of Main Girder of Shipbuilding Gantry Crane-Based on ANSYS, n.d. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-5276.2012.05.032>
7. Fatehi M.H., Eghtesad M., Amjadifard R. Modelling and Control of an Overhead Crane System with a Flexible Cable and Large Swing Angle // *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2014. Vol. 33, № 4. P. 395–409. DOI: <https://doi.org/10.1260/0263-0923.33.4.395>.
8. Mojallizadeh M.R., Brogliato B., Prieur C. Modeling and control of overhead cranes: a tutorial overview and perspectives // *Annual Reviews in Control*. 2023. Vol. 56. Article 100877. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2023.03.002>.
9. Jin Y. (n.d.). The finite element analysis of the QTZ63 tower crane. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4303.2010.03.002>

10. Garcia A., Singhose W., Ferri A.A. Three-Dimensional Modeling and Experimental Verification of Off-Centered Crane Lifts // ASME 2015 Dynamic Systems and Control Conference (DSCC2015), Columbus, OH, October 28-30, 2015. Columbus: ASME, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1115/DSCC2015-9805>.
11. Zhu C., Miao W., Xu K., Xiao M., Li C. Lifting Attachments of Cranes: text // Theory and technology of crane systems / edited by K. Xu, W. Miao, C. Zhu, C. Li, Y. Liu, M. Xiao. Singapore: Springer, 2024. P. 745–844. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-4848-2_8.
12. Панасенко Н.Н., Синельщиков А.В. Конечно-элементный анализ и проектирование подъёмных сооружений в сейсмостойком исполнении: монография; под ред. Н.Н. Панасенко. М.: Издательство АСВ, 2020. 760 с. ISBN 978-5-4323-0351-6.
13. Котельников В.С., Панасенко Н.Н., Синельщиков А.В. Системная оценка расчетно-проектировочного анализа грузоподъемных кранов // ТехНАД-ЗОП. 2022. № 7–8 (185). С. 28–31.
14. Lanz, N., Spescha, D., Weikert, S., Wegener, K. Efficient Static and Dynamic Modelling of Machine Structures with Large Linear Motions. International Journal of Automation Technology. 2018. 12(5). 622–630. DOI: <https://doi.org/10.20965/IJAT.2018.P0622>
15. Wu, Z. Application of Nonlinear Dynamic Model Combined With Static Model. 2008. https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-ZGDC200829019.htm
16. Navale R.S., Patil P.M., Tadamalle A.P. Design optimization of single overhead crane girder using finite element analysis. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication. 2023. Vol. 11, № 11. P. 733–737. DOI: <https://doi.org/10.17762/ijritcc.v11i11.10088>.
17. Valtchev S., Sinyukov A., Sinyukova T., Gracheva E., Miceli R., Goncalves J. Increasing the Damping Capacity of Crane Electric Drive Systems When Moving Cargo with a Flexible Suspension // 2024 International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, Romania, 2024. Suceava: IEEE, 2024. P. 53–58. DOI: <https://doi.org/10.1109/DAS61944.2024.10541197>.
18. Haniżewski T. Modeling the dynamics of cargo lifting process by overhead crane for dynamic overload factor estimation // Journal of Vibroengineering. 2017. Vol. 19, № 1. P. 75–86. DOI: <https://doi.org/10.21595/JVE.2016.17310>.
19. Строительная механика сварных пространственных металлоконструкций: коллективная монография / Н.Н. Панасенко, В.В. Смирнов, А.В. Синельщиков [и др.]. Волгоград: Волгоградское научное издательство, 2017. 480 с.
20. Синельщиков А.В. Большие перемещения в задачах расчетного анализа грузоподъемных кранов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2007. № 2 (37). С. 10–16.
21. Liu S. Z., Guo X. Y. A Practical Calculation Method of P- Δ Effect in Frame Structure. Advanced Materials Research. 2010. 1844–1848. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.163-167.1844>
22. Cusmano, V., Pantò, B., Rapicavoli, D., Calì, I. A discrete-element approach accounting for P-Delta effects. 2023. 52(7). 2047–2066. DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.3867>

REFERENCES

1. Niu C.M., Zhang, H.W., Ouyang, H. A comprehensive dynamic model of electric overhead cranes and the lifting operations. Proceedings1 of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2012; 226(6): 1484–1503. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406211423586>
2. Lei Z., Han S., Bouferguene A., Taghaddos H., Hermann U., & Al-Hussein M. Algorithm for Mobile Crane Walking Path Planning in Congested Industrial Plants. *Journal of Construction Engineering and Management-Asce*, 141(2); 2015; 05014016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000929](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000929)
3. Abel P., & Spaeth H. Method for measuring loads for cranes. 2006. <https://patents.google.com/patent/EP1748021B1/en>
4. Belleri A., Labo S., Marini A.C., Riva P. The influence of overhead cranes in the seismic performance of industrial buildings. *Frontiers in Built Environment*. 2017; 3, Article 64. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2017.00064>
5. Sinelshchikov A.V., Panasenko N.N. Comparative analysis of computable dynamic models of port cranes on the basis of one and two-dimensional finite elements. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2019; 2: 127–144. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2019-2-127-144>.
6. Jia Z., Song X., Xu Y. and Gu H. Static Analysis of Main Girder of Shipbuilding Gantry Crane-Based on ANSYS, n.d. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-5276.2012.05.032>
7. Fatehi M.H., Eghtesad M., Amjadifard R. Modelling and control of an overhead crane system with a flexible cable and large swing angle. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2014; 33(4): 395–409. DOI: <https://doi.org/10.1260/0263-0923.33.4.395>
8. Mojallizadeh M.R., Brogliato B., Prieur C. Modeling and control of overhead cranes: A tutorial overview and perspectives. *Annual Reviews in Control*. 2023; 56, Article 100877. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2023.03.002>
9. JIN, Y. (n.d.). The finite element analysis of the QTZ63 tower crane. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4303.2010.03.002>
10. Garcia A., Singhose W., Ferri A.A. Three-dimensional modeling and experimental verification of off-centered crane lifts. In *ASME 2015 Dynamic Systems and Control Conference*. ASME.2015. DOI: <https://doi.org/10.1115/DSCC2015-9805>

11. Zhu C., Miao W., Xu K., Xiao M., Li C. Lifting attachments of cranes. In K. Xu, W. Miao, C. Zhu, C. Li, Y. Liu, M. Xiao (Eds.), *Theory and technology of crane systems*. Springer. 2024: 745–844. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-4848-2_8
12. Panasenkov N.N., Sinelshchikov A.V. *Finite element analysis and design of lifting structures in seismic-resistant design: Monograph*. ASV Publishing House. 2020: 760.
13. Kotelnikov V.S., Panasenkov N.N., Sinelshchikov A.V. Systematic assessment of the design analysis of lifting cranes. *TekhNADZOR*. 2022; 185(7-8): 28–31. (in Russ.)
14. Lanz N., Spescha D., Weikert S., & Wegener K. Efficient Static and Dynamic Modelling of Machine Structures with Large Linear Motions. *International Journal of Automation Technology*. 2018; 12(5): 622–630. DOI: <https://doi.org/10.20965/IJAT.2018.P0622>
15. Wu Z. Application of Nonlinear Dynamic Model Combined With Static Model. 2008. https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-ZGDC200829019.htm
16. Navale R.S., Patil P.M., Tadamalle A.P. Design optimization of single overhead crane girder using finite element analysis. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*. 2023; 11(11): 733–737. DOI: <https://doi.org/10.17762/ijritcc.v11i11.1008845>
17. Valtchev S., Sinyukov A., Sinyukova T., Gracheva E., Miceli R., Goncalves J. Increasing the damping capacity of crane electric drive systems when moving cargo with a flexible suspension. In 2024 International Conference on Development and Application Systems (DAS). 2024: 53–58. IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/DAS61944.2024.10541197>
18. Haniszewski T. Modeling the dynamics of cargo lifting process by overhead crane for dynamic overload factor estimation. *Journal of Vibroengineering*. 2017; 19(1): 75–86. DOI: <https://doi.org/10.21595/JVE.2016.17310>
19. Panasenkov N.N., Smirnov V.V., Sinelshchikov A.V., Kotelnikov V.S., Korennov D.V. *Structural mechanics of welded spatial metal structures: A collective monograph*. Volgograd Scientific Publishing House. 2017: 480.
20. Sinelshchikov A.V. Large displacements in problems of computational analysis of lifting cranes. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology*. 2007; 2(37): 10–16. (in Russ.)
21. Liu S. Z., Guo X. Y. A Practical Calculation Method of P- Δ Effect in Frame Structure. *Advanced Materials Research*. 2010: 1844–1848. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.163-167.1844>
22. Cusmano V., Pantò B., Rapicavoli D., Calò I. A discrete-element approach accounting for P-Delta effects. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2023; 52(7): 2047–2066. DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.3867>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Синельщиков Алексей Владимирович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Информационные технологии» Астраханского государственного университета им. В.Н. Татищева (414056, Южный федеральный округ, Астраханская область, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3652-9016>,

Scopus ID: 57199405189,

SPIN-код: 1473-4782,

e-mail: Laex@bk.ru

INFORMATION ABOUT AUTHOR

Sinelshchikov Alexei V. – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Information Technologies of the Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev (414056, Southern Federal District, Astrakhan Region, Astrakhan, Tatishcheva St., 20a)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3652-9016>,

Scopus ID: 57199405189,

SPIN-code: 1473-4782,

e-mail: Laex@bk.ru

Научная статья
УДК 625.089.21
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-554-566>
EDN: DNWAJT



ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДИ ПОВЕРХНОСТИ БЕСПОРИСТЫХ КАМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ В ПРОЦЕССЕ ФРЕЗЕРОВАНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ

Д.В. Фурманов¹, Л.М. Шамахов¹ ✉, Е.С. Буданова²

¹Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия

²Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
г. Москва, Россия

✉ ответственный автор
leonid.shamakhov@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В работе рассматриваются методы определения удельной площади поверхности беспористых каменных материалов, образующихся при фрезеровании асфальтобетонных покрытий дорожными фрезами. Удельная площадь поверхности является ключевым параметром, влияющим на адгезионные свойства, уплотняемость и долговечность вторичных асфальтобетонных смесей.

Материалы и методы. В работе представлен способ определения удельной площади поверхности беспористых каменных материалов. Способ основан на трехмерном сканировании с последующим построением облака точек. По полученным полигональным моделям отдельных частиц вычисляется площадь и объем.

Результаты. В результате получены значения площади поверхности и объема частиц каменного материала, предварительно разделенного по крупности частиц на фракции путем просеивания материала через сита с изменяемыми размерами сечений. Предложен метод определения удельной площади поверхности беспористых каменных материалов, позволяющий увеличить точность.

Обсуждение и заключение. Метод определения удельной площади поверхности беспористых каменных материалов, описанный в данной работе, может быть использован не только в дорожной и строительной отрасли, но и в металлургической, химической, горнодобывающей промышленности. Ключевым результатом работы является то, что метод можно применять для определения, например, битумоемкости или расхода битумной эмульсии при приготовлении асфальтогранулобетона и грунтоцементных смесей в процессе рециклинга. Дополнительно метод позволит произвести оценку затраченной энергии как в процессе фрезерования, так и в процессе измельчения других твердых материалов

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: удельная площадь поверхности, асфальтобетон, беспористые каменные материалы, фрезерование асфальтобетона, дорожная фреза, трехмерное сканирование, экспериментальные исследования, вторичные каменные материалы

Статья поступила в редакцию 16.06.2025; одобрена после рецензирования 14.07.2025; принята к публикации 22.08.2025.

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: Фурманов Д.В., Шамахов Л.М., Буданова Е.С. Определение удельной площади поверхности беспористых каменных материалов, полученных в процессе фрезерования асфальтобетонов // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, №. 4. С. 554-566. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-554-566>

© Фурманов Д.В., Шамахов Л.М., Буданова Е.С., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-554-566>

EDN: DNWAJT

DETERMINATION OF THE SPECIFIC SURFACE AREA OF NON-POROUS STONE MATERIALS OBTAINED BY MILLING ASPHALT CONCRETE

Denis V. Furmanov¹, Leonid M. Shamakhov¹ ✉, Ekaterina S. Budanova²

¹Yaroslavl State Technical University,
Yaroslavl, Russia

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

✉ corresponding author
leonid.shamakhov@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The paper considers methods for determining the specific surface area of porous stone materials formed during milling of asphalt concrete pavements with road cutters. The specific surface area is a key parameter affecting the adhesive properties, compactness and durability of secondary asphalt concrete mixtures.

Materials and methods. The paper presents a method for determining the specific surface area of nonporous stone materials. The method is based on three-dimensional scanning followed by the construction of a point cloud. The resulting polygonal models of individual particles are used to calculate the area and volume.

Results. As a result, the values of the surface area and volume of particles of stone material have been obtained. The stone material was previously partitioned into fractions according to the particle size by sieving it through sieves with variable cross-section sizes. In addition, a method for determining the specific surface area of non-porous stone materials has been proposed, which allows for increased accuracy.

Discussion and conclusion. The method for determining the specific surface area of non-porous stone materials described in this paper can be used not only in the road and construction industries, but also in the metallurgical, chemical, and mining industries. The key result of the work is that the method can be used to determine, for example, the bitumen content or consumption of bitumen emulsion in the preparation of asphalt and cement mixtures during recycling. Additionally, the method provides assessment of the energy expended both during the milling and the grinding of other solid materials.

KEYWORDS: Specific surface area, asphalt concrete, porous stone materials, asphalt milling, road milling cutter, three-dimensional scanning, experimental studies, secondary stone materials

The article was submitted: June 16, 2025; approved after reviewing: July 14, 2025; accepted for publication: August 22, 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. Furmanov D.V., Shamakhov L.M., Budanova E.S. Determination of the specific surface area of non-porous stone materials obtained by milling asphalt concrete. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22(4): 554-566. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-554-566>

© Furmanov D.V., Shamakhov L.M., Budanova E.S., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Современные дорожно-строительные технологии активно развиваются в направлении рециклинга [1] асфальтобетонных покрытий. Вместе с тем одним из наиболее распространенных способов ликвидации изношенных дорожных покрытий является метод холодного фрезерования, который позволяет удалять поврежденные слои асфальтобетона с последующей переработкой материала. Фрезерованный асфальтобетонный материал представляет собой смесь каменных частиц различной крупности, покрытую остаточным битумом. Его повторное использование в производстве новых асфальтобетонных смесей требует точного контроля физико-механических характеристик, среди которых важное место занимает удельная площадь поверхности.

Определение удельной поверхности асфальтобетонного гранулята после фрезерования позволяет оценить качество переработанного материала для его дальнейшего использования. Удельная поверхность, то есть площадь поверхности частиц, отнесенная к единице массы (объема), напрямую влияет на адгезию битума и его расход при повторном применении гранулята. При рециклинге асфальтобетона знание удельной поверхности помогает оптимизировать состав, правильно подбирая дозировку битума и минеральных добавок. Это особенно важно, поскольку мелкие частицы увеличивают жесткость смеси, а более крупные обеспечивают каркасность и устойчивость к деформациям [2]. Контроль этого параметра позволяет прогнозировать свойства нового покрытия, включая его прочность и долговечность.

Кроме того, определение удельной поверхности помогает оценить качество самого процесса фрезерования. Если обработка слишком интенсивная, образуется много материала мелкодисперсной фракции, что может негативно сказаться на характеристиках асфальтобетонной смеси. В таком случае возрастает потребление энергии, увеличивается износ режущих элементов и уменьшается производительность [3]. Это связано с тем, что дополнительная энергия тратится на образование новых поверхностей в процессе фрезерования. Напротив, рациональный режим фрезерования обеспечивает рациональное соотношение между крупными и мелкими частицами, способствуя экономии материалов и энергии без ущерба для качества.

Для измерения удельной поверхности применяются методы лазерной гранулометрии [4] и расчётные методы на основе просеивания гранулята в ситах [5]. Лазерная гранулометрия позволяет определить размеры частиц с высокой точностью путем дифракционного рассеяния лазерного луча при прохождении через образец. Такой метод дает возможность определить удельную площадь поверхности с учётом формы и шероховатости частиц. Однако метод не лишён недостатков. Определить размеры отдельной частицы, не изменив её положение в пространстве, невозможно. Исходя из чего, по мнению авторов, точность полученных измерений сильно падает. Расчётные методы, опирающиеся на результаты просеивания материала в ситах, предполагают использование эмпирических формул, связывающих гранулометрический состав с удельной поверхностью. Применяются различные модели, учитывающие средний диаметр частиц, их плотность и коэффициент формы. Конечно, такие методы менее точны по сравнению с лазерной гранулометрией, но тем не менее они остаются востребованными благодаря простоте и доступности, особенно при предварительной оценке свойств материала.

Авторами работы [6] представлена эмпирическая модель оценки площади поверхности частиц в горячей асфальтобетонной смеси. Авторы утверждают, что точное определение площади поверхности частиц критически важно для расчета количества битума, необходимого для обеспечения прочности и долговечности асфальтобетонного покрытия. В рамках работы создана математическая модель, основанная на определении гранулометрического состава. В свою очередь модель основана на упрощенных геометрических формах, что не учитывает реальную сложность и неоднородность формы частиц. Также работа имеет эмпирические допущения, связанные с использованием коэффициентов неровности поверхности, что не имеет строгого теоретического обоснования, и коэффициент формы может изменяться в зависимости от материала. Тем не менее полученная модель позволяет упростить и удешевить процесс проектирования горячей асфальтобетонной смеси, объединяя простоту использования с достаточной точностью.

В работе [7] авторы изучают влияние содержания крупного заполнителя и удельной площади поверхности на образование трещин в асфальтобетонных смесях. Исследование основано на виртуальном моделировании ис-

пытаний на изгиб полукруглых образцов методом дискретных элементов с последующей верификацией результатов в рамках лабораторных испытаний. По полученным результатам, можно говорить о том, что трещины распространяются преимущественно по границам крупных частиц заполнителя. При увеличении содержания крупных частиц развитие трещин замедляется, но при избытке это приводит к снижению прочности из-за недостатка связующего. В то же время авторы работы указывают на то, что удельная площадь поверхности более точно отражает влияние гранулометрического состава на образование трещин, чем просто содержание крупного заполнителя. К сожалению, верификация данных проводилась только при 15 °С. Этого недостаточно, чтобы всесторонне рассмотреть поведение смесей при низких (хрупкое разрушение) и высоких (пластические деформации) температурах. Хотя работа демонстрирует важность определения удельной площади поверхности для прогнозирования прочности при проектировании асфальтобетонных смесей.

Исследование влияния шероховатости поверхности каменных материалов на их абразивный износ отражено в работе [8] авторов Р.Ф. Гайфутдинова и Э.Р. Хафизова. Отдельный интерес представляет метод определения удельной площади поверхности щебня, который применялся для измерения формы зерен до и после испытаний. Для измерения площади поверхности использован метод парафинирования, основанный на определении расхода парафина и толщины его плёнки. На первом этапе навеску щебня покрывали парафином, после чего измеряли массу образцов до и после парафинирования для определения массы парафина. Затем толщина парафиновой плёнки замерялась микрометром. Площадь поверхности парафина вычислялась по формуле (1):

$$S_{\text{пог}} = \frac{m_n}{\rho_n \cdot t}, \quad (1)$$

где m_n – масса парафина, кг;

ρ_n – плотность парафина, кг/м³;

t – толщина пленки парафина, м.

В работе отмечается, что метод парафинирования, несмотря на трудоёмкость и влияние шероховатости, обеспечивает достаточную точность для проведения сравнительного анализа. Однако, по мнению авторов, главным недостатком такого метода является высокая степень зависимости конечных результатов от

вязкости парафина. Этот факт делает результаты трудновоспроизводимыми, что ставит под сомнение заявление о точности представленных результатов. В свою очередь это подтверждается тем, что метод парафинирования является косвенным, так как определяется не площадь поверхности, а масса парафина, налипшего на поверхность каменной фракции.

В работе [9] представлена детальная методика определения параметров пористой структуры углеродных сорбентов, полученных из ископаемых углей. Основное внимание уделено измерению удельной поверхности и общего объема пор. Для расчета удельной поверхности использовались метод Брунауэра-Эммета-Тейлора (BET) [10]. Метод BET основан на анализе физической адсорбции газов на поверхности твердых тел, где количество адсорбированного газа зависит от относительного давления пара и пропорционально общей площади поверхности материала. Однако авторы отмечают, что метод BET не всегда корректен для микропористых структур, но не предлагают альтернативных подходов, что требует дополнительного изучения. Также было бы полезно расширить набор образцов и провести сравнение с другими аналитическими методами. В любом случае данная работа представляет собой ценный методический ресурс, объединяющий применение современного оборудования и многопараметрического анализа.

В исследовании Ш.В. Бузикова и М.В. Мотовиловой [11] рассматривается применение асфальтового гранулята для повышения эксплуатационных характеристик дорожных покрытий. Исходя из методики, предложенной авторами, определение средневзвешенной удельной площади поверхности материала позволит оценить взаимодействие частиц гранулята с вяжущими компонентами асфальтобетонной смеси. Удельная площадь поверхности определяется как сумма произведений удельной поверхности каждой фракции на её массовую долю. К сожалению, в работе не указано, проводились ли прямые измерения площади поверхности фракции или использовались справочные данные для стандартных фракций. Поэтому, несмотря на то что методика и опирается на комбинацию расчетных и экспериментальных подходов, её воспроизведение невозможно без уточнения деталей исследования.

Анализ методов измерения удельной площади поверхности выявил преимущества и ограничения различных подходов. Лазерная

гранулометрия обеспечивает высокую точность, учитывая форму и шероховатость частиц, однако требует сложного оборудования и чувствительна к условиям измерений. Расчётные методы на основе ситового анализа, несмотря на меньшую точность, остаются востребованными благодаря простоте и доступности. Альтернативные методики, такие как парафинирование и метод ВЕТ, также находят применение, но их использование сопряжено с трудоёмкостью и требует дополнительной верификации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При холодном фрезеровании асфальтобетонных покрытий образуется асфальтобетонный гранулят с условно беспористой структурой, частицы которого частично покрыты битумной пленкой. При этом общая площадь открытых пор материала незначительна по сравнению с основной поверхностью частиц. Важно отметить, что наличие таких пор не оказывает существенного влияния на битумоемкость при использовании гранулята в производстве новых асфальтобетонных смесей. А также на кинетику разрушения при механическом воздействии, например дроблении или холодном фрезеровании рабочими органами дорожных машин.

Для определения удельной площади поверхности беспористых каменных материалов используется технология трехмерного сканирования, обеспечивающая детализированную модель гранул и фиксирующая геометрию частиц, не учитывая возможные внутренние поры, которые не влияют на измеряемую площадь поверхности, а также гранулометрический анализ¹, который заключается в просеивании материала через сита заданного размера. На первом этапе происходит просеивание каменного материала через набор сит для разделения на фракции (рисунок 1, а) с последующим взвешиванием и определением массовой доли каждой фракции (рисунок 1, б). Из каждой фракции отбирается как минимум

три частицы для дальнейшего трехмерного сканирования (рисунок 1, в) с целью построения облака точек и создания полигональной модели. На основе полигональной модели (рисунок 1, г) определяется площадь поверхности и объем каждой частицы.

Асфальтобетонный гранулят получен в процессе холодного фрезерования верхнего слоя асфальтобетонного покрытия проезжей части одной из автодорог города Ярославля. Покрытие было выполнено из асфальтобетона типа Б² марки 2 в 2016 г. Отобранный асфальтобетонный гранулят рассеивался в ситах с круглыми ячейками 20, 15, 10, 5, 3, 1,25, 0,63, 0,315, 0,16 мм на вибрационной площадке с дальнейшим взвешиванием каждой фракции на лабораторных весах. Далее было отобрано по три образца частиц из трех фракций асфальтобетонного гранулята, а именно из фракций 15, 10, 5 мм. Данные фракции в процентном соотношении занимают более 40% от общей массы минерального заполнителя. Также в нашем случае выбор трех данных фракций ограничивается возможностями трехмерного сканера. По полученным полигональным моделям происходит определение средней площади поверхности одного из трех образцов частиц, после чего определяется усредненная площадь поверхности для материала заданной фракции.

Вместе с тем для качественного определения площади поверхности и объема отдельной частицы требуется выяснить влияние точности (разрешения) и погрешности сканирования. С этой целью проведен замер частицы из фракции гранулята, оставшегося на поверхности сита с диаметром отверстия 15 мм (таблица 1). Частица сканировалась при изменении разрешения от 0,6 мм/м до 0,05 мм/м. Погрешность измерений определялась по формуле (2):

$$\delta = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{x_{\max}} \cdot 100\% . \quad (2)$$

¹ ГОСТ 33029–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Определение гранулометрического состава. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.

² ГОСТ 9128–2013. Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 45 с.

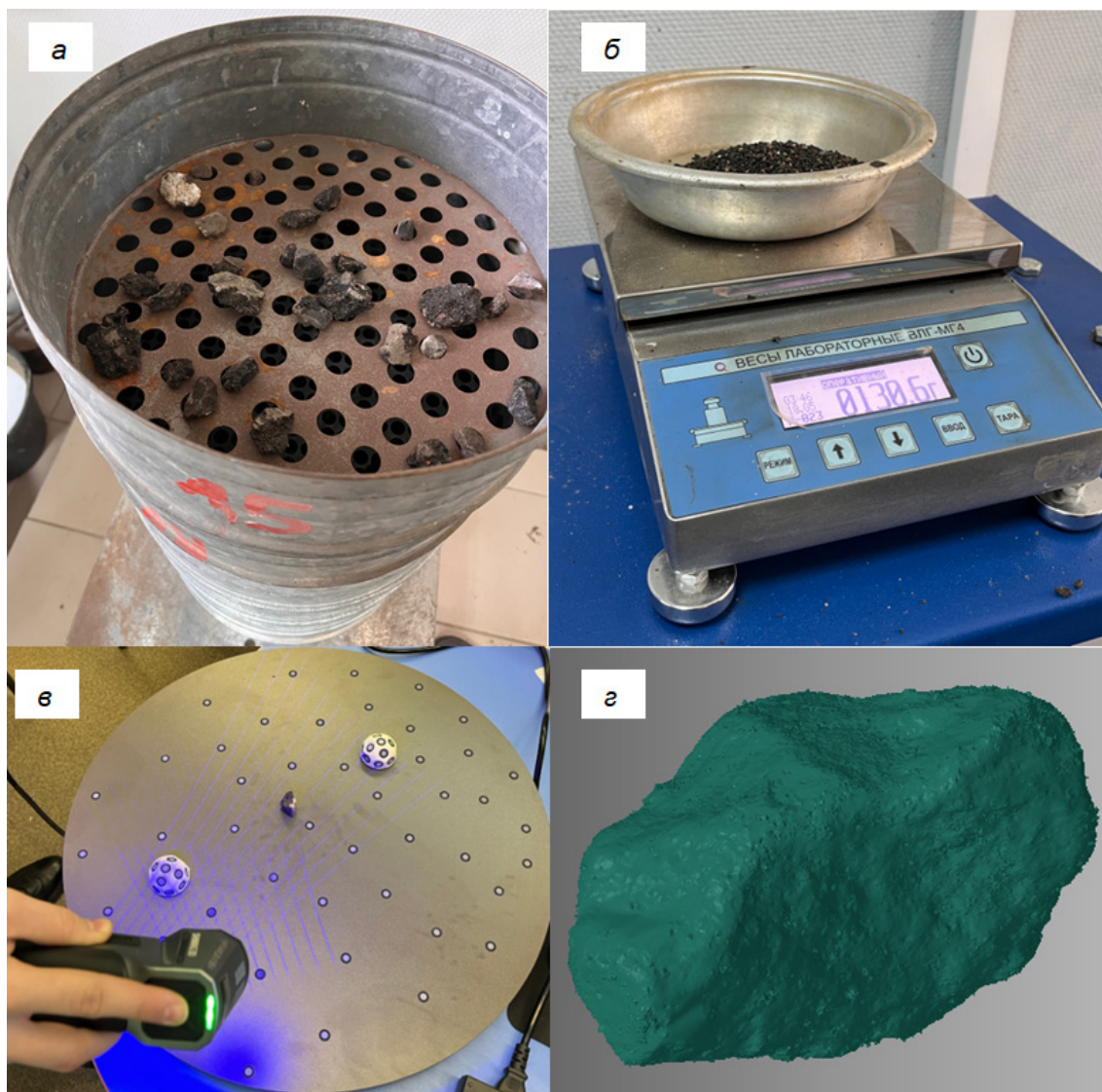


Рисунок 1 – Определение площади поверхности и объема частиц асфальтобетонного гранулята:
 а – разделение асфальтобетонного гранулята на фракции по крупности частиц;
 б – определение массовой доли каждой фракции; в – процесс трехмерного сканирования;
 г – полигональная модель частицы асфальтобетонного гранулята
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Determination of the surface area and the volume of asphalt-concrete granulate particles:
 а – separation of asphalt-concrete granulate into fractions according to particle size;
 б – determination of the mass fraction of each fraction;
 в – three-dimensional scanning;
 г – polygonal model of an asphalt-concrete granulate particle
 Source: compiled by the authors.

Таблица 1

Результаты сканирования для выявления влияния точности трехмерного сканера
Источник: составлено авторами.

Table 1

Scan results to identify the impact of the accuracy of a three-dimensional scanner.

Source: compiled by the authors.

Разрешение трехмерного сканера, мм/м	Площадь, мм ²	Объем, мм ³
0,05	2251,0731	5725,3539
0,3	2324,3428	5582,0361
0,6	2229,3115	5718,1537
Погрешность, %	4,08%	2,5%

Полученные результаты демонстрируют высокую точность измерений, а также позволяют сделать вывод, что разрешение сканера минимально влияет на определение удельной площади поверхности. Дальнейшее сканирование асфальтобетонного гранулята требуется проводить при одинаковом разрешении. В рамках настоящей работы результаты сканирования получены при разрешении сканера 0,05 мм/м.

Для определения удельной площади поверхности используется формула (3):

$$S_{\text{уд}} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i \cdot \delta_i}{\rho \cdot V_i}, \quad (3)$$

где A_i – средняя площадь поверхности, мм²;
 δ_i – массовая доля каждой фракции;
 V_i – средний объем частицы, мм³;
 ρ – плотность частицы, Т/м³.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате работы получены полигональные модели (рисунок 2) частиц фракций асфальтобетонного гранулята. По моделям удалось установить площадь поверхности и объем частиц трех фракций, значения которых в последствии были усреднены (таблица 2). Полученные зависимости усредненных значений площади поверхности и объема асфальтового гранулята от приведенных размеров отверстий сит (рисунок 3) позволяют прогнозировать изменение геометрических характеристик.

Таблица 2

Результаты измерения полигональных моделей

Источник: составлено авторами.

Table 2

Measurement results of polygonal models

Source: compiled by the authors.

Измеряемая фракция	Усредненная площадь, мм ²	Усредненный объем, мм ³
Навеска сита с диаметром отверстия 5 мм	407,176	376,63
Навеска сита с диаметром отверстия 10 мм	893,42	1442,07
Навеска сита с диаметром отверстия 15 мм	1873,953	4913,49
Уравнения регрессии	$A_i = 43.578 \cdot d^{1.362}$	$V_i = 8.7687 \cdot d^{2.2947}$
Значение достоверности аппроксимации, R ²	0,9824	0,9847

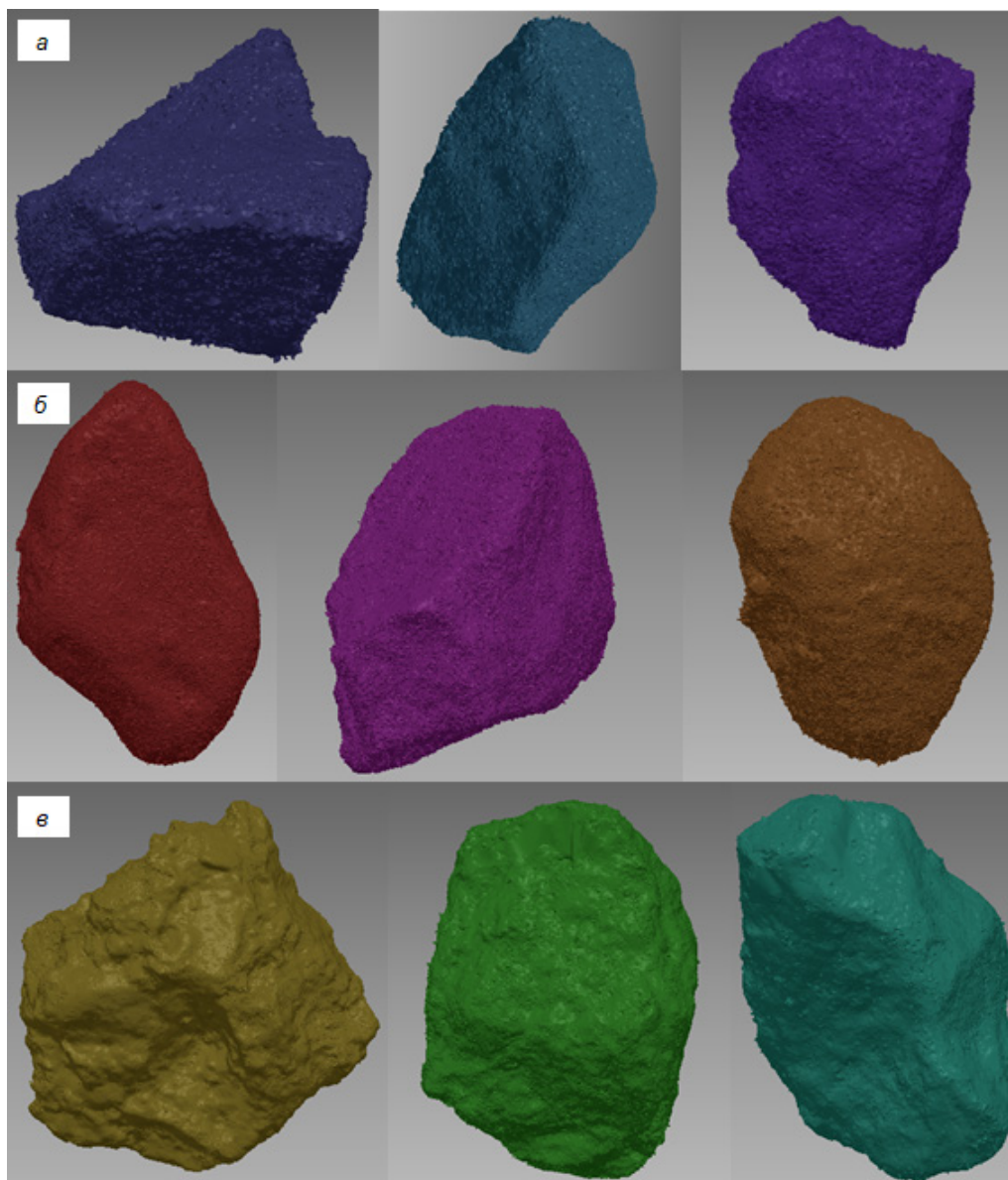


Рисунок 2 – Полигональные модели асфальтобетонного гранулята, разделенного на фракции по крупности частиц: а – навеска сита с диаметром отверстия 5 мм; б – навеска сита с диаметром отверстия 10 мм; в – навеска сита с диаметром отверстия 10 мм
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Polygonal models of asphalt-concrete granulate divided into fractions by particle size: а – a sieve attachment with a hole diameter of 5mm; б – a sieve attachment with a hole diameter of 10mm; в – a sieve attachment with a hole diameter of 10mm
Source: compiled by the authors.

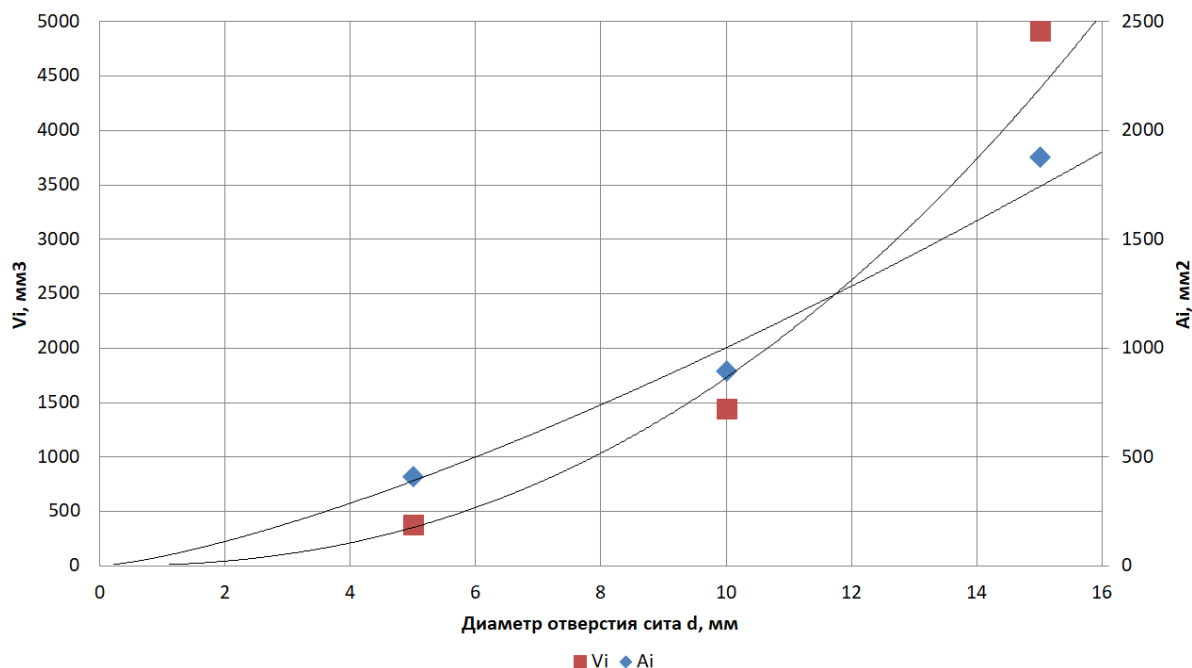


Рисунок 3 – Графики зависимости площади поверхности и объема от диаметра отверстия сита
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Dependence of the surface area and the volume on the diameter of the sieve opening
Source: compiled by the authors.

Зная геометрические размеры асфальтового гранулята, можно определить коэффициенты реальной формы для материала, отсортированного по крупности частиц с помощью сит различного сечения. В свою очередь полученные коэффициенты позволят в дальнейшем определять удельную площадь поверхности, не прибегая к использованию трехмерного сканирования. Коэффициенты позволят с большей точностью определять удельную площадь поверхности в сравнении с методами, опирающимися на расчетные зависимости, где реальную форму частиц принято заменять на геометрические фигуры (шар, куб, тетраэдр и т.д.) [12]³.

Таким образом, определим коэффициент реальной формы j-й фракции, воспользовавшись расчетной зависимостью (4) для определения удельной площади поверхности, предложенной в работе [13]:

$$S_{\text{уд}} = \sum_{j=1}^n S_j \cdot \delta_j, \quad (4)$$

где S_j – удельная поверхность j-й фракции;

δ_j – массовая доля каждой фракции.

Так, в работе [13] удельная поверхность j-й фракции определяться следующим образом:

$$S_j = \frac{K_j}{d_{j,\text{cp}} \cdot \rho_j}, \quad (5)$$

где K_j – коэффициент формы j-й фракции;

$d_{j,\text{cp}}$ – средний размер частиц j-й фракции;

ρ_j – плотность материала j-й фракции.

Проанализировав выражение (3) и (4), возможно выразить коэффициент реальной формы для частиц отдельных фракций (6):

$$K_j = \frac{A_j \cdot d_{j,\text{cp}}}{V_j}. \quad (6)$$

³ Королев И.В. Пути экономии битума в дорожном строительстве. М.: Транспорт, 1986. 149 с.

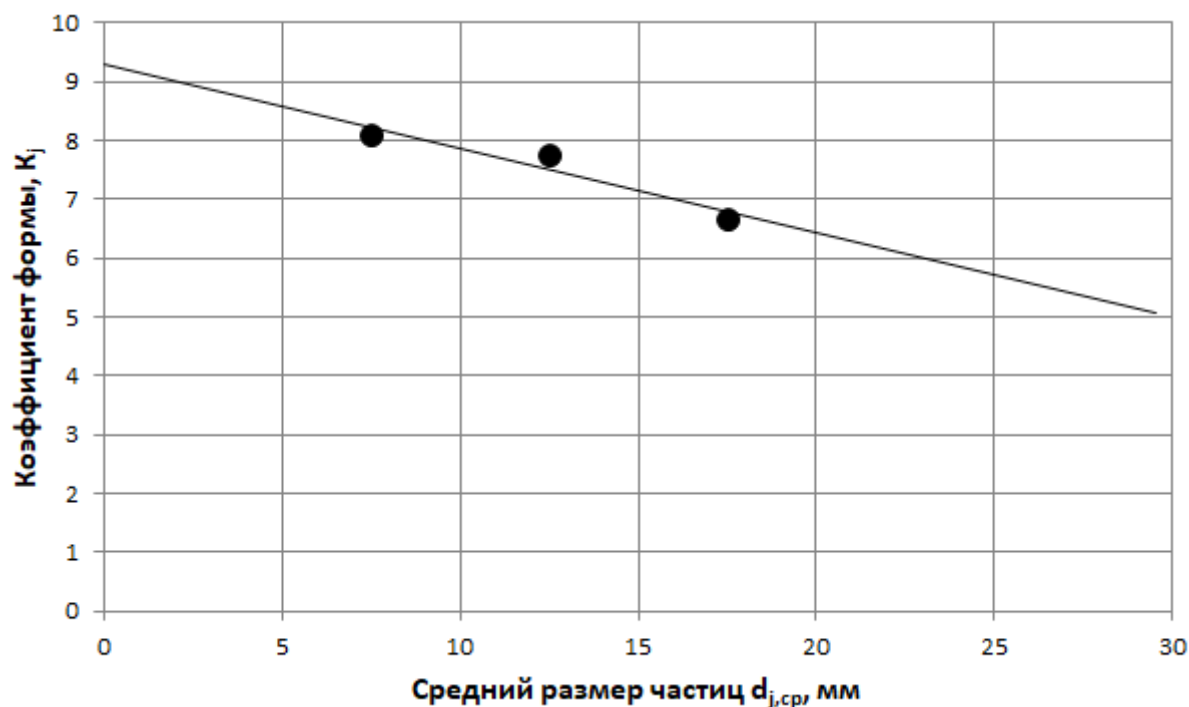


Рисунок 4 – График зависимости коэффициента реальной формы от среднего размера частиц
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Dependence between the real shape coefficient and the average particle size.
Source: Compiled by the authors.

Средний размер частиц каждой фракции определим исходя из навески сит с разными диаметрами отверстий (7):

$$d_{j,ср} = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{2}, \quad (7)$$

где $d_{\max}$ и $d_{\min}$ – диаметры отверстий верхнего и нижнего сита соответственно.

Таким образом, коэффициенты реальной формы для частиц, разделенных по крупности частиц методом просеивания через сита⁴, отражены в таблице 3.

Для прогнозирования коэффициентов формы получен график зависимостей (рисунок 4) и уравнение регрессии (8). Коэффициент достоверности составил: $R^2 = 0,9252$.

$$K_j = -0.1434 \cdot d_{j,ср} + 9.3015. \quad (8)$$

Используя полученные коэффициенты, возможно провести сравнительный анализ (таблица 4) реальных удельных площадей j -й фракции щебня с значениями, полученными в работе [13].

Таблица 3
Коэффициенты формы для навесок сит 15, 10 и 5 мм
Источник: составлено авторами.

Table 3
Coefficients of the shape for sieves of 15, 10 and 5 mm
Source: compiled by the authors.

Средний размер частиц, мм	Коэффициент формы
17,5	6,6743
12,5	7,7443
7,5	8,1083

⁴ ГОСТ 51568–99. Сита лабораторные из металлической проволочной сетки. Технические условия. М.: Госстандарт России, 1999. 8 с.

Таблица 4
Сравнительный анализ
Источник: составлено авторами.

Table 4
Comparative analysis.
Source: compiled by the authors.

Средний размер фракции, мм	Удельная площадь поверхности j-й фракции				
	Результаты расчётного способа, описанного в работе [13], опирающийся на геометрические фигуры			Коэффициент формы для щебня из гравия K=12, предложенный в работе [13]	Способ, использующий коэффициенты формы отдельной фракции асфальтобетонного гранулята
	Для шара $S_j = \frac{6}{d_{j,cp} \cdot \rho_j}$	Для куба $S_j = \frac{8,5}{d_{j,cp} \cdot \rho_j}$	Для тетраэдра $S_j = \frac{14,7}{d_{j,cp} \cdot \rho_j}$	$S_j = \frac{K}{d_{j,cp} \cdot \rho_j}$	$S_j = \frac{K_j}{d_{j,cp} \cdot \rho_j}$
7,5	0,3	0,43	0,74	0,604	0,408
12,5	0,18	0,26	0,44	0,36	0,234
20 (17,5)	0,113	0,16	0,28	0,22	(0,144)
Плотность материала принята 2,65 Т/м³					

Исходя из представленных значений, коэффициент, предложенный в работе [13] для щебня, нельзя использовать по отношению к определению удельной площади поверхности асфальтобетонного гранулята. Однако результаты, полученные в ходе анализа, позволяют сделать вывод о том, что для определения удельной площади поверхности асфальтобетонного гранулята возможно применение расчетного способа, опирающегося на коэффициент формы куба для щебня. Так, при сравнении значений удельных площадей, полученных при использовании коэффициентов формы частиц щебня и коэффициента формы куба, можно обратить внимание, что они находятся в пределах погрешности.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование позволило разработать метод определения удельной площади поверхности беспористых каменных материалов, полученных в процессе фрезерования асфальтобетонных покрытий с использованием трёхмерного сканирования. Впервые был применен метод трёхмерного сканирования, который позволяет с высокой точностью определять геометрические характеристики частиц (площадь поверхности и объем) и на их основе рассчитывать удельную площадь поверхности, что является ключевым параметром при подборе дозировки битума и минеральных добавок. Такой подход отличается от традиционных методов тем, что учитывает реальную

форму поверхности, что существенно повышает точность измерений.

Ключевым достижением работы является то, что впервые были получены данные для гранул асфальтобетона, учитывающие их реальную удельную площадь поверхности. Это позволяет более точно рассчитывать удельную площадь поверхности в сравнении с другими существующими методами. Вместе с тем полученные коэффициенты возможно использовать без проведения трудоемкого и дорогостоящего трехмерного сканирования в дальнейшем.

Экспериментальные данные показали, что погрешность определения площади поверхности и объема частиц при разных разрешениях трехмерного сканера не превышает 5%. По мнению авторов, разрешение трехмерного сканера влияет в меньшей степени на полученные результаты, поэтому предложенный метод применим для задач проектирования асфальтобетонных смесей, требующих высокой точности.

Разработанный метод может быть использован не только в дорожном строительстве для оптимизации состава асфальтобетонных смесей, но и в других отраслях, таких как металлургия, химическая промышленность и горнодобывающая деятельность, где требуется точное определение удельной площади поверхности материалов. Полученные результаты возможно применить для оценки энергетических затрат в процессах фрезерования и дробления [14], так как на величину удельной энергии образования

новой поверхности решающее влияние оказывает размер частиц разрушаемого материала [15]. Чем мельче частицы, тем больше энергии требуется для их дальнейшего измельчения, что, в свою очередь, связано с увеличением удельной площади поверхности при уменьшении размера частиц. Поэтому, определив удельную площадь поверхности отфрезерованного асфальтового гранулята, возможно оценить энергетические затраты процесса фрезерования и эффективность конструкции рабочего органа дорожной фрезы в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кабалин М.Д., Токарев В.А., Лю Ч., Юдина М.С. Рециклинг при строительстве дорог транспортно-дорожного комплекса региона. Обзор // Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 4-1(87). С. 12–19. DOI: [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-4-1\(87\)-12-19](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-4-1(87)-12-19). EDN GMXTUP.
2. Пугин К.Г., Тюрюханов К.Ю. Влияние удельной поверхности минеральных частиц на физико-механические показатели асфальтобетонов // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2020. № 2. С. 39–46. DOI: <https://doi.org/10.15593/24111678/2020.02.04>. EDN FYDXQB.
3. Фурманов Д.В., Шамахов Л.М., Лысков Н.Э. Влияние износа режущего элемента дорожной фрезы на силу сопротивления резанию асфальтобетона // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 2(90). С. 204–216. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-204-216>. EDN KLHYLT.
4. Anochie-Boateng J. K., Komba J., Tutumluer E. Aggregate surface areas quantified through laser measurements for South African asphalt mixtures // Journal of Transportation Engineering. 2012. Т. 138. № 8. pp. 1006–1015.
5. Lu D., Liu H., Guan C. Study on ascertaining specific surface area of asphalt mixture aggregate // GongluJiaotongKeji/ Journal of Highway and Transportation Research and Development. 2011. Т. 28. no. 5.
6. Panda R.P., Das S.S., Sahoo P.K. An empirical method for estimating surface area of aggregates in hot mix asphalt // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). 2016. Т. 3. no. 2. pp. 127–136.
7. Liang H., Shi L., Wang D. [et al.] Influence of graded coarse aggregate content and specific surface area on the fracture properties of asphalt mixtures based on discrete element simulations and indoor tests // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 299. P. 123942. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.123942. EDN AUJNFK.
8. Гайфутдинов Р.Ф., Хафизов Э.Р. Исследование абразивного износа щебня для автомобильных дорог // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. № 1(51). С. 128–137. EDN SEFEOI.
9. Козлов А.П., Дудникова Ю.Н., Зыков И.Ю., Созинов С.А., Исмагилов З.Р. Методические аспекты определения параметров пористой структуры углеродных сорбентов на основе ископаемых углей // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. № 6 (124). С. 197–203.

DOI: <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2017-6-198-204>

10. Fagerlund G. Determination of specific surface by the BET method // Materials and Structures. 1973. Vol. 6, No. 3. P. 239–245. DOI 10.1007/bf02479039. EDN VGPWER.

11. Бузиков Ш.В., Мотовилова М.В. Повышение эксплуатационных показателей дорожных покрытий с асфальтовым гранулятом // Строительство и реконструкция. 2023. № 2(106). С. 101–111. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-106-2-101-111>. EDN VECTRK.

12. Симонов П.С. Экспериментальное исследование дробления горной породы единичным ударом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 1. С. 71–79. DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-1-0-71-79>. EDN VIEZDF.

13. Романюк В.Н. Экспериментальная асфальтобетонной смеси // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2003. № 4. С. 69–76. EDN GDOLBM. DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2003-0-4-69-76>

14. Фурманов Д.В., Буданова Е.С. Оценка эффективности процесса фрезерования на основе гранулометрического анализа щебеночно-мастичного асфальтобетонного гранулята // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6(100). С. 852–866. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-852-866>. EDN XPF BRO.

15. Голик В.И., Кожиев Х.Х., Голодов М.А., Армейсков В.Н. Исследование свойств горных пород при дроблении и измельчении в механических мельницах // Известия Уральского государственного горного университета. 2021. № 2(62). С. 81–87. DOI: <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-81-87>. EDN VZGVFP.

REFERENCES

1. Kabalin M. D., Tokarev V. A., Liu Chunguang, Iudina M. S. Recycling in the construction of roads of the transport and road complex of the region. Review. *World of transport and technological machines*. 2024; 4-1(87): 12–19. DOI: [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-4-1\(87\)-12-19](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-4-1(87)-12-19). (in Russ.) EDN GMXTUP.
2. Pugin, K. G., Tyuryukhanov K. Yu. The effect of the specific surface of mineral particles on the physical and mechanical properties of asphalt concrete. *Transport. Transport facilities. Ecology*. 2020; 2: 39–46. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15593/24111678/2020.02.04>. EDN FYDXQB.
3. Furmanov D. V., Shamakhov L. M., Lysakov N. E. Wear out effect for cutting element of milling machine on asphalt concrete cutting strength. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(2): 204–216. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-204-216>. EDN: KLHYLT.
4. Anochie-Boateng J. K., Komba J., Tutumluer E. Aggregate surface areas quantified through laser measurements for South African asphalt mixtures. *Journal of Transportation Engineering*. 2012; T. 138. no 8: 1006–1015.
5. Lu D., Liu H., Guan C. Study on ascertaining specific surface area of asphalt mixture aggregate. *GongluJiaotongKeji. Journal of Highway and Transportation Research and Development*. 2011; T. 28. no 5.

6. Panda R.P., Das S.S., Sahoo P.K. An empirical method for estimating surface area of aggregates in hot mix asphalt. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2016; T. 3. no 2: 127–136.

7. Liang H., Shi L., Wang D. [et al.] Influence of graded coarse aggregate content and specific surface area on the fracture properties of asphalt mixtures based on discrete element simulations and indoor tests. *Construction and Building Materials*. 2021; Vol. 299: 123942. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123942>. EDN AUJNFK.

8. Gaifutdinov R.F., Khafizov E.R. Research of abrasive wear of crushed stone for highways. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2020; 1(51): 128–137. (In Russ.) EDN SEFEOI.

9. Kozlov A.P., Dudnikova Yu.N., Zykovi Yu., Sozinov S.A., Ismagilov Z.R. Methodical aspects of determining the porous structure parameters of carbon sorbents based on fossil coals. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2017; 6 (124): 197–203. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2017-6-198-204>

10. Fagerlund, G. Determination of specific surface by the BET method. *Materials and Structures*. 1973; 6, No. 3: 239–245. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf02479039>. EDN VGPWEP.

11. Buzikov Sh.V., Motovilova M.V. Improving the performance of road surfaces with asphalt granulate. *Building and Reconstruction*. 2023; (2): 101–111. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-106-2-101-111>

12. Simonov P. S. Single-impact rock crushing experiment. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020; (1): 71–79. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-1-0-71-79>.

13. Romaniuk V.N. Exergy of Asphalt Concrete Mix. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2003; (4): 69–76. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2003-0-4-69-76>

14. Furmanov D.V., Budanova E.S. Efficiency evaluation of the milling process based on the granulometric analysis of crushed stone-mastic asphalt concrete granulate. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(6): 852–866. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-852-866>. EDN: XPFBRO

15. Golik V.I., Kojiev H.H., Golodov M.A., Armeiskov V.N. Research of the properties of rocks during fragmenting and crushing in mechanical mills. *News of the Ural State Mining University*. 2021; 2(62): 81–87. DOI: <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-81-87>. EDN VZGVFP.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Фурманов Д.В. Организация работы авторского коллектива, формулирование направления и формулирование проблемы исследования, постановка задач и методики проведения исследования, редактирование материала статьи.

Шамахов Л.М. Обзор предшествующих исследований, подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных, подготовка материала для статьи.

Буданова Е.С. Подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных результатов, подготовка отдельных материалов для статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

D.V. Furmanov. Management of the work of the co-authors, identifying the research problem, designing the tasks and research methods, correcting the manuscript.

L.M. Shamakhov. Review of previous studies, preparing and conducting experimental studies, processing the data obtained, writing the manuscript.

E.S. Budanova. Preparing and conducting experimental studies, processing the obtained results, writing some sections of the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фурманов Денис Владимирович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр-т, 88).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6932-6477>,

SPIN-код: 6237-2284,

e-mail: denis_furmanov@mail.ru

Шамахов Леонид Михайлович – аспирант, ассистент кафедры «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр-т, 88).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7559-282X>,

SPIN-код: 9115-7950,

e-mail: leonid.shamakhov@yandex.ru

Буданова Екатерина Сергеевна – аспирант Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, 64).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7962-0203>,

SPIN-code: 7600-9464.

e-mail: Cat156026@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Denis V. Furmanov – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Construction and Road Machinery Yaroslavl State Technical University (Moskovsky Prospekt., 88, Yaroslavl, 150023).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6932-6477>,

SPIN-code: 6237-2284,

e-mail: denis_furmanov@mail.ru

Leonid M. Shamakhov – Postgraduate student, assistant of the Department of “Construction and Road Machinery” of Yaroslavl State Technical University (Moskovsky Prospekt., 88, Yaroslavl, 150023).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7559-282X>,

SPIN-код: 9115-7950,

e-mail: leonid.shamakhov@yandex.ru

Ekaterina S. Budanova – Postgraduate student at Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (Leningradsky Prospekt. 64, Moscow, 125319)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7962-0203>,

SPIN-code: 7600-9464,

e-mail: Cat156026@yandex.ru

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.13
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-568-577>
EDN: JADMFR



МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРА «АВТОМОБИЛЬ» НА БЕЗОПАСНОСТЬ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

А.В. Игнатов¹ ✉, В.Н. Басков²

¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ),
г. Санкт-Петербург, Россия

²Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
г. Саратов, Россия

✉ ответственный автор
samohod1990@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена анализу влияния различных факторов, характеризующих элемент «Автомобиль» в рамках системы «Водитель-Автомобиль-Дорога-Среда» (ВАДС) на безопасность дорожного движения. Сформулирована цель и обозначена актуальность исследования.

Материалы и методы. Отражены 5 скоростей безопасности, характеризующих взаимодействие транспортного средства и пешехода. Описано влияние фактора устойчивости на безопасность дорожного движения при помощи оценки критических скоростей увода колес, скольжения, опрокидывания, аквапланирования (глизсирования). Представлены особенности влияния поворачиваемости колес автомобиля на условия безопасной эксплуатации автомобиля. Дана оценка необходимости определения динамического габарита, а также тормозных и остановочных путей, в т.ч. с учетом оснащения транспортного средства антиблокировочной системой.

Результаты. Сделан вывод о необходимости комплексной оценки влияния наиболее значимых факторов каждого элемента системы «Водитель-Автомобиль-Дорога-Среда» с учетом их количественных и качественных характеристик и особенностей взаимного влияния. Авторами разработаны коэффициенты оценки влияния фактора «Автомобиль» в системе ВАДС. Дано обоснование продолжения дальнейших исследований взаимного влияния основных показателей системы ВАДС.

Обсуждение и заключение. Результаты исследования предназначены для структур, осуществляющих деятельность в области безопасности дорожного движения. Настоящее исследование является составной частью разработки общей методологии оценки показателей системы ВАДС.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автомобиль, безопасность дорожного движения, скорость, дистанция, динамический габарит, коэффициент сцепления, тормозные свойства, устойчивость

БЛАГОДАРНОСТИ: коллектив авторов благодарит Министерство транспорта и дорожного хозяйства Саратовской области, сотрудников кафедры транспортных систем и дорожно-мостового строительства СПбГАСУ, редакцию журнала «Вестник СиБАДИ», а также рецензентов статьи.

Статья поступила в редакцию 09.06.2025; одобрена после рецензирования 07.08.2025; принята к публикации 22.08.2025.

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: Игнатов А.В., Басков В.Н. Методика оценки влияния фактора «автомобиль» на безопасность дорожного движения // Вестник СиБАДИ. 2025. Т. 22, №. 4. С. 568-577. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-568-577>

© Игнатов А.В., Басков В.Н., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-568-577>

EDN: JADMFR

METHODOLOGY FOR THE IMPACT ASSESSMENT OF THE «AUTOMOBILE» FACTOR ON ROAD SAFETY

Anton V. Ignatov¹ ✉, Vladimir N. Baskov²

¹Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint Petersburg, Russia

²Saratov State Technical University named after Yu. A. Gagarin,
Saratov, Russia

✉ corresponding author
camoxod1990@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The article is devoted to the analysis of the influence of various factors characterizing the element «Automobile» within the framework of the «Driver-Automobile-Road-Environment» system (DARE) on road safety. The purpose of the study has been formulated and the research relevance has been outlined.

Materials and methods. Five safety speeds characterizing the interaction between vehicle and pedestrian are reflected. The influence of the stability factor on road safety is described with the help of estimation of critical speeds of wheel drifting, sliding, overturning, aquaplaning (hydroplaning). The peculiarities of the influence of vehicle wheel turning ability on the conditions of safe vehicle operation are presented. The necessity of determining the dynamic dimension, as well as braking and stopping distances is assessed, including consideration of the vehicle equipped with anti-lock system.

Results. The conclusion about the need to assess comprehensively the influence of the most significant factors of each element of the «Driver-Automobile-Road-Environment» system, taking into account their quantitative and qualitative characteristics and features of mutual influence has been made. The authors have developed coefficients for estimation the significance of the «Automobile» factor in the «Driver-Automobile-Road-Environment» (DARE) system. A justification to continue the further studies of the mutual influence of the main indicators in «Driver-Automobile-Road-Environment» (DARE) system has been given.

Discussion and conclusions. The results of the study are intended for the organizations carrying out activities in the field of road safety. This study is an integral part of the development of a general methodology for assessing the indicators of the «Driver-Automobile-Road-Environment» (DARE) system.

KEYWORDS: automobile, road safety, speed, distance, dynamic clearance, traction coefficient, braking properties, stability

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors express their gratitude to the Ministry of Transport and Road Facilities of the Saratov Region, to the staff of the Department of Transport Systems and Road and Bridge Construction of St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, to the editorial board of The Russian Automobile and Highway Industry Journal, and to the reviewers of the article.

The article was submitted: July, 09, 2025; **approved after reviewing:** August, 07, 2025; **accepted for publication:** August 22, 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. Ignatov A.V., Baskov B.N. Methodology for the impact assessment of the «Automobile» factor on road safety. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (4): 568-577. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-568-577>

© Ignatov A.V., Baskov B.N., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

В составе системы «Водитель-Автомобиль-Дорога-Среда» (ВАДС) элемент «Автомобиль» является одним из важнейших составляющих, который влияет на обеспечение безопасности дорожного движения (БДД). Скорость движения транспортного средства (ТС) с учетом сопутствующих факторов влияет на возникновение дорожно-транспортного происшествия в различных ситуациях. С учетом движения в составе плотного транспортного потока (ТП) скорость одиночного автомобиля должна быть близкой к средней скорости потока. В случае взаимодействия с пешеходом, переходящим дорогу, ТС должно двигаться с такой скоростью, чтобы не совершить наезд на него. С учетом колесной базы и осевых нагрузок от выбора скорости зависит увод колес. От коэффициента сцепления, угла поперечного уклона дороги и радиуса поворота зависит вероятность увода автомобиля в занос, а с учетом высоты центра тяжести и риск опрокидывания. При дополнительном воздействии высоты водяного слоя движение ТС может производиться в условиях аквапланирования (глиссирования), на возникновение которого также влияет тип и рисунок протектора, скорость движения. Вместе с этим на вероятность возникновения опасной ситуации влияет обеспечение безопасной дистанции с позиции необходимой величины, как минимум тормозного, а как максимум остановочного пути, в т.ч. фактор поворачиваемости колес. Целью работы является разработка методологии оценки элементов системы ВАДС на безопасность дорожного движения. Актуальность исследования подтверждается высоким уровнем автомобильной аварийности как с пострадавшими/погибшими, так и с материальным ущербом. Вопросам оценки БДД с учетом отдельных составляющих системы ВАДС посвящены следующие работы [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С точки зрения движения в плотном ТП водители должны в соответствии с п. 10.1 ПДД

РФ двигаться на автомобиле со скоростью не выше установленных в Правилах ограничений с обязательным учетом окружающих условий, в особенности метеорологических¹. Важно при этом также осуществлять движение ТС со скоростью, близкой к скорости ТП. В противном случае повышается риск возникновения ДТП по причине столкновения или потере управляемости.

С позиции взаимодействия ТС с пешеходом, переходящим дорогу, известны 5 условно безопасных скоростей, которые характеризуются следующими особенностями [10, 11]:

1. Минимальная скорость, с которой ТС сможет остановиться перед пешеходом при помощи экстренного торможения.

2. Минимальная скорость, с которой ТС сможет проехать траекторию движения пешехода до его подхода к месту предполагаемого наезда.

3. Максимальная скорость, с которой ТС сможет проехать траекторию движения пешехода, когда последний уже пройдет место предполагаемого наезда.

4. Максимальная скорость, с которой ТС сможет пропустить пешехода при экстренном торможении с учетом небольшого заезда за пределы траектории движения последнего.

5. Минимальная скорость, с которой ТС сможет проехать мимо пешехода даже при применении экстренного торможения.

На обеспечение безопасных условий эксплуатации автомобиля также влияют характеристики его устойчивости как продольной, так и поперечной. Нарушение устойчивости приводит к незапланированному водителем изменению траектории движения ТС, вплоть до возникновения заноса. Одним из таких показателей, характеризующих устойчивость, является увод колес, который возникает вследствие конструктивных особенностей колес и шин при дополнительном воздействии боковых сил и уклона дороги. Достижение этих взаимосвязанных причин возможно на определенной скорости, которую называют критической скоростью по уводу²:

¹ О правилах дорожного движения: постановление Правительства Рос. Федерации от 23 октября 1993 г. № 1090 // Собр. актов Президента и Правительства Рос. Федерации. 1993. № 47. Ст. 4531.

² Шемшур Е.А. Учебно-методическое пособие к практическим занятиям по дисциплине «Безопасность транспортных средств» / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2015. 80 с.

$$V_{yb} = \sqrt{\frac{gL}{\frac{G_2}{K_{yb2}} - \frac{G_1}{K_{yb1}}}}, \quad (1)$$

$$V_{ск} = \sqrt{\frac{gR(\varphi_y - tg\beta)}{1 + tg\beta\varphi_y}}, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;

L – колесная база, м;

G_1, G_2 – осевые нагрузки на соответствующие оси, Н;

K_{yb} – коэффициент сопротивления уводу, кН/рад.

Для оценки вероятности возникновения опасности скольжения ТС или его опрокидывания (рисунок 1) используются математические модели расчета критических скоростей для соответствующих событий³:

$$V_{опр} = \sqrt{\frac{0,5B - tg\beta h_g}{h_g + 0,5Btg\beta}} Rg, \quad (3)$$

где R – радиус поворота, м;

φ_y – коэффициент сцепления;

B – средняя ширина колеи ТС, м;

h_g – высота центра тяжести, м;

β – угол поперечного уклона дороги, град.

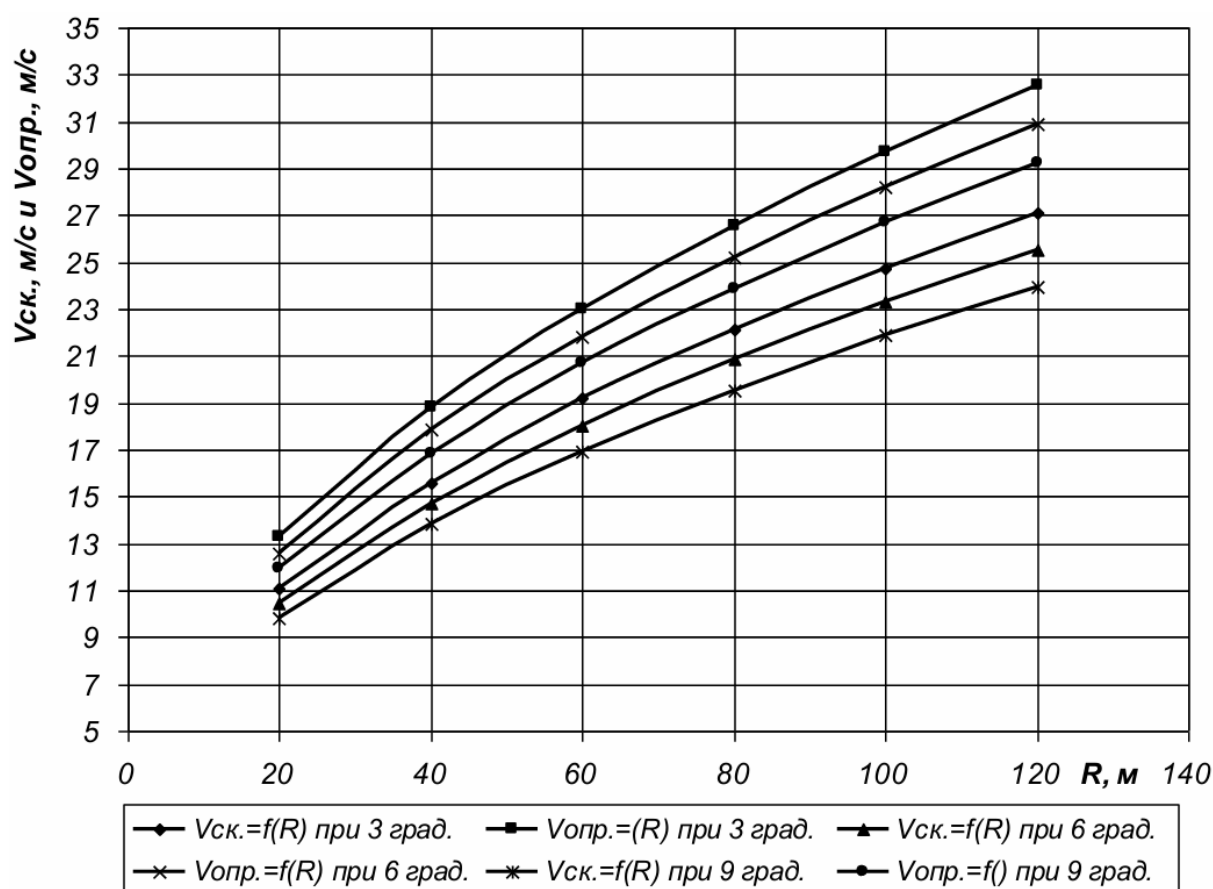


Рисунок 1 – Зависимость критических скоростей скольжения и опрокидывания от радиуса поворота⁴

Figure 1 – Dependence of critical sliding and overturning speeds on the turning radius⁴

³ Шемшур Е.А. Учебно-методическое пособие к практическим занятиям по дисциплине «Безопасность транспортных средств»... 2015. 80 с.

⁴ Там же.

В осенний и весенний периоды, на которые приходится основная доля выпадения осадков, а также таяния снега существенную опасность влечет за собой образование процесса аквапланирования (глиссирования) ТС в результате полной потери сцепления колес с дорогой из-за образования водяного слоя между ними. Геометрические параметры водяного покрытия отражены на рисунке 2.

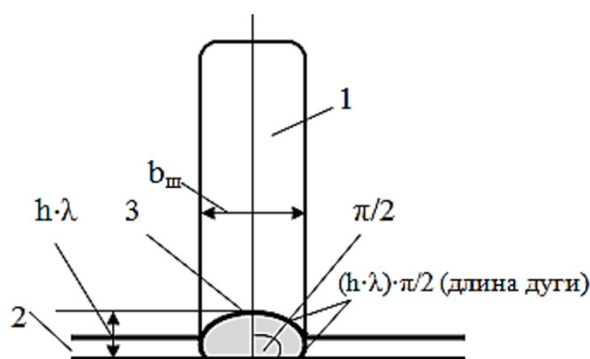


Рисунок 2 – Геометрические параметры водяного покрытия: 1 – шина, 2 – водяное покрытие, 3 – верхний слой смоченной поверхности шины [12]

Figure 2 – Geometric parameters of the water coating: 1 – tire, 2 – water layer, 3 – top layer of the wetted tire surface [12]

Сопутствующими факторами, влияющими на этот процесс, являются конструкция шин, масса и тип привода ТС. Оценка вероятности возникновения аквапланирования также производится на основании расчета критической скорости [12]:

$$V_{гл} = \frac{10^6 G_k}{h \lambda b_{ш} \frac{\pi}{2} \rho \eta}, \quad (4)$$

где G_k – нагрузка, передаваемая на дорожное покрытие от колеса, Н;

h – высота водяного слоя, мм;

λ – степень увеличения глубины воды перед колесом (1,5–1,6);

$b_{ш}$ – ширина беговой дорожки, мм;

ρ – плотность воды, кг/м³;

η – поправочный коэффициент влияния шины на процесс аквапланирования с учетом допустимого уровня износа (0,8–1,0).

Таким образом, оценка составляющих фактора устойчивости ТС является одной из наи-

более важных, т.к. от нее во многом зависит риск возникновения ДТП вследствие заноса и опрокидывания в результате увода ТС, снижения коэффициента сцепления, вплоть до его полной потери, а следовательно, и потери управления автомобилем.

Наиболее безопасными ТС с точки зрения процесса аквапланирования являются переднеприводные автомобили, т.к. после потери сцепления и последующего снижения скорости колеса на передней оси продолжают выбрасывать из-под себя воду, что приведет к соприкосновению колес с дорогой, а следовательно, и возврату сцепления.

На фактор управляемости ТС, помимо состояния рулевого управления, влияет поворачиваемость колес. Наиболее оптимальной и безопасной является нейтральная поворачиваемость, когда увод передних и задних колес одинаков. Недостаточная или избыточная поворачиваемость заставляет водителя предпринимать корректирующие воздействия для обеспечения желаемого курса движения ТС при выполнении поворота, что может привести к ошибкам, приводящим к ДТП из-за непредвиденного изменения траектории движения ТС. Угол поворота управляемых эластичных колес ТС (θ) рассчитывается как⁵

$$\theta = \frac{L}{R_\delta} + \delta_1 - \delta_2, \quad (5)$$

где L – колесная база, м;

R_δ – радиус поворота, м;

δ_1 – угол увода передних колес, рад;

δ_2 – угол увода задних колес, рад.

Еще одной существенной характеристикой в процессе движения автомобиля, помимо скорости, являются тормозные свойства ТС, от которых зависит тормозной и остановочный пути, а также дистанция между автомобилями. На величину тормозного пути влияет начальная скорость движения ТС в момент произведения начала торможения, время срабатывания привода, факторы замедления. Также на величину тормозного пути оказывает влияние наличие антиблокировочной системы (АБС), которая на большинстве типов покрытий (кроме песчаного) позволяет существенно его сократить (рисунок 3).

⁵ Кравец В.Н. Теория автомобиля: учебник. Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. 2-е изд., перераб. Нижний Новгород, 2013. 413 с.

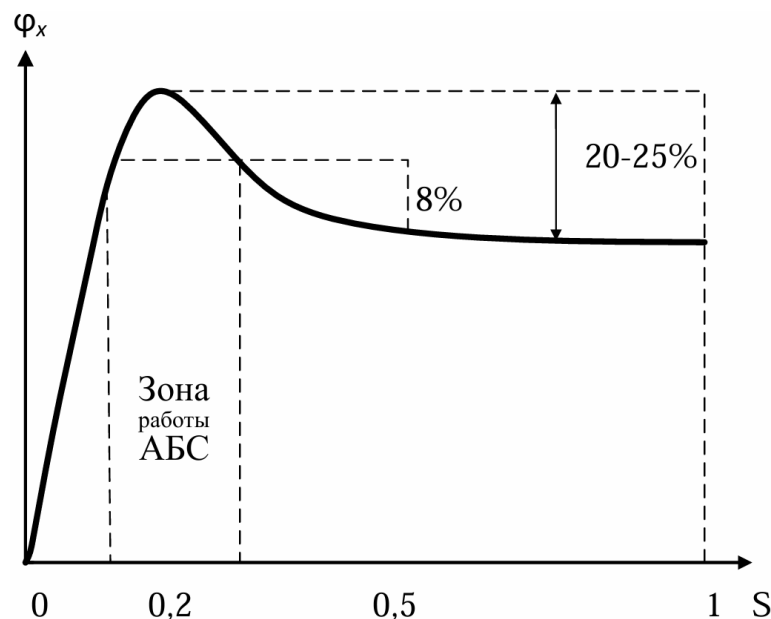


Рисунок 3 – Эффект работы АБС [13]

Figure 3 – Operation effect of anti-lock braking system [13]

Расчет тормозного пути, в т.ч. с учетом наличия АБС, осуществляется следующим образом [13]:

$$S_T = (\tau_0 + 0,5\tau_n)V_0 \frac{V_0^2}{2j_{уст}}, \quad (6)$$

где τ_0 – время запаздывания тормозной системы, с;

τ_n – время нарастания замедления, с;

$j_{уст}$ – установившееся замедление, м/с²;

V_0 – начальная скорость торможения, м/с.

$$S_{АБС} = (\tau_0 + 0,5\tau_n)V_0 + \frac{V_0^2}{2j_{уст}(1+\Delta j)} + \frac{V_{от}^2}{2j_{уст}} \frac{\Delta j}{1+\Delta j}, \quad (7)$$

где $\Delta j = 0,08$ – увеличение замедления вследствие функционирования АБС, м/с²;

$V_{от}$ – значение скорости ТС, соответствующее автоматическому отключению АБС, м/с.

Оценка тормозных свойств ТС важна для определения вероятности возникновения ДТП для таких их видов, как столкновения и наезды.

Более усложненной формой оценки уровня БДД является учет остановочного пути автомобиля по условиям видимости, который проводят по коэффициенту безопасности K_6 , пред-

ложенному К.М. Левитиным⁶. В соответствии с п. 9.10 ПДД РФ «водитель должен соблюдать такую дистанцию до движущегося впереди транспортного средства, которая позволила бы избежать столкновения, а также необходимый боковой интервал, обеспечивающий безопасность движения», т.е. такую ее величину, при которой возникновение ДТП исключено⁷. Сопутствующие факторы в системе ВАДС, влияющие на каждый конкретный автомобиль, разные как в доле, так и в количественном отношении. Более того, они подвержены постоянному изменению с течением времени, следовательно, определение регламентированных значений безопасной дистанции для всех ТС невозможно. Для оценки безопасной дистанции используется показатель динамического габарита, который рассчитывается следующим образом [14]:

$$L_m = V t_p \frac{V^2}{2j} + 2L_a, \quad (8)$$

где t_p – время реакции водителя, с;

V – скорость ТС, м/с;

j – замедление ТС при торможении, м/с²;

L_a – длина ТС, м.

⁶ Левитин К.М. Безопасность движения автомобилей в условиях ограниченной видимости. М., Транспорт, 1986, 187 с.

⁷ О правилах дорожного движения: постановление Правительства Рос. Федерации от 23 октября 1993 г. № 1090 // Собр. актов Президента и Правительства Рос. Федерации. 1993. № 47. Ст. 4531.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенный анализ показал, что при наличии большого числа факторов, влияющих на автомобиль, необходима комплексная их оценка. Одним из самых распространенных способов является сравнение текущего значения условного показателя X с нормативным, т.е. выведение коэффициента

$$K = \frac{X_{\text{факт}}}{X_{\text{норм}}}. \quad (9)$$

Оценка вышеописанных факторов в таком случае может быть произведена при помощи

соответствующих коэффициентов. Например, коэффициентом безопасной скорости одиночного ТС в ТП:

$$K_{V_{\text{бТП}}} = \frac{V_{\text{ТС}}}{V_{\text{ТП}}}, \quad (10)$$

где $V_{\text{ТС}}$ – скорость одиночного ТС, км/ч;

$V_{\text{ТП}}$ – скорость ТП, км/ч.

Следовательно, безопасное значение

$$K_{V_{\text{бТП}}} \approx 1.$$

Авторами предложены следующие коэффициенты оценки влияния фактора «Автомобиль» в системе ВАДС (таблица).

Таблица
Коэффициенты оценки влияния фактора «Автомобиль» в системе ВАДС
Источник: составлено авторами.

Table
Coefficients for assessing the “Automobile” factor influence
in the «Driver-Automobile-Road Environment» (DARE) system.
Source: compiled by the authors.

№ п/п	Коэффициенты оценки влияния фактора «Автомобиль» в системе ВАДС
1	Коэффициент увода ТС по его скорости: $K_{V_{\text{ув}}} = \frac{V_{\text{факт}}}{V_{\text{ув}}} = \frac{V_{\text{факт}}}{\sqrt{\frac{gL}{\frac{G_2}{K_{\text{ув}2}} - \frac{G_1}{K_{\text{ув}1}}}}}$
2	Коэффициент скольжения ТС по его скорости: $K_{V_{\text{ск}}} = \frac{V_{\text{факт}}}{V_{\text{ск}}} = \frac{V_{\text{факт}}}{\sqrt{\frac{gR(\varphi_y - tg\beta)}{1 + tg\beta\varphi_y}}}$
3	Коэффициент опрокидывания ТС по его скорости: $K_{V_{\text{опр}}} = \frac{V_{\text{факт}}}{V_{\text{опр}}} = \frac{V_{\text{факт}}}{\sqrt{\frac{0,5B - tg\beta h_g}{h_g + 0,5Btg\beta} Rg}}$
4	Коэффициент аквапланирования (глиссирования) ТС по его скорости: $K_{V_{\text{гл}}} = \frac{V_{\text{факт}}}{V_{\text{гл}}} = \frac{V_{\text{факт}}}{\frac{10^6 G_k}{h\lambda b_{\text{ш}} \frac{\pi}{2} \rho \eta}}$
5	Коэффициент поворачиваемости ТС: $K_{\theta} = \frac{\theta_{\text{факт}}}{\theta_{\text{нейтр}}}$
6	Коэффициент тормозного пути: $K_T = \frac{S_{\text{т.факт}}}{S_{\text{т.норм}}} \text{ или } \frac{S_{\text{АБС}}}{S_{\text{т.норм}}} = \frac{(\tau_0 + 0,5\tau_n)V_0 + \frac{V_0^2}{2j_{\text{уст}}(1 + \Delta j)} + \frac{V_{\text{от}}^2}{2j_{\text{уст}}} \frac{\Delta j}{1 + \Delta j}}{S_{\text{т.норм}}}$
7	Коэффициент динамического габарита: $K_{L_m} = \frac{L_{\text{м.факт}}}{L_m} = \frac{L_{\text{м.факт}}}{Vt_p \frac{V^2}{2j} + 2L_a}$

Также следует отметить, что к элементу «Автомобиль» можно отнести факторы микроклимата, которые в также относятся и к элементу «Среда», а именно уровень вибрации, шума, температуры и влажности внутри салона (кабины) ТС, запыленности и загазованности. Влияние этих факторов осуществляется в первую очередь на водителя, в результате чего снижается его работоспособность, внимание, повышается время реакции и скорость утомления, что негативно сказывается на общем показателе надежности водителя, тем самым повышая риск возникновения аварийно-опасной ситуации [15, 16, 17]. Оценка этих факторов производится на основании нормативных документов, в которых отражены их предельные величины (Приказ Минтруда России от 21.11.2023 № 817н, ГОСТ 33555–2022, ГОСТ Р 53828–2010) и позволит прогнозировать вероятность возникновения ДТП.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на безопасное функционирование системы ВАДС значительное влияние оказывает элемент «Автомобиль». Рассмотрев основные факторы, оказывающие влияние на элемент «Автомобиль», входящий в систему ВАДС, делается вывод о необходимости комплексного их учета из числа наиболее значимых и поддающихся количественной и/или качественной оценке. Часть факторов, относящихся к элементу «Автомобиль» невозможно оценить по причине отсутствия точных и объективных критериев оценки (внешняя и внутренняя информативность ТС, эргономика рабочего места водителя и т.д.), а также влияния на них значительного количества сопутствующих факторов.

Также необходимо, по такому же принципу, произвести учет наиболее значимых и поддающихся объективной оценке факторов в рамках других элементов системы ВАДС с учетом их взаимного влияния. Настоящее исследование позволит осуществить прогноз вероятности возникновения ДТП при помощи комплексной оценки основных факторов, влияющих на каждый элемент системы ВАДС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Davis B., Kairatolla A., Almagul B. Driver's reliability and its effect on road traffic safety // *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 149. P. 463–466.
2. Lina S.V., Michael J.B. Toward a greater understanding of Colombian professional truck drivers' safety // *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2020. Vol. 73. P. 188–204.
3. Navid G., Ennia A., Valeria V. Road Safety Review update by using innovative technologies to investigate driver behavior // *Transportation Research Procedia*. 2020. Vol. 45. P. 368–375.
4. Ильина И.Е., Витвицкий Е.Е. Индексы для оценки уровня безопасности дорожного движения в регионах // *Вестник СибАДИ*. 2025; 22(1): 68–77. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-68-77>. EDN: XVCDWQ
5. Дорохин С.В., Рудь В.А. Роль инновационных систем регулирования дорожного движения в транспортной инфраструктуре мегаполисов РФ // *Мир транспорта и технологических машин*. 2024. № 4-2(87). С. 122–127. DOI: [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-4-2\(87\)-122-127](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-4-2(87)-122-127)
6. Голов Е.В., Сорокина Е.В., Евтюков С.С. Специфика колееобразования как фактора риска дорожно-транспортных происшествий в подсистеме «Автомобильная дорога» // *Транспорт Урала*. 2023. № 2(77). С. 79–85.
7. Басков В.Н., Исаева Е.И. Влияние параметров УДС на формирование мест концентрации ДТП // *Мир транспорта и технологических машин*. 2023. № 3-5(82). С. 49–57. DOI: [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-3-5\(82\)-49-57](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-3-5(82)-49-57)
8. Haque M. Ohi-dul, Haque Tariq Ohidul Evaluating the effects of the road safety system approach in Brunei // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2018. Vol. 118. P. 594–607.
9. Kurakina E., Evtukov S., Ginzburg G. Systemic indicators of road infrastructure at accident clusters // *Architecture and Engineering*. 2020. Vol. 5, No. 1. P. 51–58.
10. Енин А.С. Безопасные скорости автомобиля в конфликте с пешеходом // *Вестник Харьковско-го национального автомобильно-дорожного университета*. 2009. № 47. С. 23–25.
11. Голов Е.В. Фактор скорости в системе безопасности дорожного движения // *Вестник гражданских инженеров*. 2021. № 3(86). С. 139–148.
12. Ковалев В.А., Фадеев А.И., Воеводин Е.С. Определение скорости возможного аквапланирования // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2014. № 5(88). С. 115–119.
13. Витковский С.Л. Оценка тормозного пути автомобиля с антиблокировочной системой при дорожных испытаниях // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2016. № 1(49). С. 179–183.
14. Якунина Н.В., Нургалиева Д.Х., Легащев С.В., Мухамедов Д.С. Моделирование структуры пассажирских автотранспортных потоков с использованием показателя динамического габарита пассажира // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. 2015. № 4. С. 140–144.
15. Христофоров Е.Н., Сакович Н.Е. Свойства водителя и их влияние на безопасность движения транспортных средств // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2021. № 1(98). С. 34–42.
16. Якунин И.Н. Влияние высоких температур и солнечной радиации на аварийность на ав-

томобильном транспорте в летнее время. Вестник СибАДИ. 2020; 17(6): 704–713. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-704-713>

17. Верещагин С.Б. Натурные ходовые испытания для изучения климатических факторов, воздействующих на водителя в условиях высоких температур // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 2(133). С. 68–73.

REFERENCES

1. Davis B., Kairatolla A., Almagul B. Driver's reliability and its effect on road traffic safety. *Procedia Computer Science*. 2019; Vol. 149: 463–466.
2. Lina S.V., Michael J.B. Toward a greater understanding of Colombian professional truck drivers' safety. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2020; Vol. 73: 188–204.
3. Navid G., Ennia A., Valeria V. Road Safety Review update by using innovative technologies to investigate driver behavior. *Transportation Research Procedia*. 2020; Vol. 45: 368–375.
4. 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. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-68-77>. EDN: XVCDWQ
5. Dorokhin S.V., Rud V.A. The role of innovative traffic regulation systems in transport infrastructure of Russian megacities. *World of transport and technological machines*. 2024; 4-2(87): 122–127. (In Russ.) DOI: [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-4-2\(87\)-122-127](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-4-2(87)-122-127)
6. Golov E.V., Sorokina E.V., Evtyukov S.S. The specifics of wheeltrack formation as a risk factor for road traffic accidents in the «Motor road» subsystem. *Transport of the Urals*. 2023; 2(77): 79–85. (In Russ.)
7. Baskov V.N., Isaeva E.I. Influence of uds parameters on the formation of accident concentration sites. *World of transport and technological machines*. 2023; 3-5(82): 49–57. (In Russ.) DOI: [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-3-5\(82\)-49-57](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-3-5(82)-49-57)
8. Haque M. Ohi-dul, Haque Tariq Ohidul Evaluating the effects of the road safety system approach in Brunei. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2018; Vol. 118: 594–607.
9. Kurakina E., Evtyukov S., Ginzburg G. Systemic indicators of road infrastructure at accident clusters. *Architecture and Engineering*. 2020; Vol. 5, No. 1: 51–58.
10. Enin A.S. Safe speeds of the car in a conflict with a pedestrian. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Road University*. 2009; 47: 23–25. (In Russ.)
11. Golov E.V. Speed factor in the system of road traffic safety. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2021; 3(86): 139–148. (In Russ.)
12. Kovalev V.A., Fadeev A.I., Voevodin E.S. Determination of the speed of possible aquaplaning.

Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2014; 5(88): 115–119. (In Russ.)

13. Vitkovskiy S.L. Estimation of the braking distance of the car with the antilock system in road tests. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2016; 1(49): 179–183. (In Russ.)

14. Yakunina N.V., Nurgalieva D.H., Legashev S.V., Mukhamedov D.S. Modeling of the structure of the passenger motor transport flows using the dynamic dimension of the passenger. *Intellect. Innovations. Investments*. 2015; 4: 140–144. (In Russ.)

15. Khristoforov E.N., Sakovich N.E. Driver properties and their impact on vehicle traffic safety. *Bulletin of the Bryansk State Technical University*. 2021; 1(98): 34–42. (In Russ.)

16. Yakunin I.N. Influence of high temperatures and solar radiation on accidents on road transport in the summer. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(6): 704–713. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-704-713>

17. Vereshchagin S.B. Field sea trials to study climatic factors affecting the driver in high temperature conditions. *Transactions of NNSTU n.a. R.E. ALEKSEEV*. 2021; 2(133): 68–73. (In Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Игнатов А.В. Анализ научной и нормативно-правовой литературы по изучаемой проблеме, формулировка проблемы и поставленных задач, поиск возможных методов исследования, разработка коэффициентов оценки влияния фактора «Автомобиль» в системе ВАДС, подготовка текста статьи.

Басков В.Н. Научное консультирование проводимого исследования, включая корректирование формулировки проблемы и поставленных задач, формирование общей схемы проведения и выбор методов исследования, контроль корректности используемой терминологии и полученных результатов, научная редакция статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

A.V. Ignatov Analysis of scientific and regulatory literature on the subject under study, formulation of the problem and objectives, searching for possible research methods, development of coefficients for the impact assessment of the «Automobile» factor in the «Driver-Automobile-Road-Environment» (DARE) system, preparation of the article text.

V.N. Baskov Scientific consulting on the conducted research, including correction of the formulation of the problem and objectives, development of the general research plan and selection of research methods, control of the correctness of the used terminology and obtained results, scientific editing of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Игнатов Антон Валерьевич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Транспортных систем и дорожно-мостового строительства» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7166-1354>,

SPIN-код: 2701-9700,

e-mail: camoxod1990@yandex.ru

Басков Владимир Николаевич – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Организация перевозок, безопасность движения и сервис автомобилей» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (410054, г. Саратов, Политехническая ул., 77).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4918-0302>,

SPIN-код: 7779-6307,

e-mail: sedankin29@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton V. Ignatov – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Transport Systems and Road and Bridge Construction Department, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2-nd Krasnoarmeyskaya Street, St. Petersburg, 190005).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7166-1354>,

SPIN-код: 2701-9700,

e-mail: camoxod1990@yandex.ru

Vladimir N. Baskov – Dr. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of Organization of Transportations, Traffic Safety and Car Service Department, Saratov State Technical University named after Yu. A. Gagarin (Politekhnikeskaya st., 77, Saratov, 410054).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4918-0302>,

SPIN-code: 7779-6307,

e-mail: sedankin29@mail.ru

Научная статья
УДК 656.025.4:004.8
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-578-589>
EDN: VLMXXD



СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОЛЬЦЕВЫХ ПЕРЕСЕЧЕНИЙ ДЛЯ ВЫСОКОАВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

А.М. Жданова^{1,2} ✉, А.В. Старостенко^{3,4}, Д.А. Царев^{1,2}

¹АО «СТАР-Проект»,

г. Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ),

г. Санкт-Петербург, Россия

³АО ПО «РосДорСтрой»,

г. Валдай, Россия

⁴Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
г. Москва, Россия

✉ ответственный автор

anastasiiazhdanova22@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В связи со стремительным развитием высокоавтоматизированных транспортных средств (ВАТС) становится всё более актуальным вопрос адаптации существующей дорожной инфраструктуры для обеспечения их бесперебойной и безопасной работы. Кольцевые пересечения, благодаря своей способности сокращать количество потенциальных аварийных ситуаций и повышать общую безопасность по сравнению с обычными перекрёстками, рассматриваются как вариант повышения безопасности дорожного движения, однако не являются существенными в плане повышения пропускной способности и оптимизации движения.

Материалы и методы. Данная работа посвящена сравнительной оценке эффективности использования ВАТС на кольцевых пересечениях. В статье рассматриваются достоинства ВАТС, их воздействие на транспортный поток и анализируются результаты моделирования на микро- мезоуровне с помощью программного обеспечения SUMO, демонстрируется влияние различных конфигураций кольцевых пересечений на движение в потоке пилотируемых и беспилотных транспортных средств.

Результаты. Результаты моделирования показали, что применение кольцевых пересечений для движения чистого потока ВАТС неэффективно. Несмотря на то, что кольцевые пересечения позиционируются как способ повышения безопасности дорожного движения за счет исключения конфликтных точек пересечения и замены их на точки переплетения, алгоритмический проезд перекрестков ВАТС не предполагает возникновения опасных ситуаций, так как конфликты решаются заранее. Наиболее важным фактором для увеличения пропускной способности ВАТС на перекрестке является ширина дорожного полотна. На данный момент точные количественные показатели влияния ширины дорожного полотна на пропускную способность ВАТС не установлены, однако можно выделить такие важные аспекты, как возможность равномерного движения потока без остановок, характерных для пилотируемых автомобилей, и, как следствие, более плотное движение колонн ВАТС.

Обсуждение и заключение. Полученные в рамках исследования выводы могут служить основой для оптимизации существующей транспортной инфраструктуры и формирования рекомендаций по созданию перекрёстков, приспособленных к условиям автономного движения, а также для дальнейших исследований, направленных на повышение пропускной способности различных видов пересечений дорог в условиях высокой автоматизации транспортного потока.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: организация дорожного движения, кольцевые пересечения, высокоавтоматизированные транспортные средства, транспортные потоки, безопасность дорожного движения, транспортное моделирование

Статья поступила в редакцию 20.06.2025; одобрена после рецензирования 21.07.2025; принята к публикации 22.08.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

© Жданова А.М., Старостенко А.В., Царев Д.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

Для цитирования: Жданова А.М., Старостенко А.В., Царев Д.А. Сравнительное исследование эффективности кольцевых пересечений для высокоавтоматизированных транспортных средств // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, №. 4. С. 578-589. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-578-589>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-578-589>

EDN: VLMXXD

COMPARATIVE RESEARCH INTO ROUNDABOUT PERFORMANCE FOR HIGHLY AUTOMATED VEHICLES

Anastasia M. Zhdanova^{1,2} ✉, Andrey V. Starostenko^{3,4}, Danil A. Tsarev^{1,2}

¹STAR-Project JSC,

St. Petersburg, Russia

²St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU),

St. Petersburg, Russia

³JSC "PO RosDorStroy",

Valdai, Russia

⁴Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI),

Moscow, Russia

✉ corresponding author

anastasiiazhdanova22@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. With the rapid development of highly automated vehicles (HAVs), the issue of adapting existing road infrastructure to ensure their uninterrupted and safe operation is becoming increasingly relevant. Roundabouts, due to their ability to reduce the number of potential conflict points and improve overall safety compared to conventional intersections, are considered as a means of enhancing road safety. However, they are not significantly effective in terms of increasing capacity and optimizing traffic flow.

Materials and Methods. This study is dedicated to a comparative assessment of the efficiency of HAVs on roundabouts. The paper examines the advantages of HAVs, their impact on traffic flow, and analyzes simulation results at the micro (or meso-) level using SUMO software. It demonstrates the influence of different roundabout configurations on the movement of both manually driven and autonomous vehicles within traffic streams.

Results. Simulation results have shown that the use of roundabouts for pure HAV traffic flow is inefficient. Although roundabouts are promoted as a way to improve road safety by replacing conflict points with weaving zones, the algorithmic navigation of HAVs on intersections inherently prevents hazardous situations, as conflicts are resolved in advance. The most critical factor for increasing the throughput of HAVs at intersections is the width of the roadway. At present, no precise quantitative indicators to demonstrate the road width impact on HAVs capacity have been established, however, it is possible to highlight such important aspects as the possibility of uniform traffic flow, typical for piloted vehicles, and, hence, higher volume of HAV traffic flow.

Discussion and Conclusion. The findings of this study can serve as a foundation for optimizing existing transportation infrastructure and developing recommendations for designing intersections adapted to autonomous traffic conditions. They also provide a basis for further research aimed at increasing the capacity of various types of road intersections under high levels of traffic automation.

KEYWORDS: traffic management, roundabout junctions, highly automated vehicles, traffic flows, traffic safety, transport modeling

The article was submitted: June 26, 2025; approved after reviewing: July 21, 2025; accepted for publication: August 22, 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. Zhdanova A.M., Starostenko A.V., Tsarev D.A. Comparative research into roundabout performance for highly automated vehicles. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (4): 578-589. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-578-589>

© Zhdanova A.M., Starostenko A.V., Tsarev D.A., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Последние годы стали свидетелями стремительного прогресса в области высокоавтоматизированных транспортных средств (ВАТС), что кардинально меняет наше представление о дорожном движении и структуре транспортной инфраструктуры. ВАТС обладают огромным потенциалом для повышения безопасности, оптимизации работы и увеличения пропускной способности транспортных сетей за счет сокращения времени отклика, более совершенного восприятия дорожной обстановки и возможности согласованного движения [1]. Вследствие этого возникает необходимость в адаптации существующих элементов дорожной инфраструктуры для максимально плодотворной интеграции ВАТС в транспортную сеть.

Внедрение беспилотных транспортных средств на автомобильных дорогах общего пользования является закономерным этапом развития современных интеллектуальных транспортных систем и преследует следующие цели¹:

- повышение безопасности дорожного движения;
- повышение номинальной пропускной способности дорог;
- оптимизация транспортных процессов;
- формирование заданного поведения участников дорожного движения и культуры вождения;
- развитие различных сервисных услуг для пользователей транспортной системы;
- поддержание заданного уровня содержания дорожного полотна и дорожно-транспортной инфраструктуры.

Кольцевые пересечения, благодаря своей способности минимизировать конфликтные ситуации и повышать безопасность по сравнению с обычными перекрёстками, всё чаще рассматриваются как перспективный компонент инфраструктуры для автономных транспортных систем. Однако влияние таких пересечений на манеру движения ВАТС и их эффективность в условиях смешанных потоков движения требует более глубокого изучения. Текущие исследования в основном посвя-

щены традиционному транспорту и не берут во внимание уникальные аспекты функционирования автоматизированных систем управления².

В данном исследовании проводится сравнительная оценка эффективности кольцевых пересечений с использованием ВАТС. В центре внимания находятся ключевые параметры, включая пропускную способность, время ожидания, безопасность и устойчивость транспортного потока. Работа направлена на выявление как преимуществ, так и потенциальных ограничений кольцевых пересечений в условиях увеличения доли высокоавтоматизированных транспортных средств, а также на разработку рекомендаций для проектирования и обновления транспортной инфраструктуры в будущем.

Автомобили, относящиеся к четвертым и пятым уровням автономности по SAE (Society of Automotive Engineers – американская ассоциация автомобильных инженеров), обладают высокой степенью автоматизации и способны передвигаться без водителя в большинстве, а то и во всех дорожных ситуациях. Основанные на компьютерном зрении, лидарах, радарх, высокоточных картах и алгоритмах искусственного интеллекта, эти технологии выступают как ключевой фактор в переформатировании современной транспортной индустрии.

Важнейшим достоинством систем ВАТС является их способность повышать безопасность на дорогах. По данным NHTSA, более 90% аварий на дорогах вызваны человеческим фактором, например, усталостью, рассеянностью или ошибками в принятии решений. Благодаря своей высокой скорости обработки данных, непрерывному мониторингу дорожной ситуации и отсутствию эмоциональных и физиологических факторов, высокоавтоматизированные транспортные средства могут значительно уменьшить количество аварий [2].

ВАТС также выгодно отличаются способностью повышать пропускную способность, а одна из основных целей их внедрения – снижение дорожных заторов: согласно экспериментам по внедрению ВАТС в транспортный поток наличие даже 5% беспилотных автомо-

¹ Распоряжение Правительства РФ от 25.03.2020 № 724-р «Об утверждении Концепции обеспечения безопасности дорожного движения с участием беспилотных транспортных средств на автомобильных дорогах общего пользования» // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <https://pravo.gov.ru/>

² Никитин Н.А., Савина Ю.Э. Анализ эффективности различных конфигураций кольцевых пересечений при проектировании выезда из нового жилого района // Информационные технологии и инновации на транспорте: материалы VI Международной научно-практической конференции (20 мая 2020 года). 2020. С. 127–135.

билей в потоке способно увеличить пропускную способность на 14,1% [3].

Автоматизированные транспортные средства могут передвигаться с более короткими интервалами, оперативно реагировать на изменения дорожной обстановки и поддерживать оптимальную скорость, что в итоге приводит к более эффективному использованию дорожной инфраструктуры. В рамках кооперативных транспортных систем, где несколько автомобилей (BATC) обмениваются данными в режиме реального времени (V2V и V2X-коммуникации), возникает возможность создания так называемых «потоков-поездов» (platooning), что, в свою очередь, способствует еще большей стабильности и плавности движения транспорта [4].

Для успокоения дорожного движения и минимизации последствий аварий с участием реальных водителей используют кольцевые пересечения. Эффективность кругового движения обусловлена тем, что конфликтные точки, характерные для традиционных перекрестков, где встречаются потоки из разных направлений, устраняются, оставляя лишь столкновения при слиянии или разделении потоков. Кольцевая форма пересечения заставляет водителей снизить скорость до 50% при проезде (в зависимости от радиуса островка), что также способствует повышению безопасности [5].

Важно отметить, что круговое движение не всегда является самым эффективным решением, поскольку пропускная способность дорог может быть ограничена, в частности, когда интенсивность движения на прилегающих дорогах максимально загружена³. В реальности, организация кольцевого перекрестка может быть весьма дорогостоящей. При выборе между светофорным регулированием и круговым движением последний вариант часто отбрасывается из-за ограничений, накладываемых пространственными условиями улично-дорожной сети, и предпочтение отдается светофорному регулированию [6, 7].

В условиях стремительного развития BATC становится всё более актуальным вопрос о влиянии кольцевых пересечений на работу BATC и общую эффективность движения на дорогах со смешанным потоком (где ездят и беспилотные, и управляемые человеком ма-

шины). Эти условия добавляют сложность, поскольку требуют прогнозирования и учета человеческого фактора, а также обеспечения безопасного и согласованного взаимодействия между разными типами участников дорожного движения.

По мере увеличения доли автономных транспортных систем (BATC) в общем потоке транспортных средств всё большее внимание уделяется моделированию их функционирования в условиях реального дорожного движения. Исследования показывают, что BATC обладают способностью поддерживать более короткие интервалы движения, сохранять стабильность потока и минимизировать вероятность резких маневров за счет высокой скорости обработки данных и использования согласованных алгоритмов управления [8, 9].

Беспилотные транспортные средства принимают решения, руководствуясь четкими правилами безопасности, что делает их действия более предсказуемыми. Однако эта повышенная предсказуемость может привести к излишней осторожности, особенно в нестандартных ситуациях, например, на кольцевых развязках [10]. Взаимодействие BATC с водителями традиционных транспортных средств, не обладающих высокой дисциплиной, может негативно сказаться на пропускной способности и привести к задержкам в смешанных потоках.

Также стоит отметить, что внедрение BATC требует пересмотра подхода к проектированию дорожной инфраструктуры, поскольку автоматизированные транспортные средства обладают уникальными особенностями восприятия, реакций принятия решений [11]. При значительном количестве BATC на дорогах эффективность перекрестков может быть существенно повышена за счет синхронизации движения и V2V-коммуникации [12].

Заслуживают особого внимания работы, фокусирующиеся на моделировании функционирования BATC на перекрестках и кольцевых развязках без светофоров [13]. Авторы этих исследований предлагают новые концепции управления движением, основанные на распределённых системах приоритетов и взаимодействии транспортных средств в динамике, что может в будущем сделать ненужными традиционные правила предоставления преимущества движения.

³ Никитин Н.А., Савина Ю.Э. Анализ эффективности различных конфигураций кольцевых пересечений при проектировании выезда из нового жилого района // Информационные технологии и инновации на транспорте: материалы VI Международной научно-практической конференции (20 мая 2020 года). 2020. С. 127–135.

Ситуации смешанных потоков, где одновременно присутствуют как автономные беспилотные транспортные системы (BATC), так и автомобили с водителем, представляют собой сегодня самую сложную задачу для моделирования и практического исследования. В научных работах отмечается, что эффективность и безопасность в таких условиях тесно связана с долей BATC в транспортном потоке [14, 15]. В случае малой и средней доли BATC наблюдается неоднозначный эффект: с одной стороны, они приносят предсказуемость и плавность в движение, с другой – их традиционный подход может стать причиной задержек и удлинения времени проезда перекрестков.

Несмотря на множество исследований, посвящённых работе BATC на пересечениях, сравнительная оценка эффективности кругового движения в разных ситуациях (классический поток, смешанный поток, преобладающий поток BATC) по-прежнему требует более глубокого изучения. Отсутствует согласованная методика для количественной оценки преимуществ и недостатков кольцевых пересечений с применением систем BATC, учитывающая реальные действия водителей и многоаспектное влияние инфраструктурных и поведенческих факторов. Такой пробел подчеркивает необходимость комплексного сравнительного исследования, которое позволит устранить существующие неточности и разработать рекомендации по проектированию дорожной инфраструктуры с учетом будущей интеграции BATC.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках исследования было рассмотрено пересечение ул. Свердлова, ул. Дружбы и Октябрьского пр-та в г. Кирове, представляющего собой Y-образное пересечение (рисунок 1).

Данный перекресток является нерегулируемым, однако обладает достаточной площадью для внедрения на ней различных видов организации дорожного движения. Стоит отметить, что существующую ситуацию ОДД можно описать как «хаотичную»: главная дорога проходит по Октябрьскому проспекту, для проезда налево с ул. Дружбы на ул. Свердлова и в обратную сторону водителям необходимо преодолеть достаточно большое пространство, при этом уступив дорогу главному направлению. Данную организацию дорожного движения можно охарактеризовать как небезопасную, так как на ней присутствует большое количество конфликтных точек, а неопытный водитель может растеряться при проезде данного пересечения.

С целью получения информации о составе потока ТС на исследуемом участке несколько раз была проведена фиксация количества и состава потока на пересечении. Полученные результаты были обработаны для получения средних статистических данных. Итоговое значение количества ТС на пересечении – 1516 ед., из которых 1261 ед. – легковые (80%), автобусов малой и большой вместимости – 117 ед. (7%), оставшееся – разной вместимости грузовые автомобили. Для приведения разнородного состава транспортного потока к легковому автомобилю были использованы коэффициенты приведения СП 34.13330.2021. Итоговое значение пиковой интенсивности в приведённых автомобилях – 1723 прив. авт/ч. Данное число является средним по нескольким измерениям пиковой интенсивности, в связи с чем любая конфигурация перекрестка справляется с данной нагрузкой. Отклонение от максимальной зафиксированной интенсивности в 1789 прив. авт/ч – 3,8%, от минимальной в 1657 прив. авт/ч – 4,0 %.

Для упорядочивания движения автомобилей было рассмотрено несколько вариантов организации дорожного движения:

- регулируемое пересечение (внедрение светофорного регулирования);
- кольцевое нерегулируемое пересечение;
- кольцевое регулируемое пересечение.

Основной ход – движение по Октябрьскому проспекту, второстепенный – движение по ул. Свердлова и ул. Дружбы. На кольцевом пересечении допуск к проезду кольцевого пересечения определяется с такой же приоритетностью. Для регулируемого X-образного и кольцевого пересечения были внедрены оптимальные светофорные фазы. Они были рассчитаны, исходя из интенсивностей движения, и оптимизированы инструментами программного обеспечения SUMO, пакета для моделирования мультимодального движения с открытым исходным кодом, предназначенным для работы с большими сетями. SUMO находится в свободном доступе с открытым исходным кодом с 2001 г.

Исходя из представленных данных, скорость проезда X-образного нерегулируемого пересечения считается наибольшей и значительно уменьшается при внедрении светофорного регулирования. Так как основной задачей является эффективное использование площади перекрестка, то наиболее оптимальным из четырех представленных вариантов будет кольцевое нерегулируемое пересечение.



Рисунок 1 – Дорожно-транспортная ситуация на перекрестке
Октябрьский пр-т – ул. Свердлова – ул. Дружбы
Источник: <https://yandex.ru/maps> (дата обращения: 21.04.2025).

Figure 1 – Traffic situation at the intersection of Oktyabrskiy Prospekt – Sverdlova Street – Druzhby Street
Source: <https://yandex.ru/maps> (assessed: 21.04.2025).

Важным фактором в безопасной организации дорожного движения является тяжесть последствий ДТП. При внедрении кольцевой ОДД скорость снизится на 25% до 35,4 км/ч, следовательно, возможные столкновения будут носить низкую тяжесть последствий. Более того, опасность перекрестка снижается на 25% при подсчете конфликтных точек слияния, разделения, пересечения и переплетения и умножении их на необходимые коэффициенты.

Количество остановок на кольцевом нерегулируемом пересечении больше, чем на нерегулируемом Х-образном, однако значительно меньше, чем на двух вариантах регулируемых перекрестков. Так как кольцевая проезжая часть является главной, входящие потоки должны уступить движущимся по кругу транспортным средствам, в связи с чем и объясняется рост количества остановок на кольцевой ОДД. Водители для въезда на кольцо подбирают наилучший момент, однако здесь влияние оказывает человеческий фактор – некоторые водители могут принять решение выехать чуть позже, чем планировали, так как не рассчитали изначальный маневр.

По показателям среднего времени простоя и времени задержки, как и в предыдущих случаях, наиболее эффективным считается самый простой Х-образный нерегулируемый перекресток, однако в абсолютных значениях время задержки на кольцевом нерегулируемом пересечении составляет всего 10 сек, а у Х-образного – 4 сек. Данный факт объясняется тем, что движение машины по прямой занимает меньше времени, чем движение по дуге при кольцевой организации движения. Время простоя также растет, что объясняется необходимостью машин на въездах уступить дорогу движущимся по кольцу автомобилям, как и в случае с ростом количества остановок.

Таким образом, несмотря на эффективность существующего Х-образного пересечения по всем показателям целесообразнее внедрение кольцевой ОДД, так как уменьшение количества параметров не так значительно, как при внедрении светофорного регулирования, а потоки движутся более структурированно: количество конфликтных точек снижается вместе с тяжестью ДТП, а следовательно, безопасность дорожного движения на данном участке повысится при отсутствии в потоке высокоавтоматизированных транспортных средств.

Моделирование динамики высокоавтоматизированных транспортных средств (ВАТС) представляет собой комплексную задачу, требующую применения методов математического анализа и теории системного моделирования. Основная цель – разработка адекватной математической абстракции реального движения с учетом ограничений, накладываемых аппаратными возможностями ВАТС и характеристиками дорожной среды.

Существующие модели дорожного движения можно условно разделить на модели макро-, мезо- и микроуровня. Для ВАТС микроскопический или мезоскопический уровни предпочтительнее, так как они позволяют учитывать возможности координации и оптимизации движения.

В основе большинства микромоделей лежит кинематическое описание движения, определяемое дифференциальными уравнениями, связывающими положение ТС в пространстве с линейной и угловой скоростью. Для упрощения анализа часто используется плоская модель, ограничивающая движение двумя координатами. В этом случае динамика описывается системой уравнений (1):

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v \cdot \cos(\theta) \\ \frac{dy}{dt} = v \cdot \sin(\theta), \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

где θ – угол ориентации транспортного средства;

ω – угловая скорость, рад/с;

v – линейная скорость, м/с;

x, y – координаты на плоскости.

Скорость определяется как текущая (current speed) и желаемая (desired speed). ТС стремится к движению с желаемой скоростью в небольшом нормальном диапазоне от среднего его значения и применяет различную величину ускорения, заданного как эталонное максимальное для конкретного вида транспортного средства. Ускорение как линейное, так и угловое задается как функция управления (2):

$$a = f(v_d - v_c), \quad (2)$$

где v_d – желаемая скорость;

v_c – текущая скорость, м/с;

$f(v_d - v_c)$ – функция управления ускорением, например, пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор, м/с².

Динамическое поведение добавляется через уравнения, учитывающие силы и моменты, действующие на ВАТС. С упрощенной точки зрения чистый поток ВАТС подчиняется модели следования за автомобилем и учитывает желаемую скорость, безопасное расстояние и время реакции. Особенность ВАТС заключается в низком времени реакции, связанном с возможностью быстрого обмена данными между участниками дорожного движения.

Приёмом автомоделной редукции возможен переход от микромоделей к макромоделям, если представить поток транспортных средств как связанный друг с другом пружинами заданной жёсткости ряд шариков, где движение одного крайнего шарика приводит к движению всего ряда с разными силами, подчиняющимися законам механики [16, 17]. Схематично такое представление приведено на рисунке 2, а уравнение относительного удлинения элемента (продольная деформация) принимает вид (3):

$$\frac{d\xi}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\xi(x+\Delta x) - \xi(x)}{\Delta x}, \quad (3)$$

ξ – относительная продольная деформация, м;

x – расстояние безопасности, м;

$x+\Delta x$ – скорректированное расстояние безопасности, м;

$\xi(x+\Delta x) - \xi(x)$ – величина растяжения растяжения, м.

Решив данное уравнение, возможно определить расстояние между транспортными средствами при изменении скорости и положения первого в ряде автомобиля.

Сложности возникают при моделировании пересечения нескольких чистых рядов ВАТС, так как потоки должны предоставлять интервалы в движении для выполнения маневров других, пересекаемых потоков. На практике готовых моделей для проведения таких расчётов нет.

Однако возможен вариант с проведением имитационного моделирования движения ВАТС, где точное местоположение ТС не рассчитывается аналитическим путём, а исходит из выполнения итерационных расчётов оперативно при возникновении необходимости.

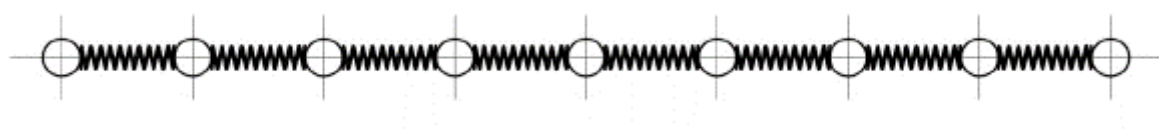


Рисунок 2 – Представление потока ВАТС в виде механической системы [16]

Figure 2 – Representation of the HAV flow as a mechanical system [16]

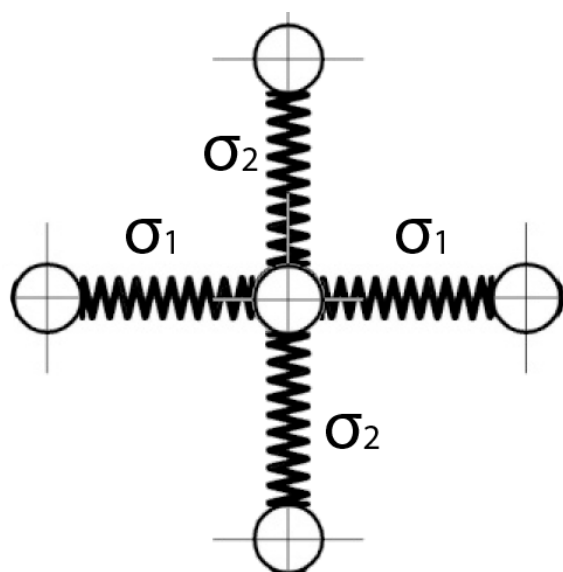


Рисунок 3 – Представление пересечения двух рядов ВАТС в виде механической системы
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Representation of the intersection of two rows of HAV as a mechanical system
Source: compiled by the authors.

В имитационных моделях заданы желаемые скорости и ускорения ТС, расстояния видимости, или, в случае ВАТС, связи между участниками движения, и, соответственно, принимаемые меры по решению конфликтов. ВАТС следует обмениваться информацией с двумя другими ТС, между которыми необходимо выполнение маневра на пересечении и двумя в собственном потоке. Тогда систему можно описать с механической точки зрения как крест тех же шаров, где перпендикулярные связи различаются силой воздействия, однако движение шаров одного ряда не приводит к движению другого. Диагональные шары в

ходе следования также связаны силами, действующими при их последующем пересечении траекторий. Условно схема взаимодействия приведена на рисунке 3. При одинаковых желаемых скоростях рядов $\sigma_1 = \sigma_2$.

Подобные случаи, однако, не могут полноценно быть описаны механическими законами ввиду «непрочной» связи пересекающихся потоков. Но при идентичных скоростях могут быть смоделированы имитационно.

Рассмотрим исследованное ранее пересечение и изменим состав транспортного потока на чистые потоки ВАТС с желаемой скоростью 60 км/ч. Для такого потока безопасная дистанция рассчитывается по формуле (4):

$$d_{\min} = L + T_f [v_r - v_f + p \cdot (a_a + a_b)] - \frac{p^2 a_b}{2} + \frac{(T_r - T_f)(v_r + p a_a - (T_f - p) a_b)}{2}, \quad (4)$$

где L – средняя длина автомобиля;

p – время отклика заднего автомобиля (для ВАТС $p = 0$), с;

v_r, v_f – скорость заднего и переднего автомобиля, м/с;

a_a, a_b – максимальное ускорение (торможение) автомобилей, м/с²;

T_f – время остановки переднего автомобиля при максимальном торможении, с;

T_r – время остановки переднего автомобиля при максимальном ускорении во время отклика и максимальном торможении после, с.

Так как время реакции для ВАТС равно нулю, а скорости и ускорения между автомобилями идентичны, уравнение принимает упрощенный вид (5):

$$d_{\min} = L. \quad (5)$$

Таблица

Параметры эффективности схем ОДД на пересечении Октябрьский пр-т – ул. Свердлова – ул. Дружбы
Источник: составлено авторами.

Table

Efficiency parameters of traffic management schemes at the intersection
of Oktyabrsky Prospekt – Sverdlova Street – Druzhby Street
Source: compiled by the authors.

N п/п	Вид пересечения	Время задержки, с	Скорость средняя, км/ч	Среднее время простоя, с	Общее кол-во остановок	Оценка безопасности перекрестка по конфликтным точкам/по светофорным циклам
1	Х-образный (нерегулируемый) - существующий	4,0	47,3	0,5	248	112
2	Х-образный (регулируемый)	31,7 (+793%)	20,4 (-56%)	22,2 (+4440%)	1194 (+481%)	112/40 (-64%)
3	Кольцевое (нерегулируемый)	10,0 (+250%)	35,4 (-25%)	0,7 (+140%)	477 (+192%)	84 (-25%)
4	Кольцевое (регулируемый)	39,1 (+978%)	18,1 (-61%)	21,4 (+4280%)	1867 (+753%)	84/66 (-41%)
5	БАТС Х-образный (нерегулируемый)	0,4 (-90%)	57,5 (+22%)	0,0 (-100%)	2 (-99%)	112 (-0%)
6	БАТС Кольцевое (нерегулируемый)	7,1 (+77%)	51,3 (+8%)	0,0 (-100%)	5 (-99%)	84 (-25%)

При имитации движения по перекрёстку «Октябрьский проспект – ул. Свердлова – ул. Дружбы» потоков БАТС полученные результаты приведены в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнивая результаты применения кольцевой организации дорожного движения с Х-образным на пересечениях, наблюдается среднее уменьшение скорости движения БАТС на 6,2 км/ч, незначительное увеличение времени задержки на 6,7 сек и увеличение общего количества остановок на 3 ед. Параметры данного конкретного примера связаны с геометрическими параметрами дороги, а именно с близостью расположения съездов на ул. Дружбы, ул. Свердлова и западным направлением Октябрьского проспекта. Уменьшение скорости связано с необходимостью выполнения большего числа маневров БАТС, что приводит к более частому алгоритму просчёта изменения движения всей цепочки.

При сравнении результатов моделирования потока БАТС и пилотируемых ТС наблюдается значительное увеличение средней скорости на 10,2 км/ч для Х-образного и 15,9 км/ч для кольцевого пересечения, снижение времени задержки на 3,6 сек и 32,0 сек соответственно.

С точки зрения безопасности сравнение БАТС с пилотируемыми ТС не представляется возможным ввиду природы управления системой потока беспилотных ТС.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам симуляции возможно сделать вывод, что использование кольцевых пересечений для движения чистого потока БАТС не представляется эффективным. Кольцевые пересечения предполагают повышение безопасности дорожного движения за счёт устранения точек пересечения и заменой их на точки переплетения, однако для алгоритмического проезда перекрёстков БАТС конфликты решаются заранее и не являются опасными.

Сравнение итоговых параметров эффективности для пилотируемых ТС и БАТС приведено на рисунках 4 и 5.

Пиковая интенсивность для пилотируемых ТС в 2 750 прив. авт/ч на Х-образном пересечении приводит к возникновению заторов, в то время как при движении БАТС поток стабилен и способен пропускать до 5 650 прив. авт/ч со сравнимой с комфортными условиями скоростью. Наиболее важным фактором для увеличения пропускной способности БАТС на перекрестке является ширина дорожного полотна.

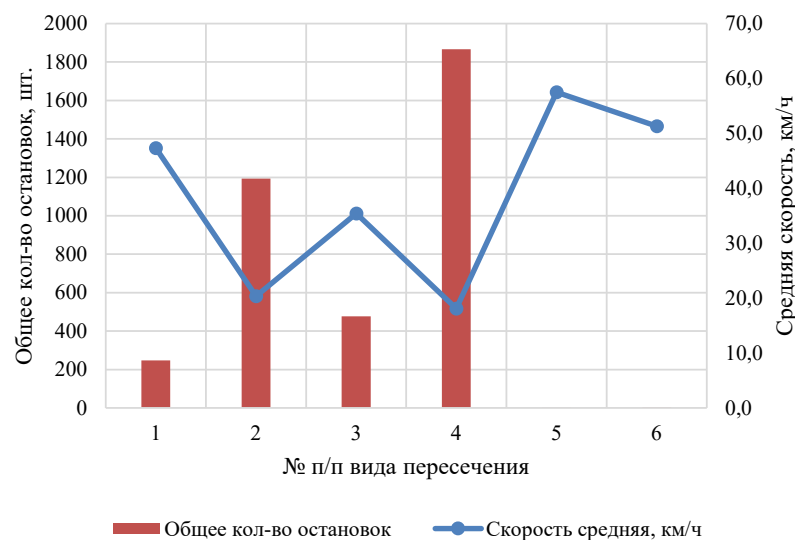


Рисунок 4 – Общее количество остановок и средняя скорость проезда перекрестка Октябрьский проспект – ул. Свердлова – ул. Дружбы
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Total number of stops and average speed of traffic at the Oktyabrsky Prospekt – Sverdlova Street – Druzhby Street intersection
Source: compiled by the authors.

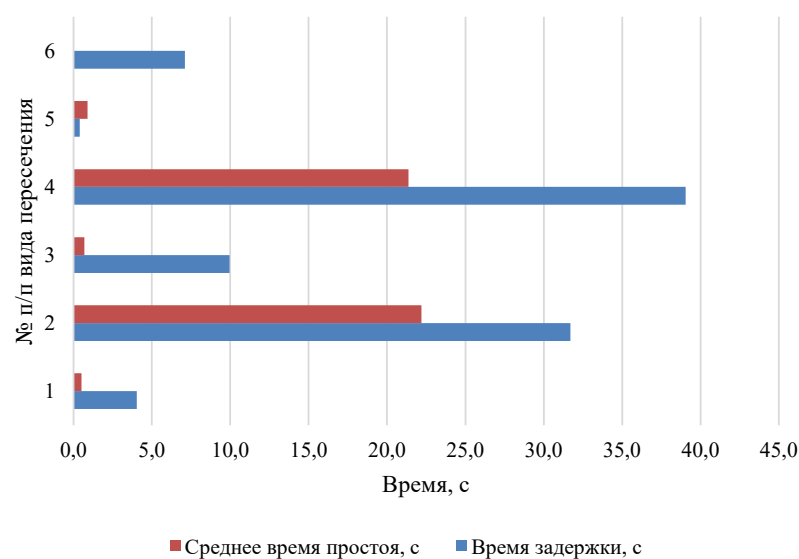


Рисунок 5 – Сравнение показателей среднего времени простоя и времени задержки перекрестка Октябрьский проспект – ул. Свердлова – ул. Дружбы
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Comparison of the average downtime and delay time at the Oktyabrsky Prospekt – Sverdlova Street – Druzhby Street intersection
Source: compiled by the authors.

На данный момент точные количественные показатели влияния ширины дорожного полотна на пропускную способность БАТС не установлены, однако можно выделить такие важные аспекты, как возможность равномерного

движения потока без остановок, характерных для пилотируемых автомобилей и вызванных человеческим фактором, и, как следствие, более плотное движение колонн БАТС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Подопригора Н.В. Алгоритмы диагностирования конструктивных систем высокоавтоматизированных транспортных средств // Мир транспорта и технологических машин. 2023. №. 4-1 (83). С. 3–8. DOI: [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-4-1\(83\)-3-18](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-4-1(83)-3-18)
2. Грошев А.М., Тумасов А.В. Беспилотные транспортные средства: настоящее и будущее // Транспортные системы. 2016. №. 2. С. 68.
3. Stern R.E. et al. Dissipation of stop-and-go waves via control of autonomous vehicles: Field experiments // *Transportation research part C: emerging technologies*. 2018. Т. 89. С. 205–221.
4. Пырнова О.А., Зарипова Р.С. Автономные машины и искусственный интеллект // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. 2020. №. 3. С. 46–49.
5. Голов Е.В. Фактор скорости в системе безопасности дорожного движения // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 3(86). С. 139–148.
6. Солодкий А.И. Проектирование экономически эффективной улично-дорожной сети городов // Вестник. Зодчий. 21 век. 2013. № 1(46). С. 078–081.
7. Солодкий А.И., Черных Н.В. Повышение уровня обслуживания дорожного движения на улично-дорожной сети городов // Техника и технология транспорта. 2019. № S(13). С. 70.
8. Schwarting W., Alonso-Mora J., Rus D. Planning and Decision-Making for Autonomous Vehicles. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*. 2018. Vol. 1. P. 187–210.
9. Rios-Torres J., Malikopoulos A.A. A Survey on the Coordination of Connected and Automated Vehicles at Intersections and Merging at Highway On-Ramps // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2017. Vol. 18, No. 5. P. 1066–1077.
10. Levin M.W., Boyles S.D. Effects of Autonomous Vehicle Ownership on Trip, Mode, and Route Choice // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2016. No. 2565. P. 1–9.
11. Talebpour A., Mahmassani H.S. Influence of Connected and Autonomous Vehicles on Traffic Flow Stability and Throughput // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2016. Vol. 71. P. 143–163.
12. Chen D., Ahn S., Chitturi M., Noyce D.A. Towards Vehicle Automation: Roadway Capacity Formulation for Traffic Mixed with Regular and Automated Vehicles // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017. Vol. 100. P. 196–221.
13. Dresner K., Stone P. A Multiagent Approach to Autonomous Intersection Management // *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2008. Vol. 31. P. 591–656.
14. Zhou M., Jin S., Wang H. Simulation-Based Evaluation of Automated Vehicles in a Mixed Traffic Environment // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2017. Vol. 82. P. 290–307.
15. Milakis D., van Arem B., van Wee B. Policy and Society Related Implications of Automated

Driving: A Review of Literature and Directions for Future Research // *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2017. Vol. 21, No. 4. P. 324–348.

16. Куверин И.Ю., Гусев С.А., Зернов А.А., Блинов Д.Г. Моделирование однополосного транспортного потока беспилотных автомобилей на основе теории следования за лидером // *Автоматика на транспорте*. 2024. Т. 10, №. 2. С. 166–177. DOI: <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2024-10-02-166-177>

17. Быков Н.В. Моделирование кластерного движения беспилотных транспортных средств в гетерогенном транспортном потоке // Компьютерные исследования и моделирование. 2022. Т. 14, №. 5. С. 1041–1058. DOI: <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2022-14-5-1041-1058>

REFERENCES

1. Podoprigora N.V. Methods of diagnostics of structural systems of highly automated vehicles. *World of Transport and Technological Machines/ 2023; 4-1 (83): 3–8. (In Russ.)* DOI: [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-4-1\(83\)-3-18](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-4-1(83)-3-18)
2. Groshev A.M., Tumasov A.V. Unmanned Vehicles: Present and Future. *Transport Systems*. 2016; 2: 68. (In Russ.)
3. Stern R.E. et al. Dissipation of stop-and-go waves via control of autonomous vehicles: Field experiments. *Transportation research part C: emerging technologies*. 2018; 89: 205–221.
4. Pynova O.A., Zaripova R.S. Autonomous Machines and Artificial Intelligence. *Information Technologies in Construction, Social, and Economic Systems*. 2020; 3: 46–49.
5. Golov E.V. The Speed Factor in the Road Traffic Safety System. *Bulletin of Civil Engineers*. 2021; 3(86): 139–148.
6. Solodky A.I. Designing Cost-Effective Urban Road Networks. *Bulletin. Zodchy. 21st Century*. 2013; 1(46): 078–081. (In Russ.)
7. Solodky A.I. Improving the level of traffic service on the road network of cities. *Transport Engineering and Technology*. 2019; S(13): 70. (In Russ.)
8. Schwarting W., Alonso-Mora J., Rus D. Planning and Decision-Making for Autonomous Vehicles. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*. 2018; vol. 1: 187–210.
9. Rios-Torres J., Malikopoulos A.A. A Survey on the Coordination of Connected and Automated Vehicles at Intersections and Merging at Highway On-Ramps. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2017; vol. 18, no. 5: 1066–1077.
10. Levin M.W., Boyles S.D. Effects of Autonomous Vehicle Ownership on Trip, Mode, and Route Choice, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2016; 2565: 1–9.
11. Talebpour A., Mahmassani H.S. Influence of Connected and Autonomous Vehicles on Traffic Flow Stability and Throughput. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2016; 71: 143–163.
12. Chen D., Ahn S., Chitturi M., Noyce D.A. Towards Vehicle Automation: Roadway Capacity Formu-

lation for Traffic Mixed with Regular and Automated Vehicles. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017; 100: 196–221.

13. Dresner K., Stone P.A Multiagent Approach to Autonomous Intersection Management. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2008; vol. 31: 591–656.

14. Zhou M., Jin S., Wang H. Simulation-Based Evaluation of Automated Vehicles in a Mixed Traffic Environment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2017; 82: 290–307.

15. Milakis D., van Arem B., van Wee B. Policy and Society Related Implications of Automated Driving: A Review of Literature and Directions for Future Research. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2017; 21, no. 4: 324–348.

16. Kuverin I.Yu., Gusev S.A. Zernov A.A., Blinov D.G. Simulation of single-lane traffic flow of self-driving cars based on the theory of following the leader. *Transport automation research*. 2024; Vol. 10, no. 2: 166–177. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2024-10-02-166-177>

17. Bykov N.V. A simulation model of connected automated vehicles platoon dynamics in a heterogeneous traffic flow. *Computer Research and Modeling*. 2022; Volume 14, Issue 5: 1041–1058. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2022-14-5-1041-1058>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Жданова А.М. Постановка целей и задач исследования, изучение кольцевых пересечений и перспектив развития БАТ, подготовка обзора литературы, анализ результатов исследования и формулирование выводов.

Старостенко А.В., Царев Д.А. Выявление параметров эффективности для пилотируемых ТС и БАТС, микро- мезомоделирование движения БАТС на кольцевых пересечениях в специализированном программном обеспечении, анализ результатов исследования и формулирование выводов.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Zhdanova A.M. Setting the goals and objectives of the study, studying roundabout intersections and the prospects for the development of HAV, preparing a literature review, analyzing the research results, formulating conclusions.

Starostenko A.V., Tsarev D.A. Identifying efficiency parameters for manned vehicles and HAV, micro (meso-) modeling of HAV traffic at roundabout intersections using specialized software, analyzing the research results, formulating conclusions.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жданова Анастасия Михайловна – аспирант кафедры «Транспортные системы и дорожно-мостовое строительство» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ) (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4); ведущий

инженер камеральных работ АО «СТАР-Проект» (196084, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Измайловское, б-р Измайловский, д. 11, стр. 1, помещ. 29Н, КАБ. 2).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2765-4643>,

SPIN-код: 4414-4239,

e-mail: anastasiiazhdanova22@gmail.com

Старостенко Андрей Владимирович – ведущий специалист по сопровождению объектов АО «ПО РосДорСтрой» (175400, просп. Васильева, 9, Валдай, Новгородская обл.), магистр Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, г. Москва, Ленинградский проспект, 64).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3889-6489>,

e-mail: starostenko2637@mail.ru

Царев Данил Александрович – аспирант кафедры «Транспортные системы и дорожно-мостовое строительство» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ) (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4); ведущий инженер камеральных работ АО «СТАР-Проект» (196084, г. Санкт-Петербург, вн.тер. г. муниципальный округ Измайловское, б-р Измайловский, д. 11, стр. 1, помещ. 29Н, КАБ. 2).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9793-2522>,

e-mail: mr.tsar2309@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anastasia M. Zhdanova – graduate student of the Department of Transport Systems and Road and Bridge Construction, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU) (2nd Krasnoarmeyskaya St., 4, St. Petersburg, 190005.); Lead Desk Engineer, STAR-Project JSC (external Municipal District Izmailovskoye, Blvd. Izmailovsky, 11, p. 29N, guided bombs. 2, St. Petersburg, 196084).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2765-4643>,

SPIN code: 4414-4239,

e-mail: anastasiiazhdanova22@gmail.com

Andrey V. Starostenko – leading specialist in the maintenance of facilities of JSC “PO RosDorStroy” (ave. Vasilyeva, 9, Valdai, Novgorod region, 175400) master of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI) (Leningradsky Prospekt, 64, Moscow, 125319).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3889-6489>,

e-mail: starostenko2637@mail.ru

Danil A. Tsarev – graduate student of the Department of Transport Systems and Road and Bridge Construction, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU) (2nd Krasnoarmeyskaya St., 4, St. Petersburg, 190005.); Lead Desk Engineer, STAR-Project JSC (external Municipal District Izmailovskoye, Blvd. Izmailovsky, 11, p. 29N, guided bombs. 2, St. Petersburg, 196084).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9793-2522>,

e-mail: mr.tsar2309@gmail.com

Научная статья
УДК 656.13:504
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-590-605>
EDN: NGOGNB



АНАЛИЗ РАЗВИТОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ ПО ОБСЛУЖИВАНИЮ НАСЕЛЕНИЯ ОМСКОЙ ОБЛАСТИ

С.М. Мочалин, О.В. Быкова, А.Ю. Шонин, И.А. Эйхлер ✉

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

✉ ответственный автор
vaniaeichler@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Проведение анализа и оценки развитости транспортных маршрутов по обслуживанию пассажиров на примере Омской области позволяет заказчику перевозок принять обоснованное организационно-управленческое решение по совершенствованию работы всех видов транспорта. Результаты анализа позволяют разработать мероприятия по обеспечению качества транспортного обслуживания и снижению совокупных издержек, связанных с обеспечением мобильности населения при соблюдении действующих законодательных норм.

Цель. Анализ и совершенствование организации пассажирских перевозок в Омской области.

Метод и методология проведения работы. Метод анализа, метод систематизации данных.

Результаты. При проведении исследования для уточнения статистических данных авторами было предложено использовать методики выборочного обследования пассажиропотока. Для определения точек обследования введен термин «узловой пункт маршрутной сети». Выявлены основные направления межмуниципальных пассажирских перевозок и ключевые виды транспорта. Полученные результаты анализа могут являться основой для разработки комплекса мероприятий по повышению качества транспортного обслуживания и снижению совокупных издержек, связанных с обеспечением мобильности населения Омской области при соблюдении действующих законодательных норм.

Область применения результатов. Полученными результатами могут руководствоваться ученые и специалисты, занимающиеся вопросами организации пассажирских перевозок, а также при построении мультимодальных маршрутов и взаимодействии различных видов пассажирского транспорта.

Выводы и обсуждения. Рекомендуется при совершенствовании маршрутной сети и организации пассажирских перевозок в междугородном и региональном сообщении.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: транспорт, транспортные магистрали, пассажиропоток, транспортное законодательство, узловой пункт маршрутной сети

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. С.М. Мочалин – член редакционного совета журнала «Вестник СибАДИ». Журнал «Вестник СибАДИ» не освобождает от рецензирования рукописи ученых вне зависимости от их статуса.

Статья поступила в редакцию 31.05.2025; одобрена после рецензирования 17.06.2025; принята к публикации 22.08.2025.

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: Мочалин С.М., Быкова О.В., Шонин А.Ю., Эйхлер И.А. Анализ развитости транспортных магистралей по обслуживанию населения Омской области // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, №. 4. С. 590-605. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-590-605>

© Мочалин С.М., Быкова О.В., Шонин А.Ю., Эйхлер И.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-590-605>
EDN: NGOGBB

ANALYSIS OF TRAFFIC ROUTES DEVELOPMENT IN TERMS OF TRANSPORTATION SERVICE OF THE OMSK REGION

Sergey M. Mochalin, Olga V. Bykova A.Y. Shonin, Ivan A. Eychler ✉
The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia
✉ corresponding author
vaniaeichler@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. Conducting analysis and assessment of the development of passenger transport routes in the Omsk region taken as an example allows the transportation customer to make an informed organizational and managerial decision for improving the operation of all types of transport. The results of the analysis make it possible to develop measures to ensure the quality of transport services and reduce the total costs associated with ensuring public mobility while complying with current legislation.

Purpose. The study is aimed at assessing and improving passenger transportation organization in the Omsk region.

Methodology. The methods of analysis and data systematization have been used.

Results. When conducting the study, the authors proposed using sampling methods for passenger traffic assessment to clarify statistical data. To define the survey points, the term "Nodal point of the route network" has been introduced. The main directions of inter-municipal passenger transportation and the key transport modes have been identified. The results obtained can serve as the basis for the development of measures to improve the quality of transport services and reduce the total costs associated with ensuring the mobility of the population in the Omsk region in compliance with current legislation.

Practical implications. The results obtained can be used by researchers and specialists involved in passenger transportation organization, as well as in designing multimodal routes and interaction between various types of passenger transport.

Discussion and conclusions. The findings are recommended for improving the route network and organizing passenger transportation within intercity and regional traffic.

KEYWORDS: transport, highways, passenger traffic, transport legislation, nodal point of the route network

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest. S.M. Mochalin 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.

The article was submitted: May 31, 2025; approved after reviewing: June 06, 2025; accepted for publication: August 22, 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: Mochalin S.M., Bykova O.V., Shonin A.Y., Eychler I.A. Analysis of traffic routes development in terms of transportation service of the Omsk region. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (4): 590-605. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-590-605>

© Mochalin S.M., Bykova O.V., Shonin A.Y., Eychler I.A., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых задач развития регионов является повышение качества транспортного обслуживания региона, что требует больших инвестиционных затрат. Облегчение финансового бремени возможно при участии в действующих национальных проектах Российской Федерации. Необходимо отметить, что в 2024 г. завершил свое действие проект «Безопасные и качественные дороги», являющийся одним из ключевых по обеспечению развития транспортной инфраструктуры. С 2025 г. начал реализовываться проект «Инфраструктура для жизни», в рамках которого действует федеральный проект «Развитие общественного транспорта». Отмечаем, что преобразование нацпроекта изменило и правила участия в получении финансирования. Так, для участия в субсидировании приобретаемых транспортных средств субъекту Российской Федерации необходимо разработать и утвердить «Программу развития (модернизации) общественного транспорта в субъектах Российской Федерации». Данная программа основывается на основных региональных и муниципальных документах стратегического планирования¹.

Вопросам разработки документов транспортного планирования в Российской Федерации посвящены работы И.В. Спирина, Н.Н. Якунина, Н.В. Якуниной и др. [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Анализ представленных работ позволил выделить одну из ключевых проблем, с которыми сталкиваются органы исполнительной власти субъектов Российской Федерации – фрагментарная информационная база транспортного планирования. Решение данной проблемы видится в построении эффективной системы мониторинга параметров транспортных систем субъектов Российской Федерации, их соответствие стандартам транспортного обслуживания представлены в работах сотрудников АО «НИИАТ» и других авторов [7, 8, 9, 10, 11].

Разработка документов транспортного планирования, таких как региональный комплексный план транспортного обслуживания, региональный стандарт транспортного обслуживания, комплексные схемы организации транспортного обслуживания и программы комплексного развития транспортной инфраструктуры, предъявляет высокие требования

к данным. Согласно требованиям действующего российского законодательства в данной области анализа научных работ [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21] необходимо использовать следующие группы:

- данные о состоянии и перспективах развития территории, содержащиеся в разработанных документах территориального планирования, включающие данные о строительстве и месте расположения объектов транспортной инфраструктуры, объектах притяжения пассажиропотока;

- данные о состоянии транспортного комплекса: протяженность и состояние транспортных магистралей, состав участников транспортного комплекса региона, обеспечивающих транспортную мобильность населения, структуру и состав транспортных средств, используемых для обслуживания населения;

- данные по пассажиропотоку, включающие данные о направлениях перемещений пассажиров, количестве перевезенных пассажиров в разрезе дней, месяцев, маршрутов и направлений, времени ожидания пересадки с одного вида транспорта на другой; удовлетворенности пассажиров существующей системой транспортного обслуживания, наполняемости подвижного состава, соблюдении расписания движения транспортных средств по маршрутам регулярных перевозок;

- данные о структуре управления транспортным комплексом региона.

Источниками получения данных являются отчеты органов исполнительной власти, отчеты действующих в регионе перевозчиков, официальные документы, утверждаемые федеральными, региональными органами исполнительной власти, а также органами местного самоуправления, результаты регулярных транспортных и транспортно-социологических обследований, проводимых на территории субъекта Российской Федерации.

Требования к данным и их структура утверждены Распоряжением Министерства транспорта Российской Федерации от 28 декабря 2016 года № НА-197-р «Об утверждении примерной программы регулярных транспортных и транспортно-социологических обследований функционирования транспортной инфраструктуры поселений, городских округов в Российской Федерации».

¹ Распоряжение Минтранса России от 22 апреля 2025 года № РС-84-р «Об утверждении Методических рекомендаций по разработке программ развития (модернизации) общественного транспорта в субъектах Российской Федерации».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оценка текущего состояния развитости системы транспортного обслуживания населения субъекта Российской Федерации и определения развитости основных транспортных магистралей должна проводиться на основе методик, разработанных в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации. Согласно Распоряжению Министерства транспорта Российской Федерации от 28 декабря 2016 года № НА-197-р определено, что получение данных о функционировании транспортных систем можно получить на основе опросного, натурного или отчетно-статистического обследования.

В качестве объекта исследования была выбрана Омская область. Предметом исследования – транспортная система Омской области, обслуживающая потребности пассажиров в перемещении. Основной целью проводимого исследования являлось определение развитости ключевых магистралей Омской области. Для целей настоящего исследования были использованы натурный и отчетно-статистический метод, позволяющие определить:

- основные виды транспорта, используемого населением Омской области;
- состояние транспортных магистралей, по которым происходит перемещение пассажиров;
- степень использования подвижного состава.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Транспортная система Омской области играет важную роль в транспортном комплексе Российской Федерации и обладает значительным кадровым, экономическим, промышленным, интеллектуальным и природным потенциалом для развития, являясь важным логистическим, промышленным и сельскохозяйственным центром Российской Федерации

в ее Сибирско-Дальневосточной части. Наличие сети железных и автомобильных дорог, внутренних водных путей, сети трубопроводов, системы воздушных сообщений, обеспечивающих международные и внутренние грузовые и пассажирские перевозки, делает транспортную систему Омской области стратегически важной для экономики и национальной безопасности страны² [22].

Омская область расположена на пересечении Транссибирской железнодорожной магистрали и Южно-Уральского хода, относимых к числу основных транзитных линий России. Приграничное положение и активное сотрудничество с Республикой Казахстан определяют ее стратегически важную роль в развитии межнациональных транспортных коммуникаций и распределении евроазиатских грузопотоков. Отмечается, что весь подвижной состав пассажирских предприятий города Омска и Омской области и часть транспортных средств перевозчиков немуниципальной формы собственности находится под контролем автоматизированной навигационной системы диспетчерского управления за движением пассажирского транспорта. При этом следует отметить недостаточное качество учета перевозок со стороны Министерства транспорта и дорожного хозяйства Омской области (имеются данные о количестве перевезенных пассажиров менее чем для 20% от общего количества межмуниципальных маршрутов).

По территории Омской области проходят автомагистрали: Р-254 «Иртыш» (бывшая М51) (часть европейского маршрута Е30 и азиатского маршрута АН6), М38 (часть европейского маршрута Е127 и азиатского маршрута АН60), Р402. По показателю плотности автомобильных дорог с твердым покрытием Омская область занимает 49 место в России, протяженность автомобильных дорог Омской области, структурированная по категориям в разрезе 2021–2023 гг., показана в таблице 1.

² Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р.

Таблица 1

Протяженность автомобильных дорог общего пользования Омской области (км)

Источник: протяженность автомобильных дорог общего пользования в Омской области // Омкстат.
URL: <https://55.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/dorogi-2023.htm> (дата обращения: 07.05.2025).

Table 1

Public road length in the Omsk region (km)

Source: URL: <https://55.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/dorogi-2023.htm> (accessed: 07.05.2025).

Показатель	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Общая протяженность – всего	24156,1	24206,6	24050,4
в том числе по значению:			
федерального	730,0	730,0	730,0
регионального или межмуниципального	10262,0	10234,9	10162,0
местного	13164,2	13241,7	13158,5
Из общей протяженности – с твердым покрытием	14109,3	14197,1	14079,2
в том числе по значению:			
федерального	730,0	730,0	730,0
регионального или межмуниципального	7414,5	7415,2	7373,7
местного	5964,9	6052,0	5975,5
Из протяженности дорог с твердым усовершенствованным покрытием	12519,2	12596,9	12479,7
в том числе по значению:			
федерального	730,0	730,0	730
регионального или межмуниципального	6136,3	6125,4	6092,8
местного	5652,9	5741,6	5656,9
Плотность автомобильных дорог общего пользования с твердым покрытием, на 1000 кв. км территории	100	101	100

Данные анализа объемов перевозок пассажиров по видам транспорта (автобусный, железнодорожный, воздушный) показывают положительную динамику данного показателя за период 2021–2023 гг.³ Объем перевозок пассажиров – число пассажиров, перевезенных за определенный период времени, который учитывается по видам транспорта (речной, пригородный железнодорожный, автомобильный), видам сообщений и другим признакам. Единицей наблюдения в статистике перевозок пассажиров является пассажиро-поездка. Момент учета отправленных пассажиров

определяется на отдельных видах транспорта неодинаково: или по моменту приобретения билета (на железнодорожном, автомобильном, городском электрическом транспорте), или по моменту отправления транспортного средства (на водном и воздушном транспорте). Момент прибытия в статистике перевозок пассажиров на практике, за исключением воздушного транспорта, не используется. Данные по перевозке пассажиров приводятся с учетом пассажиров, пользующихся мерами социальной поддержки населению.⁴

³ Доклад о реализации Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года. Отчетный период: 2023 год. // Министерство транспорта Российской Федерации. – URL: <https://mintrans.gov.ru/ministry/targets/187/191/documents>. (дата обращения: 10.10.2024).

⁴ Методологические положения по статистике транспорта (утв. приказом Федеральной службы государственной статистики от 29 декабря 2017 г. № 887).

Пассажирооборот транспорта определяется суммированием произведений количества пассажиров по каждой позиции перевозки на расстояние перевозки; вычисляется отдельно по видам транспорта, сообщения и другим признакам.

Статистическая информация об объеме перевозок, пассажирообороте транспорта включает данные как по организациям, для которых эта деятельность является основной

(по предприятиям транспорта), так и по организациям других видов деятельности.

В Омской области пригородные пассажирские перевозки железнодорожным транспортом осуществляются по 13 маршрутам. Реестр маршрутов пригородных пассажирских перевозок железнодорожным транспортом представлен в таблице 2.

За рассматриваемый период объем перевозок имеет положительную динамику (таблица 3).

Таблица 2

Реестр маршрутов пригородных пассажирских перевозок железнодорожным транспортом

Источник: приказ Министерства транспорта и дорожного хозяйства Омской области от 1 августа 2024 г. № 44-п «Об утверждении маршрутной сети железнодорожного и водного транспорта на территории Омской области на 2025 год».

Table 2

Suburban passenger transportation railway routes

Source: Order of the Ministry of Transport and Road Facilities of the Omsk Region dated August 1, 2024 No. 44-p "On approval of the route network of rail and water transport in the Omsk Region for 2025".

Порядковый номер маршрута (наименование)	Протяженность маршрута, км
1. «Омск – Исилькуль»	138
2. «Омск – Москаленки»	95
3. «Омск – Называевская»	149
4. «Московка – Называевская»	161
5. «Московка – Любинская»	65
6. «Омск – Калачинская»	79
7. «Омск – Колония»	121
8. «Омск – Иртышское»	170
9. «Московка – Лузино»	32
10. «Московка – Входная (о.п. 2883 км)»	23
11. «Омск – Входная (о.п. 2883 км)»	15
12. «Называевская - о.п. Стрункино»	56
13. «Исилькуль - п.п. 2742 км»	18
14. «Омск – Сыропятское»	33

Таблица 3

Объем перевозок пассажиров на пригородных пассажирских маршрутах железнодорожного транспорта

Источник: отчеты Министерства транспорта и дорожного хозяйства Омской области за 2021–2023 гг.

Table 3

Passenger transportation volume for suburban passenger railway routes

Source: reports of the Ministry of Transport and Road Facilities of the Omsk Region for 2021–2023

Показатель	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Объем перевозок пассажиров, пасс.	2 406 620	2 570 591	2 615 740

Таблица 4
Эксплуатационные показатели деятельности
авиаперевозок за рассматриваемый период
в аэропорту Омской области

Источник: годовой отчет открытого акционерного общества «Омский аэропорт» за 2023 г.

Table 4
Operational indicators of air transportation activities
at the airport of the Omsk region
for the period under review

Source: annual report of Omsk Airport Open Joint Stock Company for 2023.

Показатель	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Количество обслуженных пассажиров, тыс. чел., в том числе:	970,0	1 586,0	1 680,2
- внутренние воздушные линии	940,0	1 477,6	1 559,3
- междугородные воздушные линии	30,0	108,4	120,8

Таблица 5
Реестр маршрутов перевозок внутренним водным транспортом

Источник: приказ Министерства транспорта и дорожного хозяйства Омской области от 1 августа 2024 г. № 44-п
«Об утверждении маршрутной сети железнодорожного и водного транспорта
на территории Омской области на 2025 год».

Table 5
Inland waterway transport routes

Source: Order of the Ministry of Transport and Road Facilities of the Omsk Region dated August 1, 2024 No. 44-p
“On approval of the route network of rail and water transport in the Omsk Region for 2025”.

Порядковый номер маршрута	Наименование конечных и промежуточных остановочных пунктов по маршруту	Протяженность маршрута, км	Расписание отправок и прибытий
1	Большая Тебендя, Паново, Борки, Скородум, Новая деревня, Никольск, Усть-Ишим, Красноярка, Утускун, Эбаргуль, Аксеново, Ярково, Ильчебага, Ураш, Кайсы	105	Период с 1 мая по 31 октября. Ежедневно
2	Центр, Ленинск, Шинник, Радуга, Зеленый берег	32	Период с 3 мая по 15 октября. Дни обслуживания: среда, пятница, суббота, воскресенье (с 03.05 по 30.08), среда, суббота, воскресенье (с 02.09 по 30.09), суббота, воскресенье (с 01.10 по 15.10)
3	Омск, Красноярка, Новопокровка, Старомалиновка, Большеречье	231,5	Период с 2 мая по 27 сентября. Дни: вторник, суббота (отправление из Омска в 7-50), среда, воскресенье (отправление из Большеречья в 8-00)

Воздушный транспорт относится к узкоспециализированным видам транспорта – он предназначен для пассажирских перевозок на дальние и средние расстояния, хотя имеет значение и при транспортировке ценных, скоропортящихся и срочных грузов. В общем объеме перевозок перевозка пассажиров составляет 80%, остальное – грузы и почта.

Эксплуатационные показатели деятельности на авиатранспорте (таблица 4) свидетель-

ствуют об увеличении количества обслуженных пассажиров в целом.

Как представлено в таблице 4, на протяжении всего периода наблюдается рост пассажиропотока. Снижение пассажиропотока в 2021 г. объясняется пандемией новой коронавирусной инфекции. Также на воздушном транспорте осуществляются перевозки самых дорогостоящих грузов и товаров, требующих высокоскоростной доставки (электронная техника, запасные части, почта, лекарства и т.д.).

Таблица 6

Объем перевозок пассажиров внутренним водным транспортом, чел.

Источник: отчеты Министерства транспорта и дорожного хозяйства Омской области за 2021–2023 гг.

Table 6

Passenger transportation volume for inland waterway (people)

Source: reports of the Ministry of Transport and Road Facilities of the Omsk Region for 2021–2023

Маршрут	2021 г.	2022 г.	2023 г.
1	8 901	7 318	7 998
2	-	7 586	10 675
3	-	1 334	1 523

Протяженность эксплуатации внутренних водных судоходных путей в Омской области составляет 1 667 км. Грузовой и пассажирский водный транспорт имеет основной порт в г. Омске и осуществляет перевозки грузов до Северного Ледовитого океана на севере, включая малые реки среднего и нижнего Приобья и Заполярья. В 1990-х годах объем перевозок грузов внутренним водным транспортом стабильно сокращался в основном за счет снижения перевозок строительных материалов, на долю которых приходится более 60% общего объема перевозок. Связано это в первую очередь со структурными изменениями в этой отрасли, что проявлялось в росте перевозок наливных грузов. В разрезе внутренних водных пассажирских перевозок данные по маршрутам представлены в таблице 5.

На сегодняшний момент мы можем констатировать, что река Иртыш в Омской области незаслуженно с конца 90-х годов была оставлена без внимания. Однако сегодня интерес к развитию внутреннего транспорта в Омской области постепенно возрождается в силу его экономических преимуществ. Одной из возможностей восстановления роли водного транспорта является проект «Речные магистрали», сформированный Правительством РФ. В этот проект будут вовлекаться все субъекты Российской Федерации и будет оказываться помощь в повышении привлекательности инвестиционных проектов, направленных на развитие водных путей.

Современное состояние пассажирских перевозок внутренним водным транспортом по объему перевезенных пассажиров представлено в таблице 6.

Как представлено в таблице 6, в 2023 г. объем перевозок увеличился по сравнению

с 2022 г., что свидетельствует об увеличении спроса со стороны населения на данный вид перевозок. Однако роль водного транспорта остается незначительной.

В Омской области по состоянию на 30.10.2023 г. деятельность по пассажирским перевозкам автомобильным транспортом осуществляют 85 перевозчиков различных организационно-правовых форм. В разрезе обслуживаемых маршрутов – 38 перевозчиков обслуживают межмуниципальные маршруты Омской области, 27 – работают на муниципальных маршрутах районов Омской области и 45 – выполняют перевозки по муниципальным маршрутам в г. Омске. Маршрутная сеть Омской области на 30.10.2023 г. насчитывает 915 маршрутов, в том числе муниципальных маршрутов районов Омской области – 491, муниципальных маршрутов г. Омска – 150, межмуниципальных маршрутов – 258. Рассматривая организацию перевозок в межмуниципальном сообщении, было определено, что 146 маршрутов осуществляют регулярные перевозки по нерегулируемым тарифам, 112 – регулярные перевозки по регулируемым тарифам.

В соответствии с методологическими требованиями «Положения по статистике транспорта» (утверждены приказом Росстата от 29 декабря 2017 г. № 887) в таблице 7 представлены результаты деятельности предприятий пассажирского автомобильного транспорта Омской области.

Данные о количестве перевезенных пассажиров и пассажирообороте на маршрутах регулярных перевозок и заказных маршрутах во всех видах сообщения, приведенные в таблице 7, включают в себя информацию о льготных категориях пассажиров.

Таблица 7

Показатели деятельности пассажирского автотранспорта Омской области

Источник: деятельность автомобильного транспорта Омской области // ОмскСтат.

URL: <https://55.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/avtotransport-2023.htm> (дата обращения: 07.05.2025).

Table 7

Performance indicators of passenger vehicles in the Omsk regionSource: URL: <https://55.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/avtotransport-2023.htm> (accessed: 07.05.2025).

Показатель	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Перевезено пассажиров автобусами по маршрутам регулярных перевозок, тыс. чел.	146641,1	149176,8	148712,1
Пассажирооборот автобусов по маршрутам регулярных перевозок, тыс. пасс-км	1672613,9	1651842,1	1439814,8

Таблица 8

Определение процента использования подвижного состава на межмуниципальных маршрутах

Источник: составлено авторами.

Table 8

Percentage of rolling stock usage on inter-municipal routes

Source: compiled by the authors.

Вид сообщения	Среднее количество пассажиров на одно отправление, чел.	Требования реестра к вместимости подвижного состава, чел.	% использования пассажировместимости
Пригородное сообщение	17	34	48,8
Междугороднее сообщение	14	21	65

Официальные данные, приведенные в таблице 7, слабо коррелируют с оценками Департамента транспорта г. Омска по количеству перевезенных пассажиров в г. Омске (например, за 2023 г. порядка 200 млн пассажиров) и данными Минтранса Омской области (например, только на 71 маршруте перевезено в 2023 г. более 2 млн пассажиров). Одной из основных причин расхождения оценок в объеме перевезенных пассажиров связано с тем, что данные представляются только по маршрутам, действующим на регулируемых тарифах (согласно требованиям муниципальных контрактов).

Для целей исследования полученные статистические данные были уточнены путем проведения выборочного натурного исследования количества перевезенных пассажиров

на межмуниципальных маршрутах регулярных перевозок автомобильным транспортом. Проведенные исследования включали:

1. Обследование узловых пунктов маршрутной сети Омской области (междугороднее сообщение).

2. Обследование пригородных маршрутов Омской области, состоящее из двух этапов:

а. выборочное обследование конечных остановок межмуниципальных маршрутов (пригородного сообщения) на территории г. Омска;

б. выборочное обследование пригородных маршрутов, включающее обследование пассажирообмена на рейсах маршрутов в утренние и вечерние часы пик из салона транспортного средства.

При определении узловых пунктов маршрутной сети Омской области авторами предложено руководствоваться следующим определением: узловой пункт маршрутной сети Омской области – объект транспортной инфраструктуры (автовокзалы/автостанции), который генерирует основной пассажиропоток маршрутной сети Омской области. К узловым пунктам были отнесены объекты транспортной инфраструктуры с наибольшим количеством отправляемых и прибывающих межмуниципальных маршрутов Омской области.

Согласно действующему реестру такими пунктами являются: автовокзал г. Омска, железнодорожный вокзал г. Омска и территория около ДК Лобкова, автовокзал г. Тара, автовокзал г. Называевска, автовокзал г. Исилюк, автостанция р.п. Большеречье и автостанция р.п. Русская Поляна. Конечные остановочные пункты, расположенные на территории г. Омска, исследовались в полном объеме.

Обследование пассажирообмена на рейсах маршрутов в утренние и вечерние часы пик в салоне транспортного средства проводилось с целью определения отношения количества перевезенных пассажиров к вошедшим на начальном пункте. Соотношение перевезенных пассажиров к вошедшим на начальном пункте для отдельных направлений маршрута является значимой характеристикой, так как на ряде направлений наполнение и выход пассажиров происходит постепенно и по значениям, полученным только на конечных остановочных пунктах, нельзя провести оценку количества перевезенных пассажиров на маршруте. Вычисление данного коэффициента было произведено по формуле

$$O_n = K_n^{\text{общ}} / K_n^{\text{н}},$$

где O_n – отношение количества перевезенных пассажиров к вошедшим на начальном пункте; $K_n^{\text{общ}}$ – общее количество перевезенных пассажиров за рейс; $K_n^{\text{н}}$ – количество вошедших пассажиров на начальном остановочном пункте.

Итоговые значения обследования количества перевезенных пассажиров на межмуниципальных маршрутах регулярных перевозок Омской области представлены в таблице 8.

Полученные данные позволяют сделать вывод об общем количестве перевезенных пассажиров за месяц межмуниципальными маршрутами пассажирских перевозок по муниципальным районам Омской области (таблица 9).

Полученные данные позволяют говорить о том, что среднее количество пассажиров, перевезенных межмуниципальными маршрутами Омской области за год, составляет от 8 до 12 млн чел.

Анализируя полученные данные в разрезе маршрутов, была составлена карта основных направлений перевозок пассажиров по маршрутной сети Омской области, представленная на рисунке 1.

Согласно представленному рисунку отмечаем, что основными направлениями перевозки пассажиров являются:

Северное направление (маршруты, выходящие из города через «Северо-Западный» вход – месячный объем перевозок составляет 40,6 тыс. пассажиров (28%);

Южное направление (маршруты, проходящие через «Южный» вход – 70 тыс. пассажиров (48% от суммарного количества), при этом по данному направлению перевозки можно разделить на юго-западное (в направлении Азово) – 38,5 тыс. и юго-восточное (в направлении Таврического) – 31,5 тыс. пассажиров).

Другие направления суммарно составляют 23,6%.

Также отметим, что большая часть пассажиропотока (более 600 тыс. чел. ежемесячно) не покидают пределы Омского района.

Уточненные данные по межмуниципальным маршрутам регулярных перевозок по территории Омской области с использованием в качестве вида транспортных средств автобусов позволил определить структуру пассажирских перевозок, представленную на рисунке 2.

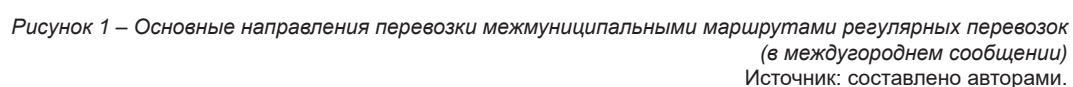
Таблица 9

Определение оценочного количества перевезенных пассажиров по муниципальным районам Омской области
Источник: составлено авторами.

Table 9

The estimated number of passengers transported in the municipal districts of the Omsk region
Source: compiled by the authors.

Муниципальный район Омской области	Оценочный показатель количества перевезенных пассажиров, тыс. чел.
Азовский муниципальный район	25,5
Большереченский муниципальный район	1,8
Большеуковский муниципальный район	0,9
Горьковский муниципальный район	4,6
Знаменский муниципальный район	1,1
Исилькульский муниципальный район	2,5
Калачинский муниципальный район	6,6
Колосовский муниципальный район	1,6
Кормиловский муниципальный район	5,2
Крутинский муниципальный район	1,0
Любинский муниципальный район	19,4
Марьяновский муниципальный район	1,8
Москаленский муниципальный район	2,3
Муромцевский муниципальный район	2,3
Называевский муниципальный район	0,5
Нижнеомский муниципальный район	0,6
Нововаршавский муниципальный район	2,4
Одесский муниципальный район	2,2
Оконешниковский муниципальный район	1,2
Павлоградский муниципальный район	3,7
Полтавский муниципальный район	8,5
Русско-Полянский муниципальный район	3,7
Саргатский муниципальный район	4,6
Седельниковский муниципальный район	0,7
Таврический муниципальный район	21,7
Тарский муниципальный район	5,3
Тевризский муниципальный район	0,8
Тюкалинский муниципальный район	3,6
Усть-Ишимский муниципальный район	0,5
Черлакский муниципальный район	5,8
Шербакульский муниципальный район	2,6
Омский муниципальный район	662,3
ИТОГО	807,3



601



Рисунок 2 – Структура межмуниципальных перевозок пассажиров по видам транспорта
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – The structure of inter-municipal passenger transportation by transport type
Source: compiled by the authors.

Согласно представленному рисунку основным видом транспорта, обеспечивающим мобильность населения Омской области, является автомобильный транспорт общего пользования (78,6%), также отмечаем достаточную долю железнодорожных перевозок (21,2%). Перевозки по реке Иртыш в общем объеме межмуниципальных перевозок составляют около 0,2%.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведя анализ сложившейся системы межмуниципальных перевозок по Омской области, можно отметить следующие характерные черты:

1. В структуре общего объема перевезенных пассажиров преобладает автомобильный транспорт общего пользования, что обусловлено такими преимуществами данного вида транспорта, как сравнительно небольшие затраты в создании инфраструктуры, мобильность. В целом такой вид транспорта является опорным для региона. Перспективы развития данного вида транспорта и его инфраструктуры в первую очередь связаны с участием в действующих национальных проектах («Инфраструктура для жизни»), позволяющих обеспечить надлежащее состояние магистралей.

2. Возможности развития железнодорожного транспорта в области межмуниципальных перевозок ограничены в силу его привязки к Транссибирской железнодорожной магистрали. Данный вид транспорта выполняет достаточный объем работ в восточном (в сторону г. Калачинска) и западном (в сторону г. Искитима и г. Называевска) направлениях. Также выполняются перевозки и по южной ветке (в сторону р.п. Таврическое). Строительство и эксплуатация новых железнодорожных веток по новым направлениям экономически нецелесообразно в силу небольшого пассажиропотока.

3. Достаточно слабо развиты перевозки речным транспортом, хотя в периоды навигации они могли бы обеспечить мобильность в южном и северном направлениях. Данный вопрос нуждается в дополнительной проработке.

4. Из-за высоких тарифов недостаточное развитие получили авиaperевозки по местным воздушным линиям, хотя потенциальная востребованность в таких видах сообщений имеется, особенно в северном направлении в период весенней распутицы.

5. Анализ транзитного пассажиропотока показал, что он незначительный, следовательно, коэффициент пересадочности с одного вида транспорта на другой остается низким.

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., Замбрицкая А.А. Особенности формирования регионального стандарта транспортного обслуживания населения // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2024. № 2. С. 83–85.
4. Соболев С.А. Формирование инструментария стратегического планирования для управления развитием российских агломераций // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2023. № 2. С. 75–87. DOI: <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-2-75>
5. Скворцова Г.Г. Стандарт транспортного обслуживания как основа повышения качества пассажирских перевозок транспортом общего пользова-

ния // *Russian Journal of Management*. 2023. Т. 11, № 4. С. 58–68.

6. 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. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-748-761>

7. Капелюк З.А., Попова Я.В. Показатели качества транспортных услуг для оценки качества обслуживания населения // *Научные исследования и разработки. Экономика*. 2023. Т. 11, № 1. С. 54–60.

8. Михеева Т.В., Бадритдинов Б.Р., Асадуллин Т.Р. Единая статистическая база как инструмент мониторинга соблюдения стандартов транспортного обслуживания населения ПТОП // *Научный вестник автомобильного транспорта*. 2023. № 2. С. 31–40.

9. Ушаков Р.И. Оценка уровня развития социальной инфраструктуры сельских территорий на примере Московской области // *Региональные проблемы преобразования экономики*. 2024. № 5 (163). С. 42–53. DOI: <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2024-5-42-53>

10. Трофимова Л.С., Гаврилин Д.В., Кабжамитова А.С. Организация регулярных перевозок пассажиров с учетом обращений граждан и диспетчерского контроля // *Вестник СибАДИ*. 2024; 21(4): 580–593. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-580-593>. EDN: FVTFZG

11. 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: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-882-899>

12. 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

13. Jingxu Chen, Zhiyuan Liu, Senlai Zhu, Wei Wang. Design of limited-stop bus service with capacity constraint and stochastic travel time // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2015; Volume 83: 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.08.007>

14. Курохтина А.О., Фирсова В.П., Польшгалова О.В., Прокофьева О.С. Исследование регулярных перевозок пассажиров на примере города Иркутска // *Молодежный вестник ИрГТУ*. 2024. Т. 14, № 1. С. 45–50.

15. Чебоксчинова Н.М., Капсаргина С.А. Организация транспортного обслуживания населения в Таштыпском районе // *Аграрное и земельное право*. 2024. № 3 (231). С. 52–55. https://doi.org/10.47643/1815-1329_2024_3_52.

16. Ланцева В.Ю., Восканян А.А. Критерии качества и доступности транспортных услуг, оказываемых населению // *Вестник государственного мор-*

ского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова. 2023. № 2 (43). С. 118–120.

17. Кривко Е.В. Основные положения методики учета общественных затрат времени пассажиров в проектах дорожно-транспортной сферы // *Вестник евразийской науки*. 2023. Т. 15, № 2. URL: <https://esj.today/PDF/38ECVN223.pdf>

18. Yakimov M.R. Features of the use of geospatial data in the development of transport planning documents // *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications*. 2022. Т. 5. № 1. pp. 400–404.

19. Числов О.Н., Мизгирева Е.Е., Луганченко Н.М. Генетический компоновочный алгоритм размещения объектов транспортного узла: постановка задачи, формирование и использование массивов данных, методика решения // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2025. Т. 22. Вып. 1. С. 32–46. DOI: <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2025-1-32-4>

20. Патракова С.С. Влияние автотранспортной связности на экономический рост регионов: эконометрическое моделирование // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*, 2025. Т. 18, № 1. С. 89–105. DOI: <https://doi.org/10.15838/esc.2025.1.97.5>

21. Ахромешин А.В., Пышный В.А., Севостьянов А.Л. Оценка эффективности внедрения мероприятий документов транспортного планирования с помощью математического моделирования // *Грузовик*. 2025. № 1. С. 43–47. DOI: <https://doi.org/10.36652/1684-1298-2025-1-43-47>

22. Колунова А.В. Проблемы развития городских транспортных систем // *Новые технологии*. 2019. № 7. С. 82–99.

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. Sobolev S.A. Forming a strategic planning toolkit to manage the development of Russian agglomerations. *Intellekt. Innovacii. Investicii [Intellect. Innovations. Investments]*. 2023; Vol. 2: 75–87. DOI: <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-2-75>.

5. 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).

6. Yakunin N.N., Yakunina N.V., Lyubimov I.I. Regional passenger motor transport systems: problem statement, first estimation results. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(6): 748–761. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-748-761>
7. Kapelyuk Z.A., Popova Ya.V. Quality Indicators of Transport Services to Assess the Quality of Public Services. *SCIENTIFIC RESEARCH AND DEVELOPMENT. ECONOMICS*. 2023; 11(1): 54–60. (In Russ.)
8. Mikheyeva T.V., Badritdinov B.R., Asadulin T.R. Database of statistics as a tool for monitoring transport service standards. *The bulletin of road transport research*. 2023; 2: 31–40. (In Russ.)
9. Ushakov R. I. Assessment of the level of development of the social infrastructure of rural areas on the example of the Moscow region. *Regional'ny'e problemy preobrazovaniya i ekonomiki*. 2024; 5 (163): 42–53. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2024-5-42-53>.
10. Trofimova L.S., Gavrilin D.V., Kabzhamitova A.S. Organization of regular passenger transportation taken into account of citizens' appeals and dispatch control. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(4): 580–593. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-580-593>. EDN: FVTFZG
11. Zhigadlo A.P., Shonin A.Y., 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. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-882-899>
12. Fadeyev A. I., Ilyankov A. M. Transport supply management on regular intercity bus lines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (5): 632–648. (In Russ) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-632-648>. EDN: WMBMDI
13. Jingxu Chen, Zhiyuan Liu, Senlai Zhu, Wei Wang. Design of limited-stop bus service with capacity constraint and stochastic travel time. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2015; Volume 83: 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tr.2015.08.007>
14. Kurokhtina A.O., Firsova V.P., Polygalova O.V., Prokofieva O.S. Research of regular passenger transportation in the case of Irkutsk. *Molodezhnyj vestnik IrGTU*. 2024; 14(1): 45–50. (In Russ)
15. 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: https://doi.org/10.47643/1815-1329_2024_3_52
16. 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.)
17. Krivko E.V. Analysis of domestic methods of accounting for the impact of passenger time spent on assessing the social effectiveness of investments in road transport projects. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(2). URL: <https://esj.today/PDF/38ECVN223.pdf>
18. Yakimov M.R. Features of the use of geospatial data in the development of transport planning documents. *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications*. 2022; 5 (1): 400–404.
19. Chislov O. N., Mizgireva E. E., Luganchenko N. M. Genetic Layout Algorithm for Placing Transport Hub Objects (GLA TH): Problem Statement, Formation and Use of Data Sets, Solution Methods. *Proceedings of Petersburg State Transport University*. 2025; vol. 22, iss. 1: 32–46. (In Russ) DOI: <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2025-1-32-46>.
20. Patrakova S.S. The impact of road transport connectivity on economic growth of regions: Econometric modeling. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*. 2025; 18(1): 89–105. (In Russ) DOI: <https://doi.org/10.15838/esc.2025.1.97.5>
21. Akhromeshin A.V., Pyshnyi V.A., Sevostyanov A.L. Assessment of the effectiveness of the implementation of measures of transport planning documents using mathematical modeling. *Truck*. 2025. 1. 43–47. (In Russ) DOI: <https://doi.org/10.36652/1684-1298-2025-1-43-47>
22. Koltunova A.V. Problems of urban transport systems development. *New technologies*. 2019; 7: 82–99.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Мочалин С.М. Концептуализация, подготовка первоначального проекта.

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

Быкова О.В. Валидация, исследования.

Шонин А.Ю. Исследования, ресурсы.

CONTRIBUTION OF CO-AUTHORS

S.M. Mochalin. Conceptualization, designing the initial project.

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

O.V. Bykova. Validation, research.

A.Yu. Shonin. Research, resources.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АТОРАХ

Мочалин Сергей Михайлович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Экономика, логистика и управление качеством» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644080, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3651-0961>,

SPIN-код: 2302-7696,

Scopus Author ID: 6507433262,

e-mail: mochalin_sm@mail.ru

Быкова Ольга Валерьевна – ст. преподаватель 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/0009-0009-8479-041X>,

e-mail: bykova_ov@mail.ru

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

Sergey M. Mochalin – Dr. of Sci. (Eng.), Professor of the Department of Economics, Logistics and Quality Management the Siberian State Automobile and Highway University (5, Prospect Mira, Omsk, 644080).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3651-0961>,

SPIN-code: 2302-7696,

Scopus Author ID: 6507433262,

e-mail: mochalin_sm@mail.ru

Olga V. Bykova – Senior Lecturer at the Department of Economics, Logistics and Quality Management, Institute of Information Systems, Economics and Management, the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644080).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8479-041X>,

e-mail: bykova_ov@mail.ru

Anatoly Yu. Shonin – Cand. economy sciences, Associate Professor, Head of Research Department, the 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

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

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

SPIN-code: 7562-4729,

Scopus Author ID: 57728886700,

e-mail: vaniaeichler@gmail.com

Научная статья
УДК 629.331
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-606-617>
EDN: ERRFAQ



РЕКУПЕРАЦИЯ ТОРМОЗНОЙ ЭНЕРГИИ, ЕЁ ВИДЫ И ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ АВТОМОБИЛЯХ

Е.А. Павленко ✉, Н.А. Жданов, В.Л. Крячек-Ахиев
Пятигорский институт (филиал) СКФУ,
г. Пятигорск, Россия
✉ ответственный автор
evgeneip@bk.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Важнейшей частью автомобиля является тормозная система. От исправной работы тормозной системы зависит безопасность дорожного движения и самое главное – жизнь людей. Разработка системы рекуперации тормозной энергии позволяет снизить износ тормозных накладок и тем самым улучшить экологичность транспортного средства.

Материалы и методы. В данной работе рассмотрены существующие виды рекуперативного торможения. Система KERS (Kinetic Energy Recovery System) и её виды, рекуперация тормозной энергии с помощью кинетического маховика и рекуперация с помощью мотор-генератора. Также рассмотрена не менее перспективная гидравлическая рекуперация или система Hybrid Air, проведены расчёты рекуперативной мощности кинетического маховика применительно к отечественным автомобилям.

Результаты. Предполагается, что для внедрения системы рекуперации в отечественные автомобили выгоднее использовать механическую рекуперацию, так как она дешевле других видов, проще в установке и производстве. Если рекуперировать тормозную энергию с помощью кинетического маховика, то на колёса автомобиля можно будет вернуть около 7 лошадиных сил. Оставшаяся энергия тратится на раскручивание маховика и потери в механизмах системы, связанные с передачей от маховика к колёсам. Энергия, которая раньше тратилась на нагрев тормозных дисков и тормозных колодок, теперь тратится на раскручивание маховика, тем самым снижая температуру механизмов тормозной системы.

Обсуждение и заключение. В ходе проведённого анализа конструкторских и технологических решений, а также выполненных расчётов, можно сделать вывод, что использование на исследуемом автомобиле ЛАДА КАЛИНА-2 кинетической рекуперативной системы позволит в городском цикле эксплуатации автомобиля получить дополнительно 7 лошадиных сил на протяжении 6 сек работы системы рекуперации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тормозная система, рекуперативное торможение, кинетический маховик, тормозная энергия, электрическая рекуперация, гидравлическая рекуперация

Статья поступила в редакцию 01.04.2025; одобрена после рецензирования 25.06.2025; принята к публикации 22.08.2025.

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: Павленко Е.А., Жданов Н.А., Крячек-Ахиев В.Л. Рекуперация тормозной энергии, её виды и возможность применения на отечественных автомобилях // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 4. С. 606-617. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-606-617>

© Павленко Е.А., Жданов Н.А., Крячек-Ахиев В.Л., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-606-617>
EDN: ERRFAQ

BRAKE ENERGY RECOVERY, ITS TYPES AND THE POSSIBILITY OF APPLICATION ON DOMESTIC CARS

Evgeny A.I. Pavlenko ✉, **Nikolay A. Zhdanov, Valentin L. Kryachek-Akhiev**
Pyatigorsk Institute (branch) of NCFU in Pyatigorsk,
Pyatigorsk, Russia
✉ corresponding author
evgeneip@bk.ru

ABSTRACT

Introduction. The most important part of a car is the brake system. Road traffic safety and, most importantly, people's lives depend on the proper operation of the brake system. The development of brake energy recovery system allows increasing the service life of the brake system and increasing its resistance to overheating.

Materials and methods. This paper examines regenerative braking types. The KERS (Kinetic Energy Recovery System) system and its types, recuperation of braking energy via a kinetic flywheel and a motor generator have been considered. The paper examines hydraulic recuperation or Hybrid Air system, and calculates the regenerative power of a kinetic flywheel as applied to domestic cars.

Results. It is assumed that for the implementation of the recovery system in domestic cars, it is more profitable to use mechanical recovery, since it is cheaper than other types, easier to install and manufacture. Recovering braking energy via a kinetic flywheel leads to about 7 horsepower delivered to the car wheels. The remaining energy is spent on spinning the flywheel and losses in the system mechanisms associated with transmission from the flywheel to the wheels. The energy that was previously spent on heating the brake discs and brake pads is now spent on spinning the flywheel, thereby reducing the temperature of the braking system mechanisms.

Discussion and conclusions. In the course of the analysis of design and technological solutions, as well as the calculations performed, it can be concluded that the use of a kinetic recuperative system on the LADA KALINA-2 vehicle under study will allow an additional 7 horsepower to be obtained in the city cycle of vehicle operation during 6 seconds of operation of the recuperative system.

KEYWORDS: brake system, regenerative braking, kinetic flywheel, braking energy, electrical recuperation, hydraulic recuperation

The article was submitted: 01.04.2025; approved after reviewing: 25.06.2025; accepted for publication: August 22, 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. Pavlenko E.A.I., Zhdanov N.A., Kryachek-Akhiev V.L. Brake energy recovery, its types and the possibility of application on domestic cars. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (4): 606-617. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-606-617>

© Pavlenko E.A.I., Zhdanov N.A., Kryachek-Akhiev V.L., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Тормозная система является очень важной частью любого автомобиля. Европейский экологический стандарт «Евро-7» планируется ввести в 2026 г., он заменит предыдущую версию стандарта «Евро-6». Новая версия нормативов направлена на значительное сокращение загрязнений окружающей среды от автомобильного транспорта, особенно в городах Европы, где наблюдается высокая концентрация транспортных средств. Экологические нормы в первую очередь направлены на сокращение выбросов CO₂. Стандарт определяет ограничение выбросов для легковых автомобилей примерно на уровне 80 г/км, что делает обязательным переход автопроизводителей на электромобили и гибридные транспортные средства. Особое внимание также уделяется контролю твёрдых частиц размером менее 2,5 мкм (PM_{2,5}). Такие мелкие частицы способны проникать глубоко в дыхательные пути и вызывать серьёзные заболевания лёгких и сердечно-сосудистой системы. Экологический стандарт также вносит запрет на использование определённых химических элементов и металлов, применяемых ранее в различных компонентах авто (таких как медь, кадмий, свинец, никель и т.п.), призван сократить риск попадания этих веществ в атмосферу и почву. Автопроизводители обязаны применять экологически чистые материалы и соблюдать новый регламент относительно запрещённых веществ, внедрять технологии, позволяющие существенно снизить выбросы твёрдых частиц и микроскопической пыли. В отличие от предыдущих версий экологических стандартов, «Евро-7» охватывает весь жизненный цикл транспортного средства, начиная от процесса изготовления и заканчивая утилизацией отходов и деталей. Ожидается внедрение современных методов переработки и вторичного использования запчастей, снижающих общий углеродный след автомобилестроительной отрасли. Эти требования распространяются

также на тормозные системы автомобилей, поскольку износ тормозных колодок является источником загрязнения воздуха мелкими частицами пыли и токсичными веществами. Нормы «Евро-7» устанавливают строгие ограничения на содержание тяжёлых металлов и абразивных материалов в составе фрикционных элементов тормозных колодок, что способствует уменьшению воздействия транспорта на окружающую среду и здоровье населения. Введение этих норм требует разработки новых технологий производства и совершенствования конструкции тормозных механизмов, обеспечивая безопасность дорожного движения при одновременном снижении экологической нагрузки и увеличении автопарка [1].

Организация объединённых наций (ООН) и многие правительства стран обеспокоены ситуацией с загрязнением окружающей среды выбросами от шин, тормозных механизмов и дорожных покрытий. Поэтому стирание шин и тормозных механизмов представляет серьёзную экологическую проблему, усложняющуюся популярностью больших и мощных транспортных средств, таких как внедорожники, спорткары и стремительно увеличивающееся количество электромобилей, которые тяжелее по сравнению со стандартными автомобилями из-за наличия аккумуляторов.

Одним из способов снижения износа тормозных накладок является рекуперативное использование энергии, расходуемой на трение в системе «тормозная накладка – тормозной диск (или барабан)». В данной статье рассматриваются известные способы такой рекуперации и дана оценка возможности их применения на одном из отечественных автомобилей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рекуперация – это обратное получение, возвращение материалов или энергии для дальнейшего (вторичного) использования в том же технологическом процессе^{1,2,3} [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

¹ Тарраф М., Гаевский В.В., Диб М. Моделирование автомобиля с комбинированной системой хранения энергии на основе аккумулятора и маховика // Современные исследования: теория, практика, результаты (ШИФР-МКСИ) Сборник материалов IX Международной научно-практической конференции. Москва. Центр развития образования и науки 2024 г. С. 46-56.

² Жданов С.В., Веретин Я.С., Филимонов В.С. Ёмкостные накопители электрической энергии, применяемые на автомобилях // Проблемы и перспективы развития тылового обеспечения войск национальной гвардии. Сборник научных статей XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Пермь. Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации. 2024. С. 131-136.

³ Кочетков С.А. Рекуперация энергии в электротранспортном средстве // Математическая теория управления и её приложения: МКПУ-2022 Материалы 15-ой мультikonференции по проблемам управления. Санкт-Петербург, «Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор». 2022. С. 128-131.

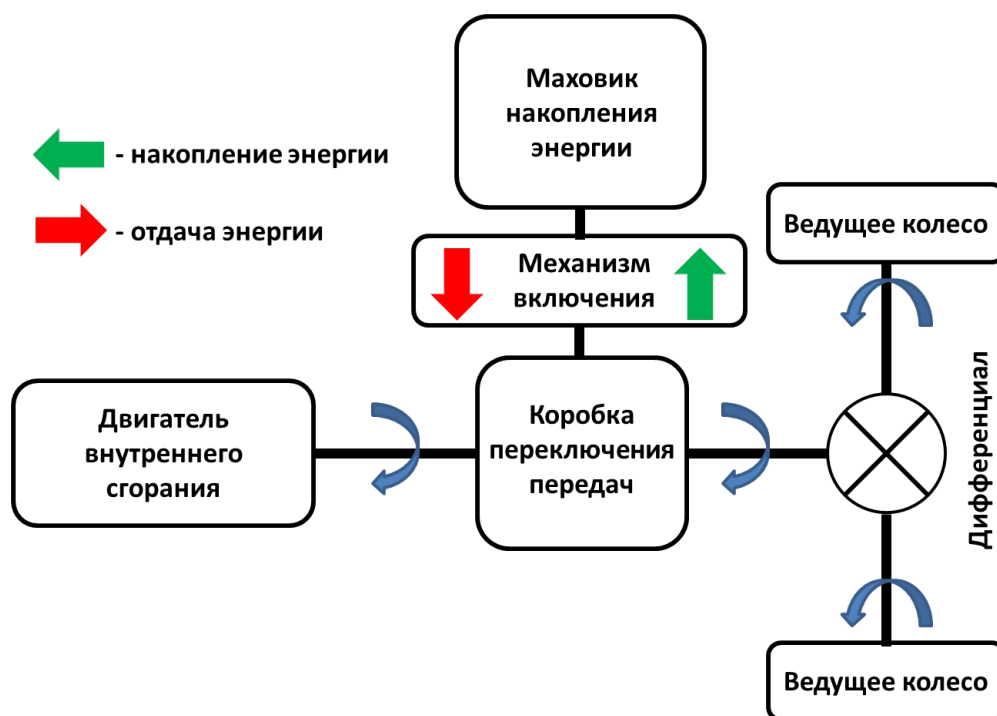


Рисунок 1 – Kinetic Energy Recovery System
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Kinetic Energy Recovery System
Source: compiled by the authors.

В данной статье рассматривается рекуперация кинетической энергии при торможении автомобиля. На данный момент существует три вида рекуперации тормозной энергии автомобиля:

1. Механическая рекуперация тормозной энергии – восстановление кинетической энергии транспортного средства во время торможения путём её накопления в виде механической энергии и последующего повторного использования для ускорения автомобиля.

2. Электрическая рекуперация тормозной энергии – восстановление с помощью мотор-генератора, основанное на преобразовании кинетической энергии движущегося транспортного средства в электрическую энергию при торможении.

3. Гидравлическая рекуперация тормозной энергии – восстановление с помощью гибридной силовой установки, объединяющей традиционный двигатель внутреннего сгорания (ДВС), пневматический накопитель и гидравлический насос-компрессор.

Механический вид рекуперации энергии в настоящее время нашёл применение в спортивных автомобилях Formula 1 (рисунок 1). Система KERS имеет три основных цикла: накопление энергии вращения колёс при торможении; сохранение кинетической энергии вращения колёс; применение накопленной энергии. Во время использования накопленной энергии автомобиль получает дополнительно 70–80 лошадиных сил на несколько секунд работы. Использование системы KERS в городском цикле позволяет сэкономить около 20% топлива⁴. Механическая система KERS основывается на раскрутке маховика массой 5 кг до частоты вращения более 60 000 оборотов в минуту.

Энергия, передаваемая маховику от вращения колёс при торможении, передаётся через тороидальный вариатор и уходит на раскручивание маховика, находящегося в цилиндрической герметичной камере. Тороидальный вариатор обеспечивает передачу энергии с минимальными потерями к накопи-

⁴ Тарраф М., Гаевский В.В., Диб М. Обзор результатов в применении гибридных транспортных систем с маховиком // Омский научный вестник. Серия: Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 4. С. 63–72.

телю (маховику) и от накопителя обратно к колёсам (рисунок 2). Такой вариатор позволяет развить мощность 80 лошадиных сил в течение 6 сек⁵. Вся система имеет вес порядка 24 кг и занимает объём 13 дм³.

Со временем Formula 1 перешла с механического вида рекуперативного торможения к электрическому виду.

Электрическое рекуперативное торможение на сегодняшний день распространено и применяется на гибридных автомобилях. Такой вид рекуперации позволяет транспортным средствам за счёт подзарядки аккумулятора во время торможения проехать большее расстояние^{6,7} [10, 11, 12, 13, 14, 15]. Переход на электрическую рекуперацию обусловлен низкой продолжительностью сохранения кинетической энергии маховиком.

Электрическая KERS функционирует следующим образом.

Мотор-генератор, установленный на коленчатом валу двигателя, при торможении переходит в режим генератора, накапливая энергию в аккумуляторные батареи. При необходимости увеличения мощности автомобиля водитель нажимает кнопку на руле, и накопленная энергия из аккумуляторных батарей направляется в мотор-генератор, который переходит в режим работы электродвигателя (см. рисунок 2).

Такая система имеет следующие плюсы:

- энергия, накапливаемая в аккумуляторных батареях, хранится гораздо дольше, чем кинетическая энергия маховика;
- в режиме торможения совместно с работой мотор-генератора на трансмиссию действует сила, дополнительно замедляющая транспортное средство.

Однако данная система имеет и минус:

- чрезмерный нагрев аккумуляторных батарей, требующих охлаждения. Для устранения этой проблемы на Formula 1 стали устанавливать суперконденсаторы. Это связано с тем, что из-за химических процессов, протекающих в аккумуляторных батареях, при кратковременном торможении незначительное количество энергии не получалось аккумулировать. Суперконденсатор накапливал эти кратковременные, но сильные всплески электроэнергии и отдавал энергию аккумуляторным батареям равномерно. Из-за высокой стоимости суперконденсаторы не получили широкого распространения в серийных автомобилях.

На данный момент наибольшую перспективу имеет пневмогидравлическая рекуперация. Наиболее известна установка Hybrid Air (рисунок 3)^{8,9}.

⁵ Тарраф М., Гаевский В.В., Диб М. Обзор результатов в применении гибридных транспортных систем с маховиком ... С. 63–72.

⁶ Хохлов А.А., Колдин М.С. Автомобили с гибридным приводом: особенности конструкции, направление модернизации // Наука и образование: материалы Международной научно-практической конференции «Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК» Мичуринский государственный аграрный университет. 2024. Т. 7, № 4.

⁷ Хохлов А.А., Колдин М.С. Автомобили с гибридным приводом: особенности конструкции, направление модернизации // Наука и образование. Материалы Международной научно-практической конференции «Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК» Мичуринский государственный аграрный университет. 2024. Том 7. № 4.

⁸ Кочергин В.И., Косолапов Д.А. Применение пневматических трансмиссий на автомобильной технике // Современные аспекты развития и безаварийной эксплуатации автомобильной техники (бронетанкового вооружения и техники): сборник материалов конференции III Межвузовской научно-технической конференции с международным участием, посвященная 105-летию со дня рождения Ивана Кирилловича Яковлева, Новосибирск, 31 мая 2023 года. Новосибирск: Новосибирский военный институт имени генерала армии И.К. Яковлева войск национальной гвардии Российской Федерации, 2023. С. 64–68.

⁹ Кочергин В.И., Косолапов Д.А. Применение пневматических трансмиссий на автомобильной технике // Современные аспекты развития и безаварийной эксплуатации автомобильной техники (бронетанкового вооружения и техники): сборник материалов конференции III Межвузовской научно-технической конференции с международным участием, посвященная 105-летию со дня рождения Ивана Кирилловича Яковлева, Новосибирск, 31 мая 2023 года. Новосибирск: Новосибирский военный институт имени генерала армии И.К. Яковлева войск национальной гвардии Российской Федерации, 2023. С. 64–68.

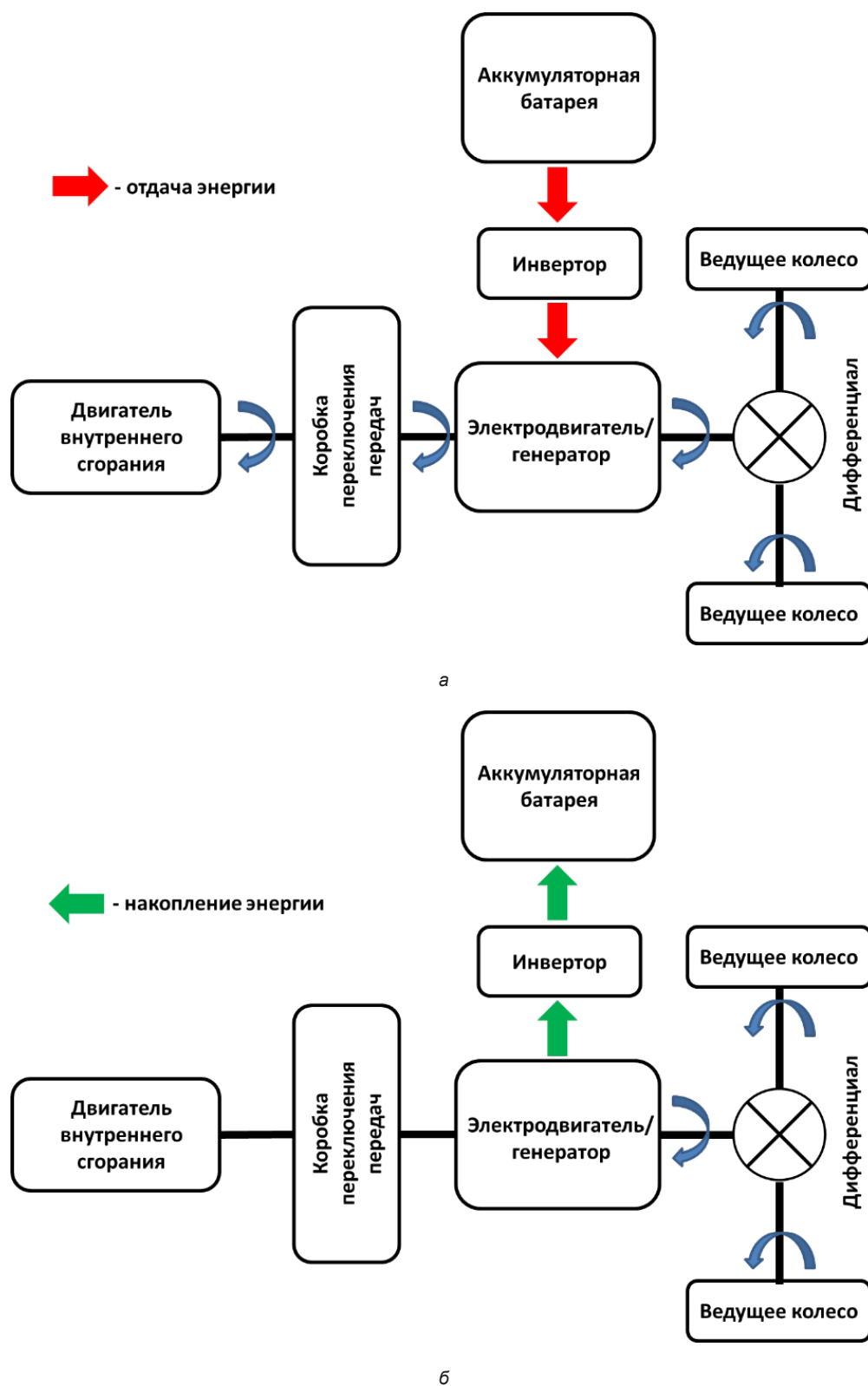


Рисунок 2 – Схема работы системы рекуперации: а – режим ускорения; б – режим торможения
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Recovery system operation scheme: a - acceleration mode; b - braking mode
Source: compiled by the authors.

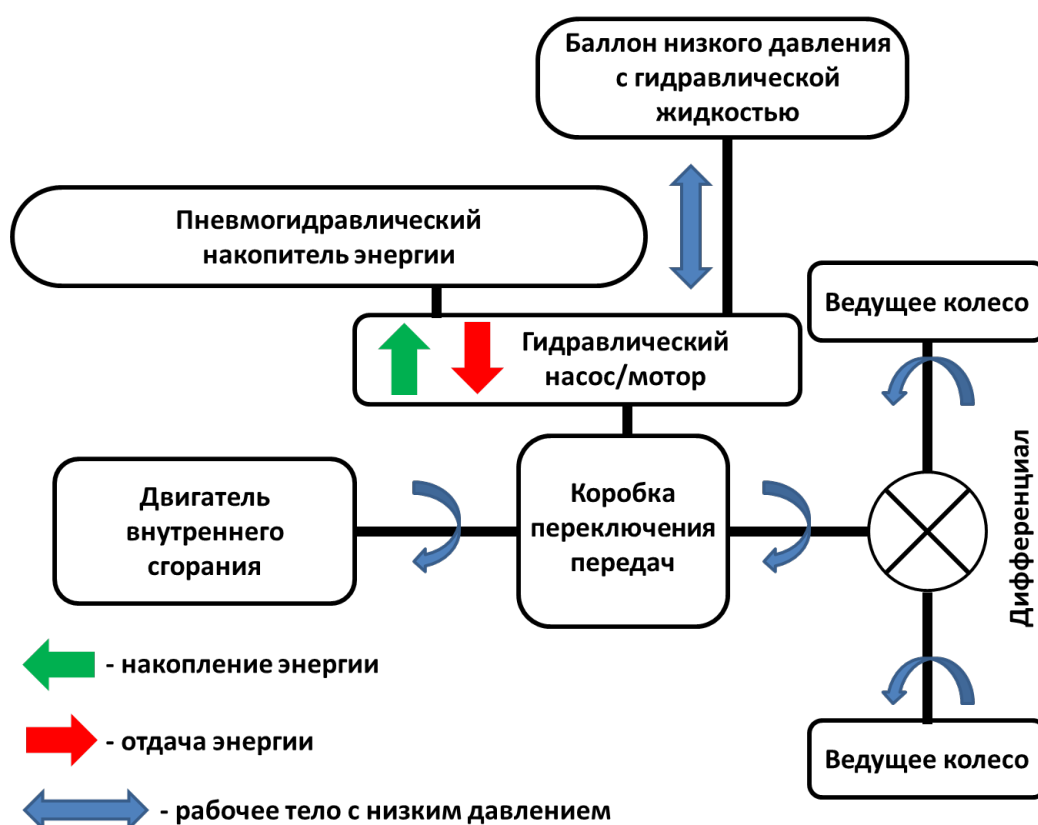


Рисунок 3 – Строение гибридного автомобиля PEUGEOT 2008 HybridAir
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Structure of the PEUGEOT 2008 Hybrid Air hybrid vehicle
Source: compiled by the authors.

Однако количество имеющихся таких транспортных средств невелико. Суть работы подобного агрегата заключается в способности гидромотора накачивать рабочую жидкость в большой гидроаккумулятор – трубу со сжатым газом. При разгоне автомобиля сжатый газ выталкивает рабочую жидкость, которая вращает тот же гидродвигатель и помогает экономить топливо. В системе нет дорогих аккумуляторных батарей, и её ресурс очень велик. Мощность гидромоторов также велика, а стоимость установки значительно меньше рассмотренных выше систем.

Подобная конструкция имеет и значительный минус – пневмогидравлический рекуператор обладает большими габаритами и массой, и реально его энергии хватает на один-два цикла разгона и торможения. Пробег без вклю-

чения ДВС составляет только пару километров для легковой машины и сотни метров для грузовика. При использовании на автобусах аналогичная конструкция позволяет полностью отказаться от применения классических тормозных механизмов, гидродвигатель сможет замедлить автомобиль до полной остановки.

Пневмогидравлический рекуператор по своим характеристикам превосходит электрические системы, которые при низкой скорости вращения колёс становятся уже неэффективными. Большим плюсом является возможность запасти энергию надолго, на часы или даже дни, в отличие от маховиков, которые уже после нескольких минут утрачивают крупную часть запасённой энергии. К сожалению, масштабные планы фирмы PEUGEOT были безразлично восприняты новыми акционе-

рами из китайской DONGFENG, а также партнёрами по разработке системы из FORD. Но именно китайские грузовики DONGFENG могут оказаться следующими массовыми носителями этой технологии.

На данный момент среди всех видов рекуперативного торможения автомобильные концерны создают экспериментальные автомобили, использующие именно механическую рекуперацию торможения для серийного производства. Поэтому можно задаться вопросом о возможности использования рекуперативного торможения на отечественных автомобилях.

Для этого необходимо узнать энергию торможения исследуемого автомобиля. Гипотетически для внедрения рекуперации торможения выберем отечественный бюджетный автомобиль ЛАДА КАЛИНА-2 и выполним необходимые расчёты. Требуется рассчитать энергию, получаемую маховиком при торможении, а также энергию, получаемую колёсами от маховика в момент ускорения¹⁰ [16, 17, 18, 19].

Расчёты производим, опираясь на конструкцию KERS. Нами была выбрана механическая система с маховиком из-за её относительно низкой стоимости в массовом производстве.

Для того чтобы рассчитать энергию торможения, нужно знать условия, при которых эта энергия будет накапливаться. Исследуемый автомобиль тормозит с максимально разрешённой скоростью в городе (60 км/ч) до полной остановки перед светофором. Зная это, можно рассчитать энергию, затрачиваемую на торможение, и энергию, получаемую от рекуперации.

$$E = \frac{mV^2}{2},$$

где E – кинетическая энергия автомобиля;

m – масса исследуемого автомобиля – 1185 кг;

V – скорость, с которой начинается торможение – 60 км/ч = 16,6 м/с.

$$E = 165 \text{ кДж.}$$

При торможении автомобиля ЛАДА КАЛИНА-2 со скорости 60 км/ч до полной остановки

по результатам расчётов получаем величину 165 кДж.

Маховик для рекуперации энергии принято расположить на задней оси исследуемого автомобиля. Передача энергии торможения от колёс к маховику будет осуществлена через вариатор. КПД вариатора составляет от 60 до 85%, передаточным отношением вариатора будет регулироваться степень торможения автомобиля. Регулировка усилия торможения вариатора будет осуществляться при помощи датчика положения педали тормоза либо отдельным тумблером.

Такая конструкция позволит передать кинетическую энергию от вращения колёс при торможении на маховик:

$$E = 0,5 \times I \times \omega^2,$$

где E – энергия торможения;

I – момент инерции массы;

ω – угловая скорость маховика.

$$I = 0,5 \times m \times r^2,$$

где m – масса маховика;

r – радиус маховика.

За основу нами выбрана KERS, следовательно, параметры маховика возьмём такие же, как применяются в KERS:

$M = 5 \text{ кг};$

$r = 120 \text{ мм.}$

Отсюда

$$\omega = 2 \times \pi \times N,$$

где N – частота вращения маховика;

$\pi = 3,14.$

Отсюда получаем $N = 124,2$ оборотов в секунду или $N = 7452$ оборотов в минуту.

Потери при стоянке на светофоре составят примерно 10%, остальная энергия от вращения маховика вернётся обратно на колёса через вариатор. При условии, что маховик будет работать по аналогии с маховиком Formula 1, получается 80 лошадиных сил при 80 000 оборотах в минуту. В нашем случае, как упоминалось выше, в течение 6 сек работы маховика на колеса будет передаваться усилие около 7 лошадиных сил.

¹⁰ Андреева Д.А. Повышение экономичности наземно-транспортных технологических машин с помощью рекуперации энергии торможения // Магистратура – автотранспортной отрасли. Материалы VII Всероссийской межвузовской конференции. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Санкт-Петербург. 2023. С.102-106.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проделанной работы можно сделать вывод, что исследуемый автомобиль ЛАДА КАЛИНА-2 массой 1185 кг тратит энергию в 163,3 кДж при торможении со скорости 60 км/ч до полной остановки. Эта энергия, если её не рекуперировать, переходит в тепловую энергию, нагревая тормозные колодки и тормозной диск. Рекуперировать её можно тремя способами:

- с помощью накопления кинетической энергии маховиком;
- с помощью преобразования энергии вращения колёс при торможении в электрическую энергию, используя для этого мотор-генератор;
- с помощью пневмогидравлической рекуперации.

Предполагается, что для внедрения системы рекуперации в отечественные автомобили выгоднее использовать механическую рекуперацию, так как она дешевле других видов, проще в установке и производстве. Если рекуперировать тормозную энергию с помощью кинетического маховика, то на колёса автомобиля можно будет вернуть около 7 лошадиных сил. Оставшаяся энергия тратится на раскручивание маховика и потери в механизмах системы, связанные с передачей от маховика к колёсам. Энергия, которая раньше тратилась на нагрев тормозных дисков и тормозных колодок, теперь тратится на раскручивание маховика, тем самым снижая температуру механизмов тормозной системы. Следовательно, положительным моментом также является тот факт, что снижение рабочей температуры тормозных дисков и тормозных колодок повышает эффективность тормозной системы. Также снижается выброс твёрдых частиц в окружающую среду от продуктов износа фрикционных поверхностей деталей тормозной системой.

Проведя анализ технических характеристик популярных моделей, выпускаемых на сегодняшний день автомобилей, можно сделать вывод, что среднее время разгона современного транспортного средства с 0 до 100 км/ч составляет около 12 сек. Энергия, накопленная в маховике в количестве 7 лошадиных сил, способна вращать маховик в течение 6 сек. Если уменьшить время работы маховика, то возможно увеличить мощность, передаваемую на колёса, но для городских условий востребован плавный разгон до максимально разрешённой скорости. В связи с этим для более эффектив-

ного использования автомобиля в городской среде было принято использование маховика в течение 6 сек, что делает эксплуатацию транспортного средства более эффективной.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённого анализа конструкторских и технологических решений, а также выполненных расчётов, можно сделать вывод, что использование на исследуемом автомобиле ЛАДА КАЛИНА-2 кинетической рекуперативной системы позволит в городском цикле эксплуатации автомобиля получить дополнительно 7 лошадиных сил на протяжении 6 сек работы системы рекуперации.

Такое решение даст следующие эксплуатационные преимущества:

- увеличение мощности при ускорении;
- снижение расхода топлива;
- уменьшение нагрузки на тормозную систему;
- увеличение срока службы тормозной системы;
- уменьшение загрязнения окружающей среды продуктами износа фрикционных поверхностей деталей тормозной системой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Трофименко Ю.В., Комков В.И. Актуализированный прогноз численности, структуры автомобильного парка России по типу энергоустановок и выбросов парниковых газов до 2050 г. // Вестник СибАДИ. 2023; 20(3): 350–361. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-350-361>. EDN: DDEUBI
2. Кузнецов Г.Ю., Логинова Е.Ю., Куделин К.В. Применение накопителей энергии на автономном подвижном составе для реализации электродинамического рекуперативного торможения // Электроника и электрооборудование транспорта. Научно-производственное предприятие «Томилинский электронный завод». 2023. № 4–6. С. 31–34.
3. Полуэктов А.А., Самурганов Е.Е., Сарксян М.Д. К вопросу изучения современного рекуперативного привода ТС // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2025. № 205. С. 396–404.
4. Худайбердиев А.И., Пулатов Т.Р. Оценка значения гидравлической системы рекуперации при торможении автобусов UZUZ1 // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. 2021. № 11(92). С. 36–38.
5. Emilia M. Szumska Regenerative braking systems in electric vehicles: a comprehensive review of design, control strategies, and efficiency challenges // Energies. 2025. № 18(10). P 1–22.

6. Le V.N., Dam H.Ph., Nguyen T.H., Kharitonchik S.V., Kusyak V.A. Research of regenerative braking strategy for electric vehicles // *Energetika. Proceedings of cis higher education institutions and power engineering associations*. 2023. Том 66. № 2. P. 105–123.
7. Исаков В.С., Ерейский А.В., Дериглазов В.С., Ткаченко А.Н. Энергонакопительная тормозная система для мобильных транспортных средств, оборудованных электроприводом // *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2023. № 22. С.61–67.
8. Павлов В.Д. Электромеханическое устройство для аккумулирования энергии // *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2024. Том 18, № 1. С. 13–18. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-623775>
9. Прилепский Ю.В., Целуйко Л.В., Гуртовенко А.И., Стародубцева Е.И. Исследование системы рекуперации с накопителями конденсаторного типа // *Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. Донецкая академия автомобильного транспорта*. 2024. № 1. С. 30–39.
10. Ehsani M. Singh K.V. Bansal H.O. Mehrjardi R.T. State of the art and trends in electric and hybrid electric vehicles // *Proceedings of the IEEE*. 2021. № 109. P. 967–984.
11. Горожанкин С.А., Савенков Н.В., Золотарев О.О. Исследование энергетической эффективности рабочего процесса гибридной силовой установки автомобиля при установившемся движении // *Труды НГТУ им. П.Е. АЛЕКСЕЕВА*. 2024. № 2 (145). С. 90–101. EDN: BNXVMC
12. Горожанкин С.А., Савенков Н.В., Степакин В.Р. Энергетическая эффективность режимов разгона автомобиля с гибридной силовой установкой // *Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки*. 2024. № 3. С. 168–177. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14018692>
13. Лин З.Н., Попов А.А., Сидоров В.Н., Голубина С.А. Оптимизация алгоритма управления автомобилем с гибридной силовой установкой // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2023. Т. 24, № 1. С. 50–56. DOI: <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-50-56>
14. Маркина А.А., Почуев Л.А. Проработка концепции автомобиля с гибридной силовой установкой // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2022. № 3 (55). С. 33–42. DOI: <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2022-3-33-42>
15. Нечипорук Н.В., Воробьев Ю.А., Пода В.Б. Определение показателей пневмодвигателя для гибридной силовой установки городского легкового автомобиля // *Вестник Харьковского национально-го автомобильно-дорожного университета*. 2019. № 85. С. 83–92. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2019.85.0.83>
16. Armenta-Déu C., Cortés H. Analysis of kinetic energy recovery systems in electric vehicles // *Vehicles*. 2023. № 5(2) P. 387–403.
17. 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: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2022-08-04-275-281>
18. Ле Т.Н., Ле Н.Т.М., Дам Х.Ф., Нгуен Т.Т., Харитончик С.В., Кусяк В.А. Обзор расчёта энергии рекуперативного торможения электрических автомобилей // *Автотракторостроение и автомобильный транспорт. Белорусский национальный технический университет*. 2023. Т. 1. С. 116–122. DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-105-123>
19. Лин З.Н., Скрынников А.В., Чижевский К.В., Сидоров В.Н. Математическая модель рекуперации электрической энергии транспортного средства // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2023. Т. 24, № 2. С. 177–186. DOI: <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-177-186>

REFERENCES

1. Trofimenko I.V., Komkov V.I. Updated number forecast, russian car fleet structures by type of power plants and greenhouse gas emissions until 2050. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(3): 350–361. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-350-361>. EDN: DDEUBI
2. Kuznetsov G.Yu., Loginova E.Yu., Kudelin K.V. Use of energy storage devices on autonomous rolling stock for the implementation of electrodynamic regenerative braking. *Electronics and electrical equipment of transport*. 2023; 4-6: 31–34. (In Russ.)
3. Poluektov A.A., Samurganov E.E., Sargsyan M.D. On the issue of studying a modern regenerative drive of a vehicle. *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University*. 2025; 205: 396–404. (in Russ.)
4. Khudaiberdiev A.I., Pulatov T.R. Assessment of the value of the hydraulic recuperation system during braking of UZUZI buses. *Universum: technical sciences: electronic. scientific journal*. 2021; 11 (92): 36–38. (in Russ.)
5. Emilia M. Szumska Regenerative braking systems in electric vehicles: a comprehensive review of design, control strategies, and efficiency challenges. *Energies*. 2025; 18(10): 1–22.
6. Le V.N., Dam H.Ph., Nguyen T.H., Kharitonchik S.V., Kusyak V.A. Research of regenerative braking strategy for electric vehicles. *Energetika. Proceedings of cis higher education institutions and power engineering associations*. 2023; Vol. 66. No. 2: 105–123.
7. Isakov V.S., Ereisky A.V., Deriglazov V.S., Tkachenko A.N. Energy-storage braking system for mobile vehicles equipped with an electric drive. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2023; 22: 61–67. (in Russ.)

8. Pavlov V.D. Electromechanical device for energy storage. *Izvestiya MGTU "MAMI*. 2024; Vol. 18. No. 1: 13–18. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-623775>

9. Prilepskiy Yu.V., Tseluiko L.V., Gurtovenko A.I., Starodubtseva E.I. Study of the recovery system with capacitor-type accumulators. *Bulletin of the Donetsk Academy of Automobile Transport. Donetsk Academy of Automobile Transport*. 2024; No. 1: 30–39. (in Russ.)

10. Ehsani M. Singh K.V. Bansal H.O. Mehrjardi R.T. State of the art and trends in electric and hybrid electric vehicles. *Proceedings of the IEEE*. 2021; 109: 967–984.

11. Gorozhankin S.A., Savenkov N.V., Zolotarev O.O. Study of the energy efficiency of the working process of a hybrid vehicle power plant during steady motion. *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*. 2024; 2: 90–101. EDN: BNXVMC

12. Gorozhankin S.A., Savenkov N.V., Stepankin V.R. Energy efficiency of hybrid vehicle acceleration modes. *Vestnik of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences*. 2024; 3: 168–177. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14018692>

13. Lin Z.N., Popov A.A., Sidorov V.N., Golubina S.A. Optimization of the control algorithm for a vehicle with a hybrid power plant. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023; 24(1): 50–56. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-50-56>

14. Markina A.A., Pochuev L.A. Elaboration of the concept of a car with a hybrid power plant. *Vestnik Ural State Transport University*. 2022; 3 (55): 33–42. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2022-3-33-42>

15. Nechiporuk N.V., Vorobyov Yu.A., Poda V.B. Definition of the indicators of the pneumatic motor for the hybrid power plant of an urban passenger car. *Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Highway University*. 2019; 85: 83–92. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2019.85.0.83>

16. Armenta-Déu C., Cortés H. Analysis of kinetic energy recovery systems in electric vehicles. *Vehicles*. 2023; 5 (2): 387–403.

17. Butarovich D.O., Skotnikov G.I., Erano-syan A.V. Regenerative braking control algorithm using the accelerator pedal. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2022; 4: 275–281. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2022-08-04-275-281>

18. Le V.N., Dam H.P., Nguyen T.H., Kharitonchik S.V., Kussyak V.A. Research of Regenerative Braking Strategy for Electric Vehicles. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and pow-*

er engineering associations. 2023; 66(2): 105–123. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-105-123>

19. Lin Z.N., Skrynnikov A.V., Chizhevsky K.V., Sidorov V.N. Mathematical model of vehicle electrical energy recovery. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023; 24(2): 177–186. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-177-186>

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Павленко Е.А. Поиск источников, проведение обзора литературы. Изучение существующих исследований и систематизация информации. Подготовка текста и рисунков статьи.

Жданов Н.А. Поиск источников, анализ найденных решений и оформление текста статьи.

Крячек-Ахиев В.Л. Поиск источников, выполнение расчётов и оформление текста статьи.

CONTRIBUTION OF AUTHORS

E.A. Pavlenko Literature search and review. State-of-the-art study, systematizing information. Writing the manuscript, preparing figures.

N.A. Zhdanov Literature search, analysis of technical solutions, formatting the text.

V.L. Kryachek-Akhiev Literature search, making calculations and formatting the text.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Павленко Евгений Александрович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Электроэнергетика и транспорт» ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», Пятигорский институт (филиал) СКФУ в г. Пятигорске (357500, г. Пятигорск, пр. 40 лет Октября, д. 56).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4068-4213>,

SPIN-код: 3215-1696

e-mail: evgeneip@bk.ru

Жданов Николай Андреевич – преподаватель колледжа ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», Пятигорский институт (филиал) СКФУ в г. Пятигорске (357500, г. Пятигорск, пр. 40 лет Октября, д. 56).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5393-1812>,

e-mail: zhdanovnikolay2000@gmail.com

Крячек-Ахиев Валентин Леонидович – ассистент кафедры «Электроэнергетика и транспорт» ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», Пятигорский институт (филиал) СКФУ в г. Пятигорске (357500, г. Пятигорск, пр. 40 лет Октября, д. 56).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7753-3883>,

e-mail: j182014@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgeny A. Pavlenko – PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering and Transport, North Caucasus Federal University, Pyatigorsk Institute (branch) of NCFU in Pyatigorsk (357500, Pyatigorsk, 40th Anniversary of October Ave., 56).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4068-4213>,

SPIN-code: 3215-1696,

e-mail: evgeneip@bk.ru

Nikolay A. Zhdanov – College Lecturer, North Caucasus Federal University, Pyatigorsk Institute (branch) of NCFU in Pyatigorsk (357500, Pyatigorsk, 40th Anniversary of October Ave., 56).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5393-1812>,

e-mail: zhdanovnikolay2000@gmail.com

Valentin L. Kryachek-Akhiev – assistant of the Department of Electric Power Engineering and Transport of the North Caucasus Federal University Pyatigorsk Institute (branch) of NCFU in Pyatigorsk (357500, Pyatigorsk, 40th Anniversary of October Ave., 56).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7753-3883>,

e-mail: j182014@yandex.ru

Научная статья
УДК 656.1
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-618-629>
EDN: ESUPZG



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТНО-СКЛАДСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ РОЗНИЧНОЙ ПРОДАЖИ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРАДИЦИОННЫХ И ОНЛАЙН-ТЕХНОЛОГИЙ

Л.С. Трофимова ✉, В.С. Социховский

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

✉ ответственный автор
trofimova_ls@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена повышению производительности транспортно-складских процессов с акцентом на анализ операций, выполняемых на складе. Решение задачи осуществлено на примере магазинов бытовой техники и электроники, но результаты решения могут быть распространены на системы розничной продажи, осуществляемой с использованием традиционных и онлайн-технологий. Выполнено дифференцированное оценивание производительности отдельных частей транспортно-складского хозяйства рассматриваемых видов магазинов – транспортных средств, осуществляющих доставку товаров, и работников склада. Анализируются проблемы, связанные с неравномерностью работы складов в периоды высокой покупательской активности. Актуальность исследования обоснована показателями статистики, подтверждающей рост продаж в данном рыночном сегменте. Целью исследования является повышение эффективности транспортно-складских процессов за счет разработки математической модели, определяющей взаимосвязь выработки склада магазинов бытовой техники и электроники с выработкой автотранспортных средств, осуществляющих перевозку товара.

Материалы и методы. Для формирования математической модели использовался метод оптимизации технологических процессов. Решение задачи выполняется методом перебора по натуральному показателю – выработке с учетом принятых ограничений. Элементы транспортно-складских процессов для математического описания включают в себя выработку каждого работника склада, выполняющего конкретную операцию; выработку каждого автотранспортного средства, обеспечивающего выполнение конкретной операции на складе. Планирование выполняется по дням конкретного месяца года.

Результаты и выводы. В разработанной математической модели определено, что выработка всех работников и единиц подвижного состава обеспечивает выполнение необходимых операций для обработки товара, поступившего на склад. Математическая модель направлена на формирование потребного количества работников склада и автотранспортных средств, с учетом выработки для выполнения всего объема работ по критерию эффективности – прибыль. Направление дальнейших исследований для практической реализации математической модели – определение вероятностных параметров модели – выработка работников склада и автотранспортных средств, время на обработку заказа по группам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: транспортно-складские процессы, склад магазина, автотранспортные средства

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

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы благодарят редакционную коллегию и редакционный совет научного рецензируемого журнала «Вестник СибАДИ», анонимных рецензентов статьи.

Статья поступила в редакцию 12.05.2025; одобрена после рецензирования 17.06.2025; принята к публикации 22.08.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

© Трофимова Л.С., Социховский В.С., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

Для цитирования: Трофимова Л.С., Социховский В.С. Математическая модель транспортно-складских процессов в системах розничной продажи, осуществляемой с использованием традиционных и онлайн-технологий // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, №. 4. С. 618-629. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-618-629>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-618-629>

EDN: ESUPZG

MATHEMATICAL MODEL OF TRANSPORT AND WAREHOUSE PROCESSES IN RETAIL SALES SYSTEMS EVOLVING TRADITIONAL AND ONLINE TECHNOLOGIES

Liudmila S. Trofimova ✉, **Vladislav S. Sotsikhovskiy**
Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia
✉ corresponding author
trofimova_ls@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The article is devoted to increasing the productivity of transport and warehouse processes with an emphasis on the analysis of operations performed in the warehouse. Household appliances and electronics retailers have been taken as an example for solving the problem, but the results of the study can be extended to retail systems based on traditional and online technologies.

The productivity of integral parts of transportation and warehousing for the stores under investigation, such as vehicles for delivering goods and warehouse workers, has been given a differentiated assessment. The problems associated with unbalanced warehouse operation during peak sales periods are considered. The relevance of the study refers to statistical data confirming the growth of sales in this market segment. The purpose of the study is to develop a mathematical model that determines the relationship between the output of a warehouse of household appliances and electronics stores and the output of vehicles transporting goods.

Materials and methods. The method of optimization of technological processes was used to develop the mathematical model. The solution of the problem is achieved through using the search method for output physical indicator with the adopted restrictions taken into account. Elements of transport and warehouse processes for mathematical description include the output per each warehouse worker performing a specific operation; the output of each vehicle performing a specific task in the warehouse. Planning is considered on daily basis for the specific month of the year.

Results and conclusions. The developed mathematical model defines that the output of all workers and rolling stock units ensures the necessary operations for processing the goods received at the warehouse. The mathematical model prescribes the required number of warehouse workers and vehicles, taking into account the output of the entire work according to the efficiency criterion – profit. Directions for further research on practical implementation of the mathematical model include determining the probabilistic parameters of the model – output of warehouse workers and vehicles, time for processing an order by groups.

KEYWORDS: transport and warehouse processes; store warehouse; motor vehicles

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

ACKNOWLEDGMENTS. The authors thank the editorial board and editorial board of the Scientific Peer-Reviewed Journal “The Russian Automobile and Highway Industry Journal” anonymous reviewers of the article.

The article was submitted: May 12, 2025; approved after reviewing: June 17, 2025; accepted for publication: August 22, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

© Trofimova L.S., Sotsikhovskiy V.S., 2025



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

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

For citation. Trofimova L.S., Sotsikhovskiy V.S. Mathematical model of transport and warehouse processes in retail sales systems evolving traditional and online technologies. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (4): 618-629. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-618-629>

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В статье представлена математическая модель для планирования транспортно-складских процессов при работе склада магазинов бытовой техники и электроники. Исследования связаны с изучением современного состояния розничной торговли в городе Омске и темпов её изменения, практики работы склада магазинов бытовой техники и электроники, автотранспортных средств, осуществляющих перевозку товара. Разработанная математическая модель позволяет подбирать работников склада и автотранспортные средства по их выработке, обеспечивающей продажу товара каждый день. Совокупность математических уравнений для реализации разработанной целевой функции – максимум прибыли, определяет взаимосвязь выработки склада магазинов бытовой техники и электроники с выработкой автотранспортных средств, осуществляющих перевозку товара. В данной математической модели предусмотрены ограничения, связанные с выполнением заказов по их количеству и выработке. Практическая реализация – планирование транспортно-складских процессов. Направление дальнейших исследований для практической реализации математической модели – определение вероятностных параметров модели – это выработка работников

склада и автотранспортных средств, время на обработку заказа по группам.

ВВЕДЕНИЕ

В эпоху цифровизации и стремительного развития e-commerce розничные сети бытовой техники и электроники сталкиваются с возрастающим давлением: потребители ожидают мгновенного доступа к широкому ассортименту продукции, быстрой доставки и персонализированного обслуживания. В этих условиях особая роль отводится транспортно-складским процессам внутри самих магазинов розничных сетей.

Согласно статистическим данным территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Омской области, оборот розничной торговли за 2023 г. составил 480179,6 млн руб., что на 11,7% больше по сравнению с предыдущим периодом.

Данные, представленные на сайте Федеральной службы государственной статистики, позволяют отследить динамику изменения доли розничной продажи бытовой техники и электроприборов в специализированных магазинах в период с 2019 по 2023 г. в Омской области. В таблице показано значение показателя по Омской области.

Таблица

Доля розничной продажи бытовой техники и электроприборов в % по товарным группам
Источник: составлено авторами.

Table

Share of retail sales of household appliances and electrical appliances in % by product groups
Source: compiled by the authors.

Наименование	Значение показателей по годам, %				
	2019	2020	2021	2022	2023
Осветительные приборы	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Бытовые электротовары	5,0	6,1	6,1	6,5	7,3
Аудио- и видеотехника	2,3	2,8	2,5	2,4	2,9
Компьютеры, периферийные устройства, персональные компьютеры, ноутбуки, клавиатуры, компьютерные мыши, пакеты MS Office, антивирусные программы	2,3	3,4	3,4	3,4	3,3
Фотоаппаратура, оптические приборы и средства измерений	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Телекоммуникационное оборудование	3,8	4,7	4,8	4,0	4,2

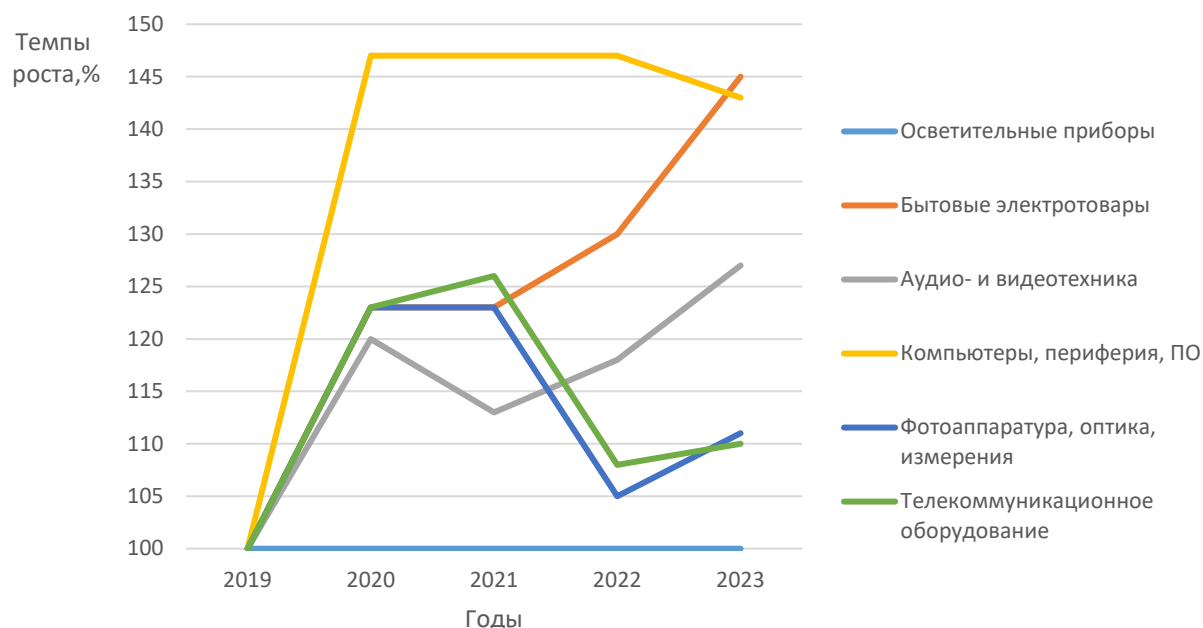


Рисунок 1 – Темпы роста доли розничной продажи бытовой техники и электроники
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Growth rate for retail sales of household appliances and electronics
Source: compiled by the authors.

Темпы роста доли розничной продажи бытовой техники и электроники приведены на рисунке 1. В период с 2019 по 2023 г. в структуре розничной торговли бытовой техникой и электроникой наблюдается рост доли бытовых электротоваров и аудио- видеотехники, при этом доли остальных категорий остаются стабильными или незначительно колеблются.

Крупные сети магазинов бытовой техники и электроники, стремясь к бесперебойному обеспечению товаром и удовлетворению покупательского спроса, сталкиваются с непростой дилеммой: как эффективно организовать приемку товара, особенно в пиковые дни покупательской активности. Данный сегмент относится к разделу «бизнес для потребителя» [1].

Научные и практические работники, занимающиеся исследованием проблем функционирования склада и транспортного процесса, отмечают необходимость использования диверсифицированного подхода к организации логистических транспортных потоков в формате построения бизнеса доставки [2]. Применение системного анализа является необходимым условием для планирования транспортно-складских процессов [3, 4].

Следует согласиться с авторами работы о том, что необходимым условием исследования транспортно-складских процессов яв-

ляется выявление «узких мест» и сроков выполнения процессов на разных складах [5]. Ключевым показателем эффективности логистических процессов является время транспортировки [6]. Существенной проблемой в применении инструментов моделирования в производственных процессах является сложность эффективной интеграции этих инструментов в логистические системы, что часто приводит к недоиспользованию производительности [7]. Существует острая необходимость в системах производственного моделирования для анализа как входящих, так и исходящих цепочек поставок. Эпоха проверки «на глаз» постепенно уходит в прошлое [8]. Интеграция стохастического моделирования обеспечивает более надежные решения для устранения неопределенностей, присущих логистическим операциям. Такая интеграция может повысить надёжность и применимость логистических решений в городских условиях [9]. Транспортно-складская логистическая система – это не просто набор ресурсов, а тщательно выстроенная иерархия подсистем. Она включает в себя квалифицированный персонал, сеть складских комплексов, разнообразный транспортный парк, специализированное оборудование и инфраструктуру. Все компоненты организованы и взаимосвязаны, чтобы

сконцентрировать ресурсы в нужном месте и в нужное время для выполнения поставленных логистических целей [10].

Н.Д. Протопопов [11] отметил, что при организации управления складом следует учитывать такие важные факторы, как взаимодействие с потоками, степень загрузки сотрудников и рациональное использование пространства на складе.

Е.С. Хоруженко и С.М. Мочалин [12] предложили модель планирования доставки грузов, которая позволяет оптимизировать транспортно-складские издержки в прямых цепях поставок. Модель позволяет проанализировать процесс поставки с целью определения наиболее оптимального варианта.

В работе¹ сделан акцент на автоматизацию складских процессов, однако без учета затрат времени на выполнение погрузо-разгрузочных операций с использованием автотранспортных средств.

А.Б. Левина, Ю.С. Якунина, Е.Ю. Трофименко [13] для планирования транспортно-складских процессов разработали показатель – уровень логистизации хозяйственных субъектов (торговых предприятий) на рынке, позволяющий оценить внедрение логистических подходов в деятельность предприятий торговли.

Для планирования транспортно-складских процессов использовались:

- метод имитационного моделирования дискретных событий [14, 15] при анализе стратегий комплектации заказов [14], принятии решения о наиболее подходящем месте для хранения [15];
- метод построения графа для операций, выполняемых на складе [16];
- динамическое моделирование с использованием гибридной парадигмы, основанной на моделировании дискретных событий и агентном моделировании, чтобы воспроизвести исторический процесс планирования на складе [17].

Обзор ранее выполненных исследований, которые проводились отечественными и зарубежными исследователями, подтверждает актуальность настоящей статьи. Моделирование транспортно-складских процессов в магазинах бытовой техники и электроники должно выполняться с учетом ликвидации «узких

мест», сроков выполнения этих процессов, производительности. Планирование по разработанной математической модели должно обеспечивать надежные управленческие решения для устранения неопределенностей.

В ранее выполненных исследованиях, которые проводились отечественными и зарубежными авторами, не в полной мере решены проблемы взаимосвязи транспортных и складских процессов при наличии критерия эффективности функционирования этих процессов – прибыли. Математические модели не решают проблемы подбора работников склада и автотранспортных средств с учетом их выработки.

Целью исследования является повышение эффективности транспортно-складских процессов за счет разработки математической модели, определяющей взаимосвязь выработки склада магазинов бытовой техники и электроники с выработкой автотранспортных средств, осуществляющих перевозку товара.

Задачи настоящего исследования:

- изучить практику работы склада магазинов бытовой техники и электроники и автотранспортных средств, осуществляющих перевозку товара;
- определить элементы транспортно-складских процессов для математического описания плановых показателей;
- выполнить формирование математических уравнений для реализации разработанной целевой функции, определяющей взаимосвязь выработки склада магазинов бытовой техники и электроники с выработкой автотранспортных средств, осуществляющих перевозку товара;
- установить направления дальнейших исследований для практической реализации математической модели.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для формирования математической модели использовался метод оптимизации технологических процессов. В качестве критерия оптимизации выбран показатель – прибыль от выполнения транспортно-технологических процессов. Решение задачи выполняется методом перебора по натуральному показателю – выработке с учетом принятых ограничений [18, 19].

¹ Кондрашова Д.С., Хомякова А.А. Автоматизация управления логистическими процессами торгового предприятия // Сборник научных трудов вузов России «Проблемы экономики, финансов и управления производством». 2022. № 50. С. 43–47.

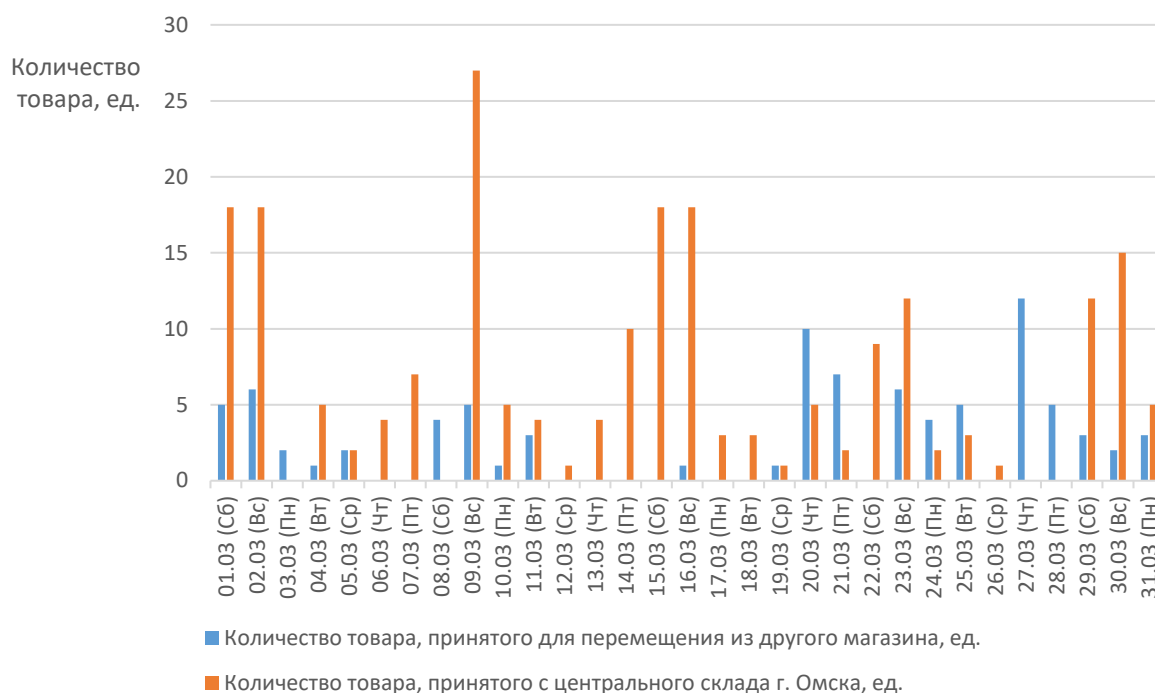


Рисунок 2 – Динамика изменения количества принимаемого товара в марте 2025 г.
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Dynamics of changes in the quantity of goods accepted in March 2025
Source: compiled by the authors.

Элементы транспортно-складских процессов для математического описания при планировании включают себя выработку каждого работника склада от 1 до В ($b = \overline{1, B}$), выполняющего конкретную операцию (рисунки 2, 3, 4) от 1 до 6 ($a = \overline{1, 6}$); выработку каждого автотранспортного средства от 1 до Х ($x = \overline{1, X}$), обеспечивающего выполнение конкретной операции на складе.

Операции, выполняемые на складе:

- 1 – прием товара, который был заказан онлайн, через сайт магазина, и в качестве пункта выдачи был выбран именно этот магазин;
- 2 – прием товара с центрального склада;
- 3 – прием товара с регионального склада;
- 4 – подбор интернет-заказов;
- 5 – отгрузка товара для перемещения на другой магазин;
- 6 – отгрузка товара, предназначенного под доставку для клиента.

Операции с 1-й по 4-ю требуют затрат времени на выполнение разгрузки груза и работы на складе; 5-я и 6-я операции требуют затрат времени на выполнение погрузки груза и работы на складе.

Планирование выполняется по дням конкретного месяца года от 1 до К ($k = \overline{1, K}$).

Для планирования используется булева переменная назначения:

– работника склада для выполнения работником конкретной операции, только после окончания предыдущей операции ($l_{b,a,k}$ – булева переменная назначения b-го работника склада на выполнение a-й операции в k-й день, $l_{b,a,k} = \overline{0,1}$, $l_{b,a,k} = \text{int}(l_{b,a,k})$);

– автотранспортного средства для выполнения автотранспортным средством конкретной операции, только после окончания предыдущей операции ($n_{x,a,k}$ – булева переменная назначения x-го автотранспортного средства, обеспечивающего выполнение a-й операции на складе в k-й день, $n_{x,a,k} = \overline{0,1}$, $n_{x,a,k} = \text{int}(n_{x,a,k})$).

В разработанной математической модели определено, что выработка всех работников и единиц подвижного состава обеспечивает выполнение необходимых операций для реализации товара, поступившего на склад. Время, необходимое для выполнения операций, должно быть меньше или равно частному от деления сменного времени в конкретный день на количество товара, поступившего на склад в этот день.

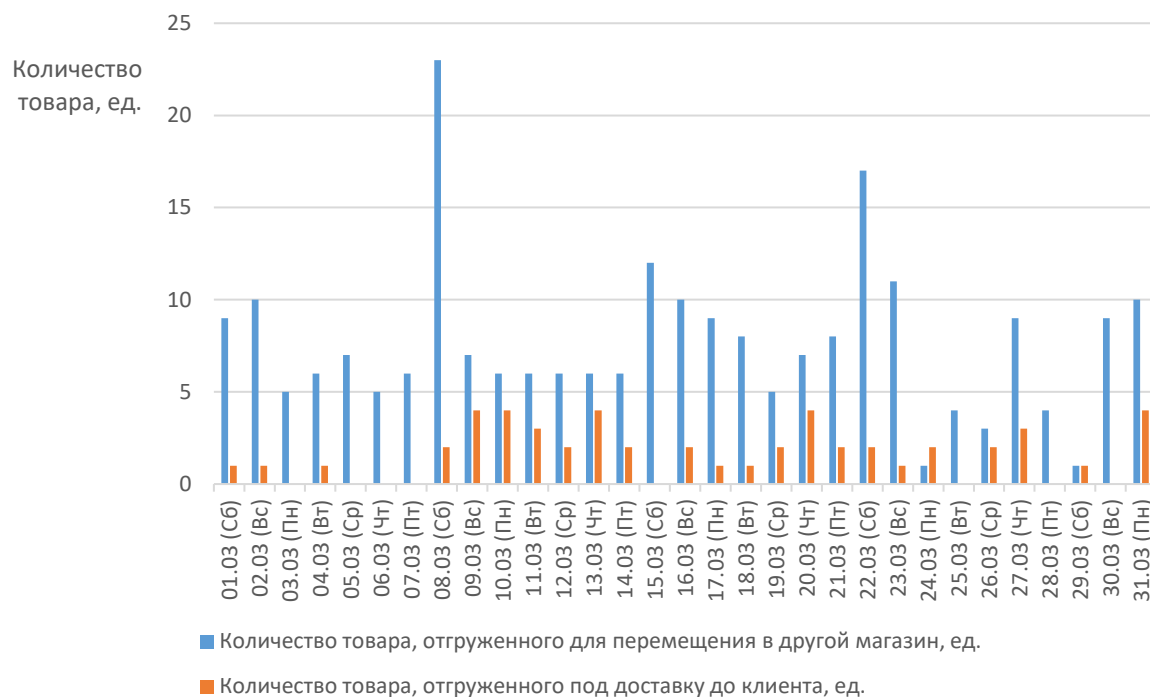


Рисунок 3 – Динамика изменения количества отгружаемого товара в марте 2025 г.
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Dynamics of change in the quantity of goods shipped in March 2025.
Source: compiled by the authors.

Математическая модель направлена на формирование потребного количества работников склада и автотранспортных средств, с учетом выработки для выполнения всего объема. В качестве вероятностных показателей используются выработка работника склада и выработка автотранспортного средства.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование практики работы склада магазина одной крупной сети в г. Омске позволило установить количество принятых, отгруженных товаров, а также собранных интернет-заказов по дням недели в марте 2025 г. Изменение данных показателей представлено на рисунках 2, 3, 4.

На рисунке 2 представлено изменение количества принятых для перемещения товаров из другого магазина – это товары, которые были заказаны онлайн, через сайт магазина, и в качестве пункта выдачи был выбран именно этот магазин.

В марте 2025 г. количество данного товара варьировалось от 0 до 12 ед. Максимальное количество (12 ед.) было зафиксировано в

четверг, 27 марта 2025 г. Также имелись дни, когда товары из других магазинов не перемещались: 6 и 7 марта, с 12 по 15 марта, а также 17, 18, 22 и 26 марта 2025 г.

Кроме того, поставки товара на склад осуществляются с центрального склада. Наибольший объем поступления (27 ед.) зафиксирован 9 марта 2025 г. Минимальный объем, равный нулю, наблюдался 3, 8, 27 и 28 марта 2025 г.

Отгрузки со склада можно разделить на два вида: отгрузки для перемещения на другой магазин и отгрузки, предназначенные под доставку для клиента (рисунок 3). Отгрузки на доставку для клиента – это товары (в основном бытовая техника), которые клиент не может самостоятельно забрать из магазина. Их забирает транспортная компания, осуществляющая доставки грузов внутри города, доставляющая товар до квартиры покупателя.

Количество товара, отгруженного для перемещения в другой магазин, в марте 2025 г. изменяется от 1 до 23 ед. Максимальное количество (23 ед.) было зафиксировано в субботу, 8 марта 2025 г. Минимальный объем отгрузки, составляющий 1 ед., отмечен 24 и 29 марта.

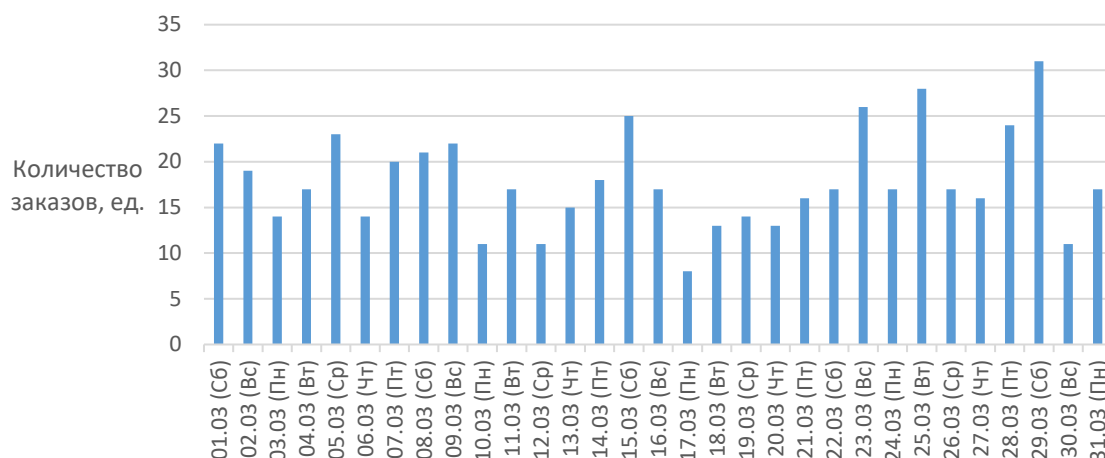


Рисунок 4 – Динамика изменения количества собранных интернет-заказов в марте 2025 г.
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Dynamics of change in the number of collected Internet orders in March 2025
Source: compiled by the authors.

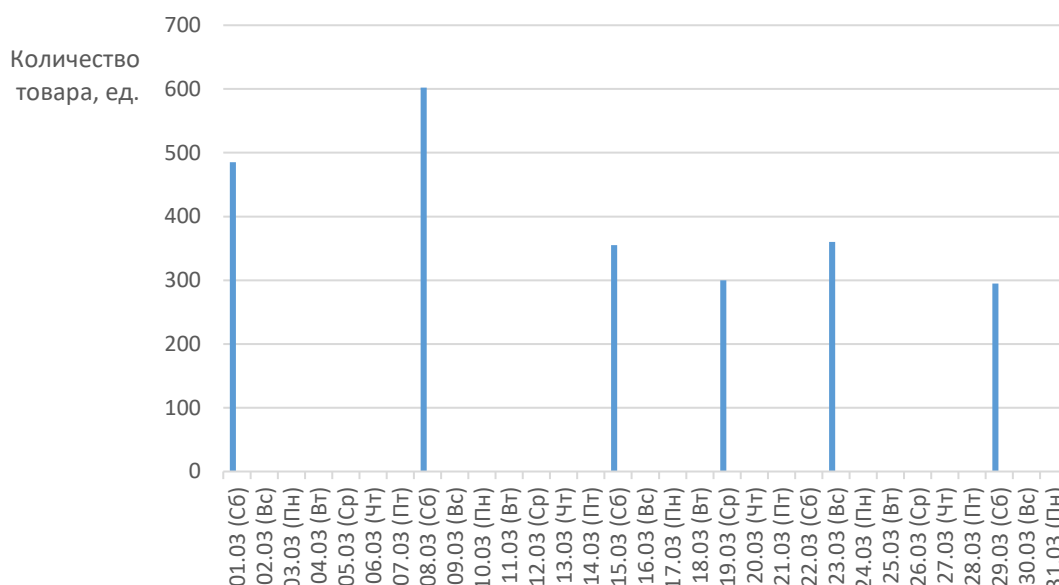


Рисунок 5 – График поставок с регионального склада в марте 2025 г.
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Schedule of deliveries from the regional warehouse in March 2025
Source: compiled by the authors.

Объем товара, который предназначен под отгрузку до клиента в марте изменялся от 0 до 4 ед. Максимальное количество отгруженного товара для доставки клиенту составило 4 ед. (9, 10, 13 и 31 марта), а минимальное – 0 ед. (3, 5, 6, 7, 15, 21, 25 и 27 марта).

Помимо приемки и отгрузки товаров в обязанности склада входит подбор интернет-заказов (рисунок 4).

В течение марта 2025 г. объем подобранных интернет-заказов колебался от 8 до 31 ед.:

наибольшее количество заказов было отмечено в субботу, 29 марта (31 заказ), а наименьшее – в понедельник, 17 марта (8 заказов).

Кроме того, в выходные дни на склад поступает товар с регионального склада, расположенного в городе Новосибирске (рисунок 5). Максимальная поставка была 08.03.2025 – 602 ед. товара, а минимальная 29.03.2025 – 295 ед.

Анализируя все выше представленные рисунки 2, 3, 4 и 5, можно сделать вывод о том,

что основной поток товара приходится на выходные дни. Однако именно в эти дни магазины в торговых центрах испытывают максимальную нагрузку.

Сотрудники склада вынуждены временно приостанавливать выполнение своих основных задач, связанных со сборкой и выдачей интернет-заказов, а также отгрузкой товара для приоритетной приемки вновь прибывших партий грузов. Параллельно функции по обработке интернет-заказов делегируются продавцам, что негативно сказывается на качестве обслуживания клиентов и эффективности выполнения их непосредственных обязанностей. Данная практика в сочетании с недостаточной квалификацией персонала способствует увеличению вероятности ошибок в складских процессах, возникновению расхождений в учетных данных, задержкам при выдаче заказов и, как следствие, приводит к финансовым потерям и снижению лояльности потребителей.

Результаты исследований практики позволили разработать математическую модель (формулы (1) – (7)).

Целевой функцией, определяющей взаимосвязь выработки склада магазинов бытовой техники и электроники с выработкой автотранспортных средств, осуществляющих перевозку товара, является прибыль (формула (1)).

$$\sum_{k=1}^K \Pi_k \rightarrow \max; \quad (1)$$

$$\Pi_k = (D_k - Z_k); \quad (2)$$

$$D_k = \sum_{b=1}^B \sum_{a=1}^6 (W_{b,a,k} \cdot l_{b,a,k}) \cdot S_{b,a} + \sum_{i=1}^I \sum_{a=1}^6 (Q_{i,a,k} \cdot n_{i,a,k}) \cdot C_{i,a}; \quad (3)$$

$$Z_k = \sum_{b=1}^B \sum_{a=1}^6 (W_{b,a,k} \cdot l_{b,a,k}) \cdot F_{b,a} + \sum_{i=1}^I \sum_{a=1}^6 (Q_{i,a,k} \cdot n_{i,a,k}) \cdot N_{i,a}; \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sum_{b=1}^B \sum_{a=1}^6 (W_{b,a,k} \cdot l_{b,a,k}) \geq U_k \\ \sum_{i=1}^I \sum_{a=1}^6 (Q_{i,a,k} \cdot n_{i,a,k}) \geq U_k \end{cases}; \quad (5)$$

$$\sum_{b=1}^B \sum_{a=1}^6 (W_{b,a,k} \cdot l_{b,a,k}) \cdot t_{b,a,k} \leq \frac{\Phi P B_k}{U_k}; \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{a=1}^6 (Q_{i,a,k} \cdot n_{i,a,k}) \cdot T_{i,a,k} \leq \frac{\Phi P B_k}{U_k}, \quad (7)$$

где Π_k – прибыль от выполнения транспортно-складских процессов за k -й день, руб.; D_k – доход от выполнения транспортно-складских процессов за k -й день, руб.; Z_k – затраты на выполнение транспортно-складских процессов за k -й день, руб.; $W_{b,a,k}$ – выработка b -го работника склада при выполнении a -й операции в k -й день, ед.; $l_{b,a,k}$ – булева переменная назначения b -го работника склада на выполнение a -й операции в k -й день, $l_{b,a,k} = 0, 1$, $l_{b,a,k} = \text{int}(l_{b,a,k})$; $Q_{x,a,k}$ – выработка x -го автотранспортного средства, обеспечивающего выполнение a -й операции на складе в k -й день, ед.; $n_{x,a,k}$ – булева переменная назначения x -го автотранспортного средства, обеспечивающего выполнение a -й операции на складе в k -й день, $n_{x,a,k} = 0, 1$, $n_{x,a,k} = \text{int}(n_{x,a,k})$; $S_{b,a}$ – величина тарифа для b -го работника склада при выполнении a -й операции, руб./ед.; $C_{x,a}$ – величина тарифа для x -го автотранспортного средства, обеспечивающего выполнение a -й операции на складе в k -й день, руб./ед.; $F_{b,a}$ – величина себестоимости при выполнении a -й операции b -м работником склада, руб./ед.; $N_{x,a}$ – величина себестоимости транспортного процесса для x -го автотранспортного средства, обеспечивающего выполнение a -й операции на складе в k -й день, руб./ед.; U_k – количество товара, поступившего на склад в k -й день, ед.; $t_{b,a,k}$ – время для b -го работника склада при выполнении a -й операции в k -й день, час; $T_{x,a,k}$ – время для x -го автотранспортного средства, обеспечивающего выполнение a -й операции на складе в k -й день, ч; $\Phi P B_k$ – время работы склада в k -й день, ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате изучения практики работы склада магазинов бытовой техники и электроники и автотранспортных средств, осуществляющих перевозку товара, была установлена неравномерность поступления товара по дням недели каждого месяца, которая приводит к возникновению расхождений в учетных данных, задержкам при выдаче заказов и, как следствие, к финансовым потерям и снижению лояльности потребителей. Для планирования работы транспортно-складских процессов была разработана математическая модель, позволяющая подбирать работников склада и автотранспортные средства по их выработке, обеспечивающей продажу товара каждый день. Совокупность математических уравнений для реализации разработанной целевой функции – максимум прибыли, определяет взаимосвязь выработки склада магазинов бытовой техники и электроники с выработкой автотранспортных средств, осуществляющих перевозку товара. В разработанной математической модели определено, что выработка всех работников и единиц подвижного состава обеспечивает выполнение необходимых операций для обработки товара, поступившего на склад по времени и их количеству. Направления дальнейших исследований для практической реализации математической модели – определения вероятностных параметров модели – выработка работников склада и автотранспортных средств, время на обработку заказа по группам.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Boysen N., René de Koster, Füßler D., The forgotten sons: Warehousing systems for brick-and-mortar retail chains. *European Journal of Operational Research*. 2021. Vol. 288, Is. 2. p. 361–381, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.04.058>.
2. Гузенко А.В., Гузенко Н.В. Диверсифицированный подход при организации мультиканальной продаж федеральной продовольственной сети // *Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ)*. 2022. № 3(79). С. 10–18. DOI: <https://doi.org/10.54220/v.rsue.1991-0533.2022.79.3.001>
3. Павлов К.В., Зенькова И.В., Никифоров С.А. Оценка эффективного использования логистических центров при транспортировке мясомолочной продукции из Витебской области Беларуси на зарубежные рынки // *Корпоративное управление и инновационное развитие экономики Севера: Вестник Научно-исследовательского центра корпоративного права, управления и венчурного инвестирования Сыктывкарского государственного университета*. 2022. Т. 2, № 4. С. 397–408. DOI: <https://doi.org/10.34130/2070-4992-2022-2-4-397>
4. Павлов К.В., Зенькова И.В., Никифоров С.А. Эффективное использование логистических центров при транспортировке мясомолочной продукции из Беларуси на зарубежные рынки // *Экономика и финансы (Узбекистан)*. 2023. № 3. С. 38–48. DOI: https://doi.org/10.34920/EIF/VOL_2023_ISSUE_3_6
5. Živičnjak M., Rogić K., Bajor I., Case-study analysis of warehouse process optimization, *Transportation Research Procedia*. 2022, Vol. 64. p. 215–223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.09.026>.
6. Burganova N., Grznar P., Gregor M., Mozol Š. Optimisation of Internal Logistics, *Transport Time Through Warehouse Management: Case Study, Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 55. p. 553–560. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.021>.
7. Santos O.M., Hernández-González J.C., Román-del-Valle M.A. Application of Simulation in the Management of the Operational Warehouse, *A Systematic Literature Review* Hernández, *Saudi Journal of Engineering and Technology Abbreviated Key Title: Saudi J Eng Technol*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.36348/sjet.2024.v09i10.003>.
8. Abideen A., Fazeeda B. M. Improving the performance of a Malaysian pharmaceutical warehouse supply chain by integrating value stream mapping and discrete event simulation. *Journal of Modelling in Management*. 2021: 70–102. DOI: <https://doi.org/10.1108/JM2-07-2019-0159>.
9. Moreno R.P.R., Lopes R.B., Ferreira J.V., Ramos A.L., Correia D.A Study of the Main Mathematical Models Used in Mobility, Storage, Pickup and Delivery in Urban Logistics, *A Systematic Review. Systems*. 2024. 12. 374. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems12090374>.
10. Муравьева Н.А. Подход к классификации технологических процессов в транспортно-складских логистических системах // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2013. Т. 2, № 2(71). С. 316–318.
11. Протопопов Н.Д. Оптимизационное решение для логистики автокомпонентов // *Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление*. 2021. № 2. С. 45–55. DOI: <https://doi.org/10.255>
12. Хоруженко Е.С., Мочалатин С.М. Планирование транспортно-складских затрат при организации поставок помашинными отправлениями // *Омский научный вестник*. 2015. № 3(139). С. 258–261.
13. Левина А.Б., Якунина Ю.С., Трофименко Е.Ю. Оценка уровня логистизации торговых предприятий. // *Вестник Волгоградского государственного университета. Экономика*. 2024. Т. 26, № 3. С. 134–148. DOI: <https://doi.org/10.15688/ek.jvolsu.2024.3.11>
14. Aravindaraj K., Rajan Chinna P. A systematic literature review of integration of industry 4.0 and warehouse management to achieve Sustainable

Development Goals (SDGs). *Cleaner Logistics and Supply Chain*. 2022. vol. 5, 100072. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100072>.

15. Leon J.F., Li Y., Martin X.A., Calvet L., Panadero J., Juan A.A. A Hybrid Simulation and Reinforcement Learning Algorithm for Enhancing Efficiency in Warehouse Operations. *Algorithms*. 2023. 16: 408. DOI: <https://doi.org/10.3390/a16090408>

16. Разумовский А.В., Сарамуд М.В., Пикалов Я.Ю. Алгоритмы управления матричным складом на базе унифицированных транспортно-складских ячеек // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2023. Т. 21, № 4. С. 54–70. DOI: <https://doi.org/10.25205/1818-7900-2023-21-4-54-70>

17. Zeng Y.Q., Li W.B., Li C.H., A dynamic simulation framework based on hybrid modeling paradigm for parallel scheduling systems in warehouses, *Simulation/Modelling Practice and Theory*. 2024. vol. 133. 102921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2024.102921>.

18. Трофимова Л.С. Методика текущего планирования работы автотранспортного предприятия при перевозке грузов в городе // Вестник СибАДИ. 2020. Т. 17, № 2(72). С. 234–247. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-234-247>

19. Трофимова Л.С., Певнев Н.Г. Структура методологии текущего планирования работы грузового автотранспортного предприятия // Вестник СибАДИ. 2017. № 6(58). С. 63–71.

REFERENCES

1. Boysen N., René de Koster, Füllner D., The forgotten sons: Warehousing systems for brick-and-mortar retail chains. *European Journal of Operational Research*. 2021; Vol. 288, Iss. 2: 361–381, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.04.058>.

2. Guzenko A.V., Guzenko N.V. Diversified approach to organizing multichannel sales of federal food chain. *Vestnik of Rostov state university of economics (RINH)*. 2022; 3(79): 10–18. DOI: <https://doi.org/10.54220/v.rsue.1991-0533.2022.79.3.001>. (in Russ.)

3. Pavlov K.V., Zenkova I.V., Nikiforov S.A. Evaluation of the effective use of logistics centers in the transportation of meat and dairy products from the Vitebsk region of Belarus to foreign markets. *Corporate Governance and Innovative Economic Development of the North: Bulletin of the Research Center of Corporate Law, Management and Venture Investment of Syktyvkar State University*. 2022; Vol. 2, issue 4: 397–408. DOI: <https://doi.org/10.34130/2070-4992-2022-2-4-397>. (in Russ.)

4. Pavlov K.V., Zenkova I.V., Nikiforov S.A. Effective use of logistics centers in transportation of meat and dairy products from of belarus to foreign markets. *Economy and Finance (Uzbekistan)*. 2023; 3: 38–48. DOI: https://doi.org/10.34920/EIF/VOL_2023_IS-SUE_3_6. (in Russ.)

5. Živičnjak M., Rogić K., Bajor I., Case-study analysis of warehouse process optimization. *Trans-*

portation Research Procedia. 2022; Vol. 64: 215–223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.09.026>.

6. Burganova N., Grznar P., Gregor M., Mozol Š. Optimisation of Internal Logistics. *Transport Time Through Warehouse Management: Case Study, Transportation Research Procedia*. 2021; Vol. 55: 553–560. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.021>.

7. Santos O.M., Hernández-González J.C., Román-del-Valle M.A. Application of Simulation in the Management of the Operational Warehouse, A Systematic Literature Review Hernández. *Saudi Journal of Engineering and Technology Abbreviated Key Title: Saudi J Eng Technol*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.36348/sjet.2024.v09i10.003>

8. Abideen A., Fazeeda B. M. Improving the performance of a Malaysian pharmaceutical warehouse supply chain by integrating value stream mapping and discrete event simulation. *Journal of Modelling in Management*, 2021: 70–102. DOI: <https://doi.org/10.1108/JM2-07-2019-0159>.

9. Moreno R.P.R., Lopes R.B., Ferreira J.V., Ramos A.L., Correia D.A Study of the Main Mathematical Models Used in Mobility. Storage, Pickup and Delivery in Urban Logistics. *A Systematic Review. Systems* 2024; 12: 374. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems12090374>

10. Murav'eva N.A. Approach to the classification of technological processes in transportation and warehousing logistics systems. *Vestnik of Saratov State Technical University*. 2013; 2, no 2(71): 316–318. (in Russ.)

11. Protopopov N.D. Optimization solution for automotive component logistics. *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhny'e sistemy: modeli, analiz i upravlenie*. 2021; 2: 45–55. DOI 10.255. (in Russ.)

12. Xoruzhenko E.S., Mochalin S.M. Planning of transport and warehouse costs when organizing deliveries by machine shipments. *Omsk Scientific Bulletin*. 2015; 3(139): 258–261. (in Russ.)

13. Levina A.B., Yakunina Yu.S., Trofimenko E.Yu. Assessment of the Level of Logistisation of Trade Enterprises. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika. Journal of Volgograd State University. Economics*. 2024; vol. 26, no. 3: 134–148. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15688/ek.jvolsu.2024.3.11>

14. Aravindaraj K., Rajan Chinna P. A systematic literature review of integration of industry 4.0 and warehouse management to achieve Sustainable Development Goals (SDGs). *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 2022; vol. 5: 100072. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100072>.

15. Leon J.F., Li Y., Martin X.A., Calvet L., Panadero J., Juan A.A. A Hybrid Simulation and Reinforcement Learning Algorithm for Enhancing Efficiency in Warehouse Operations. *Algorithms*. 2023; 16: 408. <https://doi.org/10.3390/a16090408>.

16. Razumovsky A.V., Saramud M.V., Pikalov Y.Y. The algorithms for managing a matrix-based warehouse utilizing standardized transport and storage

cells. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. 2023; vol. 21, no. 4: 54–70. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25205/1818-7900-2023-21-4-54-70>

17. Zeng Y.Q., Li W.B., Li C.H. A dynamic simulation framework based on hybrid modeling paradigm for parallel scheduling systems in warehouses. *Simulation. Modelling Practice and Theory*. 2024; vol. 133: 102921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2024.102921>.

18. Trofimova L.S. The methodology of the current planning of a motor transport enterprise operation for the transportation of goods in the city. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(2): 234–247. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-234-247>

19. Trofimova L.S., Pevnev N.G. Struktura metodologii tekushhego planirovaniya raboty` gruzovogo avtotransportnogo predpriyatiya. *Vestnik SibADI*. 2017; 6(58): 63–71. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Трофимова Л.С. Формирование математических уравнений для реализации разработанной целевой функции, определяющей взаимосвязь выработки склада магазинов бытовой техники и электроники с выработкой автотранспортных средств, осуществляющих перевозку товара; определение направлений дальнейших исследований для практической реализации математической модели (50%).

Социховский В.С. Результаты изучения практики работы склада магазинов бытовой техники и электроники и автотранспортных средств, осуществляющих перевозку товара; определение элементов транспортно-складских процессов для математического описания плановых показателей (50%).

CONTRIBUTIONS CO-AUTHORS

L.S. Trofimova Formation of mathematical equations for the implementation of the developed target function that determines the relationship between the output of a warehouse of household appliances and electronics stores and the output of vehicles transport-

ing goods; determination of areas for further research for the practical implementation of the mathematical model (50%).

V.S. Sotsikhovsky Results of a study of the practice of operating a warehouse of household appliances and electronics stores and vehicles transporting goods; determination of elements of transport and warehouse processes for the mathematical description of planned indicators (50%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Трофимова Людмила Семеновна – д-р техн. наук, доц., заведующая кафедрой «Организация перевозок и безопасность движения» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7312-1557>,

SPIN-код: 6711-9953,

e-mail: trofimova_ls@mail.ru

Социховский Владислав Сергеевич – магистрант, направление 23.04.01 «Технология транспортных процессов» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9657-5735>

e-mail: Sotsikhovskiy@mail.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Liudmila S. Trofimova – Dr. of Sci (Eng.), Head of the Organization Transportation and Traffic Safety Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5 Prospekt Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7312-1557>,

SPIN-код: 6711-9953,

e-mail: trofimova_ls@mail.ru

Vladislav S. Sotsikhovskiy – postgraduate student, Transportation Process Management program, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5 Prospekt Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9657-5735>

e-mail: Sotsikhovskiy@mail.ru

Научная статья
УДК 656.029
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-630-642>
EDN: VPBWNH



ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ РЕЗЕРВНОГО ПАРКА АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

А.И. Фадеев ✉, **А.М. Ильянков**
Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Россия
✉ ответственный автор
9135335784@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Сбалансированное (устойчивое) развитие автомобильного транспорта, скоординированное с другими элементами городской инфраструктуры, соответствие транспортного спроса и предложения, формирование и реализация эффективных стратегий развития автомобильного транспорта общего пользования является важнейшей современной проблемой. В рамках данного направления одной из актуальных нерешенных до настоящего времени задач является определение численности резерва парка подвижного состава для надежного транспортного обслуживания. На практике дефицит подвижного состава зачастую является причиной низкой согласованности логистического процесса, сбоев в работе автоперевозчиков, штрафов за невыполнение договорных обязательств перед заказчиком и за нарушения законодательства.

Материалы и методы. Для обеспечения необходимой надежности транспортной системы необходимо определить требуемый уровень резерва подвижного состава. В настоящей работе представлена методика решения данной задачи, основанная на аппарате теории вероятностей и математической статистики.

Методика позволяет рассчитать размер страхового запаса подвижного состава, обеспечивающий заданную надежность транспортной системы, которая устанавливается с учетом факторов, обусловленных конкретными условиями перевозочного процесса.

Обсуждение и заключение. Практическая эффективность предложенной методики показана на примере решения задачи для условий реальной транспортной организации. Методика прошла успешную апробацию и в настоящее время применяется на практике.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: парк подвижного состава, резерв подвижного состава, техническая готовность транспортных средств, надежность транспортной системы

Статья поступила в редакцию 28.04.2025; одобрена после рецензирования 21.07.2025; принята к публикации 22.08.2025.

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: Фадеев А.И., Ильянков А.М. Определение размеров резервного парка автотранспортных средств // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, №4. С. 630-642. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-630-642>

© Фадеев А.И., Ильянков А.М., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-630-642>

EDN: VPBWHB

DETERMINING THE SIZE OF THE MOTOR VEHICLE RESERVE FLEET

Alexander I. Fadeev ✉, Alexey M. Ilyankov

Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russia

✉ corresponding author
9135335784@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The balanced (sustainable) development of road transport, coordinated with other elements of urban infrastructure, the correspondence of transport demand and supply, the formation and implementation of effective strategies for the development of public road transport is the most important modern problem. Within the framework of this direction, one of the urgent unsolved tasks so far is to determine the number of reserve fleet of the rolling stock for reliable transport services. In practice, the shortage of rolling stock is often the reason for the low coordination of the logistics process, disruptions in the work of road carriers, fines for non-performance of the contractual obligations to the customer and for violations of the law.

Materials and methods. To ensure the necessary reliability of the transport system, it is necessary to determine the required level of rolling stock reserve. The work presents a method for solving the stated problem, based on the apparatus of the theory of probability and mathematical statistics.

The methodology allows calculating the safety size of the rolling stock reserve, which ensures the specified reliability of the transport system, which is established taking into account factors determined by the specific conditions of the transportation process.

Discussion and conclusion. The practical effectiveness of the proposed method is shown by the example of solving the problem for the conditions of a real transport organization. The technique has been successfully tested and is currently being applied in practice.

KEYWORDS: rolling stock fleet, rolling stock reserve, vehicles' technical operational serviceability, reliability of the transport system

The article was submitted: April 28, 2025; **approved after reviewing:** July 21, 2025; **accepted for publication:** August 22, 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. Fadeev A.I., Ilyankov A.I.M. Determining the size of the motor vehicle reserve fleet. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (4): 630-642. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-630-642>

© Fadeev A.I., Ilyankov A.I.M., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Для экономики и общества автомобильный транспорт имеет важнейшее значение – он обеспечивает перевозки грузов и мобильность населения. Сбалансированное развитие автомобильного транспорта, скоординированное с другими элементами транспортной системы, соответствие транспортного спроса и предложения, формирование и реализация эффективных стратегий развития автомобильного транспорта общего пользования является важнейшей современной проблемой¹. Одна из актуальных задач решения данной проблемы – обеспечение надежности транспортных систем и процессов.

В настоящее время во многих работах рассматривается задача формирования парка подвижного состава в соответствии с имеющимся транспортным спросом [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Предлагаемые методики позволяют рассчитать число транспортных средств, непосредственно осуществляющих перевозки пассажиров или грузов. При этом вопрос резервирования парка для обеспечения необходимого уровня надежности транспортного процесса, как правило, не рассматривается.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Постановка задачи. Обеспечение согласованного с заказчиком уровня надежности и эффективности автотранспортной системы является актуальной задачей, для решения которой применяются структурные, ресурсные и функциональные резервы [7, 8]. Однако в настоящее время на практике эффективные методы нормирования надежности автотранспортных услуг не используются [7]. В результате зачастую это вызывает низкую согласованность во взаимодействии участников процесса доставки, сбои в работе автоперевозчиков, штрафы за невыполнение договорных обязательств перед заказчиком и за нарушения законодательства [7].

В данной работе рассматривается один из важнейших параметров надежности транспортной системы – уровень технической готовности парка, обеспечение требуемого числа транспортных средств на линии.

Техническая готовность парка зависит от уровня организации технического обслуживания и ремонта, т.е. эффективность техниче-

ской эксплуатации подвижного состава [9, 10]. В статье [10] оценивается влияние политики мониторинга технического обслуживания на стоимость жизненного цикла автобуса, времени замены и размер резервного парка.

Распространены исследования [11, 12] организации и планирования технического обслуживания на основе анализа моторного масла с целью определения необходимости его замены, что определяет уровень затрат на техническое обслуживание в течение срока службы автобуса. Рассматриваются экономические подходы к решению задачи замены автобусов на основе глобальной модели с учетом технической готовности парка и затрат на техническое обслуживание. Эти факторы помогают определить размер резервного парка и гарантировать его техническую готовность.

Как известно [13], требуемый уровень надежности автотранспортной системы обусловливается текущим состоянием парка, характеристиками его использования, а также параметрами спроса на транспортные услуги.

Оценку удовлетворенности потребителей грузовых автотранспортных услуг в работе [14] предлагается осуществлять посредством контент-анализа отзывов на интернет-ресурсах, что считается актуальной задачей для стимулирования спроса на грузовые автомобильные перевозки.

В работе [15] предложен подход компенсации недостаточного резерва парка, заключающийся в формировании нового расписания перевозок при возникновении серьезных сбоев в транспортном процессе. Разработанный алгоритм обеспечивает минимум отклонений от первоначального плана.

Одним из основных направлений повышения надежности автотранспортной системы считается формирование резервов автопарка [7].

В работе [16] предложена интегрированная модель оценки резервного парка, основанная на модели экономического жизненного цикла подвижного состава.

При решении задачи определения необходимого резерва парка транспортных средств (легковых автомобилей, автомашин и т.д.) в качестве критерия оптимальности применяются разные показатели: упущенная выгода от перевозок [17], транспортные расходы [15], сумма затрат оператора и расходов заказчика

¹ Вукан Р. Вучик. Транспорт в городах, удобных для жизни. Transportation for Livable Cities. Территория будущего, 2011. 576 с.

[18] и др. В статье [17] приведена математическая модель, которая позволяет определить величину упущенной выгоды от перевозок из-за нехватки транспортных средств с определенными технологическими, эксплуатационными и экономическими параметрами подвижного состава.

В работе [18] дана оптимизированная модель резервирования автопарка в транспортных системах, чтобы обеспечить ее надежность и минимизировать общую стоимость функционирования. Математическая модель парка подвижного состава сформирована с применением аппарата системы массового обслуживания, в которой описывается пуассоновский поток отказов транспортных средств и процесс их восстановления технической службой перевозчика с n каналами обслуживания. В данном случае в модели не учитываются плановые технические обслуживания, которые не являются отказами, а также необходимость учета типов неисправностей и специализации каналов обслуживания (например, ремонт системы питания, электрооборудования и т.д.).

Автобусы из резервного парка общественного транспорта используются для замены транспортных средств, проходящих плановое техническое обслуживание или текущий ремонт [9]. Они также могут быть задействованы в чрезвычайных ситуациях, таких как аварии или неожиданные поломки. Определить размер резервного парка сложно. В национальных и международных автотранспортных компаниях существует широкий диапазон рекомендаций по удельному весу резервного парка к общему. Например, в США определено это соотношение на уровне 20%². Очевидно, что в данном случае резерв устанавливается с большим запасом на основе предыдущего опыта. Такой подход влечет существенные затраты.

В работе [19] повышение эффективности доставки предлагается за счет резервирования транспортных мощностей парка грузового транспорта в логистических розничных сетях. В качестве критерия эффективности применяется минимум логистических затрат, в которых учитывается стоимость доставки и потери от неполной поставки товара в розничную сеть. Данная модель разработана для частного случая конкретного вида логистических систем, что ограничивает ее применение.

Размер среднегодовой стоимости эксплуатации автобуса за весь срок службы с учетом резервного числа транспортных средств может служить фактором, посредством которого определяется время эксплуатации дизельных автобусов, работающих на городских маршрутах [12].

Уровень технической готовности подвижного состава в зарубежных источниках оценивается следующим образом [9]:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}, \quad (1)$$

где MTBF – среднее время наработки на отказ;
MTTR – среднее время ремонта.

В России на автомобильном транспорте для оценки качества работы подвижного состава используются показатели эффективности технической эксплуатации. В современных источниках [8, 20, 21] для оценки потребного резерва подвижного состава применяется коэффициент технической готовности, который рассчитывается для парка за день или заданный период, а также для автомобиля за определенный число дней эксплуатации.

Доля рабочего времени, в течение которого автомобиль исправен (готов к эксплуатации) и может быть использован в транспортном процессе:

$$\alpha_m = \frac{D_{\text{эз}}}{D_u}, \quad (2)$$

где $D_{\text{эз}}$ – количество дней в расчетном периоде, когда автомобиль был готов к эксплуатации (исправен);

D_u – число инвентарных дней, т.е. дней нахождения автотранспортного средства в организации.

Для парка за день:

$$\alpha_m = \frac{A_{\text{эз}}}{A_u}, \quad (3)$$

где $A_{\text{эз}}$ – число транспортных средств, готовых к эксплуатации;

A_u – общее (инвентарное) число автомобилей в парке.

Для учета парка применяется единица измерения «автомобиле-день»³, т.е. коэффициент технической готовности парка автомобилей за определенный период времени:

² Circular C 1A 1987 9030, Appendix A, of the FTA (Federal Transit Administration, USA).

³ ОК 015-94 (МК 002-97). Общероссийский классификатор единиц измерения (утв. Постановлением Госстандарта России от 26.12.1994 N 366) (ред. от 02.09.2024).

$$\alpha_m = \frac{AD_{\text{эз}}}{AD_u}, \quad (4)$$

где $AD_{\text{эз}}$ – количество автомобиле-дней парка, готовых к эксплуатации;

AD_u – число инвентарных автомобиле-дней парка.

В некоторых работах размер резервного парка определяется на основе среднего времени нахождения транспортных средств в ремонте за определенный период. В работе [9] рассматривается влияние на техническую готовность парка разных факторов системы технической эксплуатации, например, интервала замены масла в двигателе. Получено в [12], что число резервного подвижного состава от среднего времени ремонта транспортных средств имеет линейную зависимость (рисунок 1).

В [16] предлагается аналогичный подход, для расчета размера резервного парка предлагается

$$FR = \frac{m \times MTTR}{k}, \quad (5)$$

где m – численность парка;

MTTR – среднее время нахождения автомобиля в ремонте в расчетном периоде, дни;

k – количество дней расчетного периода.

Основной недостаток данного подхода – рассчитывается средний резерв без случайных факторов.

Размер парка можно рассчитывать с использованием приближения из теории запасов, в которой учитываются существующие неопределенности [20]. Например, применение данного подхода по сравнению с существующей практикой управления парком железнодорожных вагонов позволило сократить страховой запас на 120 вагонов и, таким образом, снизить прямые затраты на 8%, а также дополнительно сократить косвенные расходы.

В данном случае используются методы теории запасов, учитывающие случайные факторы, однако методика определения оптимальной структуры и размера парка железнодорожных вагонов на химическом предприятии в условиях неопределенности спроса и времени в пути не соответствует условиям автомобильного транспорта.

Таким образом, для обеспечения требуемой надежности транспортной системы необходимо определить требуемый уровень резерва подвижного состава. Как упоминалось выше, аналогичная задача решается при определении страхового запаса материальных ресурсов [22, 24]. Размер страхового запаса в этом случае рассчитывается с использованием инструментария теории вероятностей [22, 23, 24, 25]. Реальные логистические процессы носят стохастический характер, уровень резервов, обеспечивающий требуемую надежность логистического процесса, обуславливается статистическими параметрами соответствующих случайных величин [24].

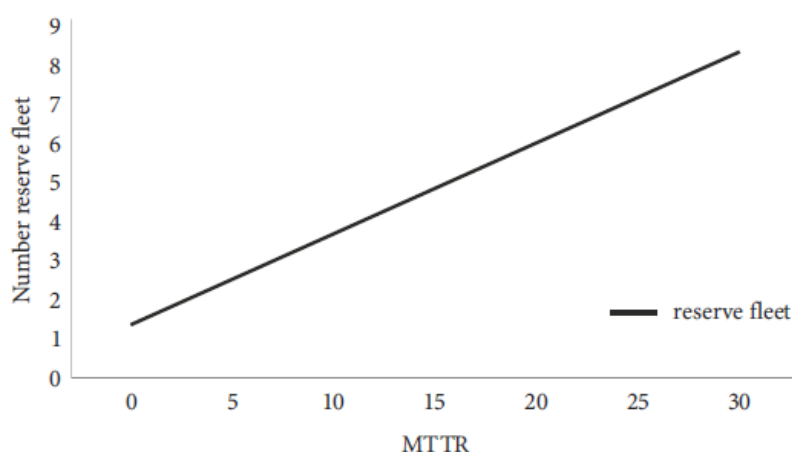


Рисунок 1 – Зависимость числа резервного подвижного состава (Number reserve fleet) от среднего времени ремонта (MTTR), ч [12]

Figure 1 – Dependence of the Number of Reserve Fleet on the Mean Time to Repair (MTTR), hour [12]

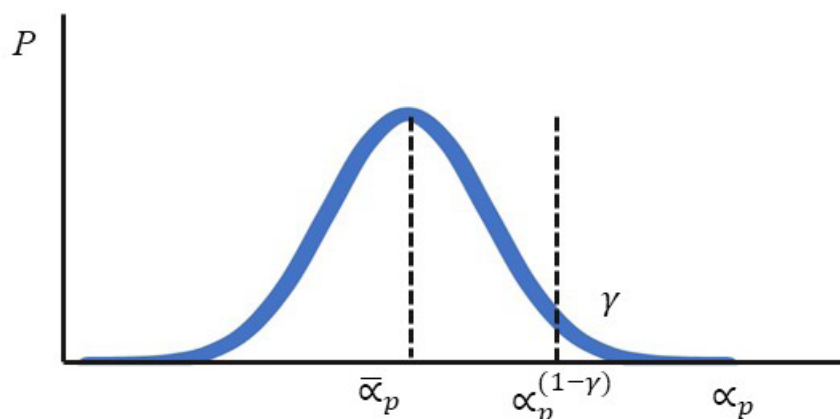


Рисунок 2 – Примерный график плотности вероятности числа транспортных средств, находящихся в ремонте; где $\bar{\alpha}_p$ – математическое ожидание; $\alpha_p^{(1-\gamma)}$ – относительное число автомобилей резервного парка при уровне значимости γ
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Approximate probability density plot of the number of vehicles, under repair; where: $\bar{\alpha}_p$ – mathematical expectation; $\alpha_p^{(1-\gamma)}$ – relative number reserve fleet vehicles at the level of significance γ
Source: compiled by the authors.

Решение задачи. Размер резервного парка должен компенсировать число транспортных средств, находящихся в техническом обслуживании и текущем ремонте. Определим относительное число таких автомобилей за i -й день следующим образом:

$$\alpha_{pi} = \frac{A_{pi}\bar{A}_u}{\bar{A}_3 A_{ui}}, \quad (6)$$

где A_{pi} – число автомобилей в ремонте и техническом обслуживании в i -й день;

$\bar{A}_u, \bar{A}_3$ – среднее число автомобилей в парке и в эксплуатации соответственно;

A_{ui} – число автомобилей в парке в i -й день.

Через отношение $\bar{A}_u/A_{ui}$ учитывается динамика численности парка в периоде обследования.

Примерный график плотности вероятности α_p , приведенный на рисунке 2, иллюстрирует решение задачи резервирования парка транспортных средств. Резервная численность парка определяется через $\alpha_p^{(1-\gamma)}$. Для расчета резерва парка необходимо выбрать критическое значение уровня значимости γ , т.е. допускаемую заказчиком перевозок вероятность отказа в обслуживании, когда не обеспечивается выпуск на линию заданного числа транспортных средств. $1-\gamma$ – это уровень надежности обслуживания.

Критические значения вероятностей выбираются с учетом особенностей соответствующего вида перевозок. При решении данной задачи можно исходить из условия равенства расходов на резервный парк упущенной выгоде, прямых

убытков [15], суммы убытков оператора и заказчика [18] и др. В [17] для расчета упущенной выгоды из-за нехватки транспортных средств приведена математическая модель.

В статистике наиболее часто используются следующие значения уровня значимости: 0,1; 0,05 или 0,01.

Допустим, что требуется обеспечить выпуск на линию $A_3^{(1-\gamma)}$ автомобилей. Необходимый резерв транспортных средств рассчитывается:

$$A_p^{(1-\gamma)} = A_3^{(1-\gamma)} \alpha_p^{(1-\gamma)}. \quad (7)$$

$$A_u \geq A_3^{(1-\gamma)} + A_p^{(1-\gamma)}. \quad (8)$$

Для определения страхового запаса материальных запасов [22, 24] исходят из предположения о нормальном законе распределения расходования запаса. При этом для оценки стандартного отклонения применяется коэффициент вариации, который рассчитывается по ограниченной выборке.

Применение данного подхода для определения резерва подвижного состава показало недопустимые отклонения получаемых результатов от практических (экспериментальных) данных. Очевидно, что число транспортных средств в техническом обслуживании и ремонте не подчиняется нормальному закону распределения, что подтверждается примерами выборок, приведенных на рисунке 3.

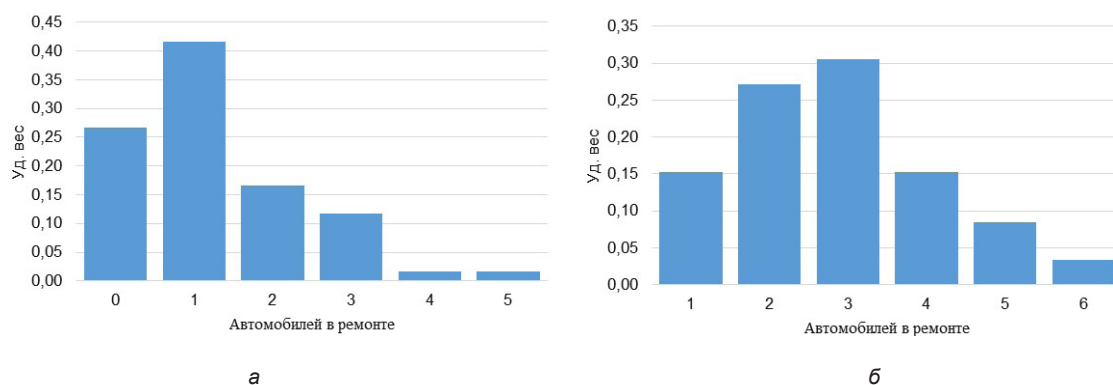


Рисунок 3 – Примеры выборок числа автомобилей, находящихся в ремонте: а – выборка 1; б – выборка 2
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Examples of samples of the number of cars under repair
Source: compiled by the authors.

Таким образом, требуется определить теоретическое распределение рассматриваемых данных. Подбор теоретического распределения состоит из следующих шагов⁴:

- построение гистограммы, формирование гипотезы о распределении;
- расчет теоретических частот путем умножения теоретической функции распределения на число наблюдений;
- сравнение полученных результатов с соответствующими данными из гистограммы.

При сравнении наблюдаемых и теоретических частот если расхождения слишком большие, то отклоняется гипотеза о том, что совокупность, из которой получена рассматриваемая выборка, описывается принятым теоретическим распределением. Иначе можно сделать вывод, что принятое распределение с достаточной точностью описывает генеральную совокупность.

Формальная проверка гипотезы осуществляется по критериям согласия (соответствия экспериментальных данных выбранному теоретическому распределению). Наибольшее распространение получила процедура, основанная на критерии согласия К. Пирсона.⁵

Имеется выборка относительного числа транспортных средств, находящихся в техни-

ческом обслуживании и ремонте за каждый i -й день периода обследования α_{pi} , полученная из реальной транспортной организации. Результаты обработки рассматриваемой выборки приведены в таблице 1. Гистограммы распределения числа автомобилей в ремонте (рисунки 3, 4) позволяют предположить, что рассматриваемый процесс подчиняется гамма-распределению⁶:

$$P(x) = f(x|a, b) = \frac{x^{a-1} e^{-\frac{x}{b}}}{b^a \Gamma(a)}, x > 0, \quad (9)$$

где $\Gamma(a+1)$ – гамма-функция;

a, b – параметр формы и масштаба соответственно.

При использовании критерия Пирсона для расчета критерия χ^2 рекомендуется объединять соседние группы, если $n < 5$.

Из таблицы 1 видно, что расчетные значения критерия χ^2 не превышают критической величины (6,251 при уровне значимости 0,1), т.е. гипотеза о соответствии рассматриваемого случайного процесса гамма-распределению принимается. Для рассматриваемых данных минимальный объем выборки при доверительном уровне 95% и ошибке среднего 5% составляет 21 единицу⁷.

⁴ Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы обработки данных. Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 611 с.

⁵ Ивановский Р.И. Теория вероятностей и математическая статистика. Основы, прикладные аспекты с примерами и задачами в среде Mathcad. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 528 с.

⁶ Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы обработки данных. Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 611 с.

⁷ Левин [и др.] Статистика для менеджеров с использованием Microsoft Excel, 4-е изд. М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. С. 471–476.

Таблица 1

Обработка экспериментальных данных относительного числа транспортных средств в техническом обслуживании и ремонте
Источник: составлено авторами.

Table 1

Processing of experimental data on the relative number of vehicles undergoing maintenance and repair
Source: compiled by the authors.

№ п/п	x_i	f_i	$P_i = \frac{f_i}{n}$	$x_i P_i$	$\frac{f_i(x_i - \bar{x})^2}{n-1}$	P'_i	f'_i	χ^2
1	0,05	3	0,10	0,005	0,00089	0,065	1,9	1,32
2	0,10	10	0,34	0,034	0,00018	0,262	7,6	
3	0,15	9	0,31	0,047	0,00001	0,287	8,3	1,00
4	0,20	4	0,14	0,028	0,00037	0,196	5,7	
5	0,25	2	0,07	0,017	0,00126	0,106	3,1	
6	0,30	1	0,03	0,010	0,00270	0,050	1,4	
Сумма		29	1			Критерий Пирсона		2,38
Среднее значение				0,141	0,00541	Дисперсия		
Среднеквадратическое отклонение (σ)					0,07358			
Параметр формы (a)				3,69183	0,03830	Параметр масштаба (b)		

Примечание: x_i – середина интервала; f_i, f'_i – частота экспериментальная и теоретическая соответственно; P_i, P'_i – вероятность экспериментальная и теоретическая.

Определение относительного числа транспортных средств резервного парка $\alpha_p^{(1-\gamma)}$ можно осуществить посредством функций электронный таблицы или программы статистической обработки данных. В электронной таблице Excel имеется следующая функция для расчета $\alpha_p^{(1-\gamma)}$:

$$\alpha_p^{(1-\gamma)} = \text{ГАММА.ОБР}(1-\gamma; a; b). \quad (10)$$

Например, для упомянутых выше уровней

значимости: 0,1; 0,05 или 0,01 на основании данных таблицы 1 относительное число резервных транспортных средств составит 0,37, 0,28 и 0,24 соответственно. Таким образом, при плановом выпуске на линию 20 единиц резерв транспортных средств составит 6,4, 5,1 и 4,4 единицы. Число транспортных средств резерва округляется, далее рассчитываются полученные вероятности отказа в обслуживании:

$$(1 - \gamma) = \text{ГАММА.РАСП}(\lfloor A_p^{(1-\gamma)} \rfloor / A_u; a; b; \text{истина}), \quad (11)$$

где $A_p^{(1-\gamma)}$ – принятое целое число транспортных средств резерва.

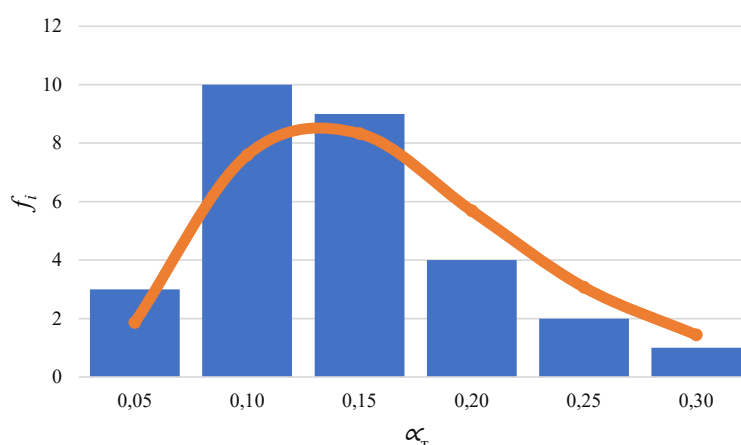


Рисунок 4 – График плотности вероятности теоретической и гистограмма распределения относительного числа транспортных средств в техническом обслуживании и ремонте
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Density plot of theoretical probability and histogram of the distribution of the relative number of vehicles undergoing maintenance and repair
Source: compiled by the authors.

Таблица 2

**Пример расчета статистических параметров числа транспортных средств
в техническом обслуживании и ремонте**
Источник: составлено авторами.

Table 2

Calculation example of statistical parameters of the vehicles' number undergoing maintenance and repair
Source: compiled by the authors.

№ п/п	A_{ui}	A_{zi}	A_{pi}	$\alpha_{pi} = \frac{A_{pi} \bar{A}_u}{\bar{A}_z A_{ui}}$	$(\alpha_{pi} - \bar{\alpha}_p)^2$
1	26	21	4	0,192	0,00024
2	26	21	3	0,144	0,00106
3	26	21	3	0,144	0,00106
4	26	21	2	0,096	0,00648
5	26	21	2	0,096	0,00648
6	26	21	3	0,144	0,00106
7	26	21	3	0,144	0,00106
8	26	20	6	0,288	0,01242
9	26	21	3	0,144	0,00106
10	26	21	5	0,240	0,00403
11	26	21	2	0,096	0,00648
12	26	21	4	0,192	0,00024
13	26	21	2	0,096	0,00648
14	26	21	1	0,048	0,01651
15	26	20	6	0,288	0,01242
16	26	21	5	0,240	0,00403
17	26	21	4	0,192	0,00024
18	26	21	3	0,144	0,00106
19	26	21	5	0,240	0,00403
20	26	21	4	0,192	0,00024
21	26	20	6	0,288	0,01242
22	26	21	2	0,096	0,00648
23	26	21	2	0,096	0,00648
24	26	21	3	0,144	0,00106
25	26	21	5	0,240	0,00403
26	26	21	3	0,144	0,00106
27	26	21	2	0,096	0,00648
28	26	21	4	0,192	0,00024
29	26	21	5	0,240	0,00403
30	26	20	6	0,288	0,01242
31	26	20	6	0,288	0,01242
Среднее	26	20,8	3,7	0,176	
Дисперсия (S^2)					0,00513
Среднеквадратическое отклонение (σ)					0,07159
Параметр формы гамма-распределения (a)					6,076
Параметр масштаба гамма-распределения (b)					0,029
Выпуск на линию план (A_z), ед.					21
Автомобилей в парке фактически (A_u), ед.					26
Надежность транспортной системы фактическая					0,82
Коэффициент технической готовности					0,86
Коэффициент выпуска					0,80

Таблица 3
Результаты расчета резервного числа парка подвижного состава
Источник: составлено авторами.

Table 3
Calculation results of the reserve number of rolling stock fleet
Source: compiled by the authors.

Параметр	Уровень значимости		
	0,01	0,05	0,100
Надежность транспортной системы заданная	0,99	0,95	0,90
Относительное число автомобилей в резерве (α_p)	0,384	0,308	0,272
Выпуск на линию (A_3), ед.	21		
Резерв подвижного состава расчетный, ед.	8,1	6,5	5,7
Резерв подвижного состава принято, ед.	8	7	6
Потребное число автомобилей в парке, ед.	29	28	27
Резерв подвижного состава в парке, %	28	25	22
Надежность транспортной системы проектная	0,99	0,96	0,91
Коэффициент технической готовности парка	0,87	0,87	0,86
Коэффициент выпуска	0,72	0,75	0,78

Практическая реализация. Рассчитаем резервный парк подвижного состава реальной транспортной организации. В таблице 2 приведена статистика по количеству транспортных средств в ремонте и обслуживании, на основании которой определены параметры закона распределения данного случайного процесса. По имеющемуся резерву подвижного состава 5 единиц (разница между автомобилями в парке и выпуском на линию) рассчитана текущая надежность транспортной системы, которая равна 0,82.

Коэффициент технической готовности парка составляет 0,86, а коэффициент выпуска 0,8.

Результаты расчетов резервного числа транспортных средств для трех значений уровня значимости (вариантов надежности транспортного обслуживания) приведены в таблице 3. По заданному выпуску на линию 21 единицы транспортных средств определен требуемый резерв парка. Получено: чтобы обеспечить выпуск на линию подвижного состава с вероятностью 0,99 необходим парк из 29 единиц, 0,96 – 28 единиц и 0,93 – 27 единиц. При этом число подвижного состава в резерве составит 8, 7 и 6 единиц соответственно. Коэффициент технической готовности при этом несколько увеличится за счет резерва, а коэффициент выпуска в свою очередь уменьшится.

Разработанная методика также позволяет рассчитать уровень надежности обслуживания для различного числа автомобилей в парке и таким образом определить условия перевозок,

которые гарантируют отсутствие претензий со стороны клиентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В настоящее время в работах, посвященных решению задачи определения оптимальной структуры подвижного состава в соответствии с имеющимся транспортным спросом, не рассматривается актуальный вопрос резервирования парка для обеспечения необходимого уровня надежности транспортного процесса.

2. На практике методы нормирования надежности автотранспортных услуг не применяются, резервирование парка осуществляется экспериментальным путем.

В результате зачастую это обуславливает недостаточную надежность логистической системы, низкую согласованность во взаимодействии участников процесса доставки, сбой в работе автоперевозчиков, штрафы за невыполнение договорных обязательств перед заказчиком и за нарушения законодательства.

3. В настоящей работе представлена методика определения величины резерва транспортных средств, основанная на аппарате теории вероятностей и математической статистики.

Методика позволяет определить размер страхового запаса, обеспечивающий заданную надежность транспортной системы, которая может быть установлена с учетом особенностей соответствующего вида перевозок, а также на основе возможных убытков из-за

дефицита провозных возможностей и затрат, связанных с резервом транспортных средств и других факторов, связанных с конкретными условиями перевозочного процесса.

4. В результате обработки экспериментальных данных получено, что число транспортных средств, находящихся в техническом обслуживании и текущем ремонте, может быть описано статистической функцией гамма-распределения.

5. Практическая эффективность предложенной методики показана на примере приведенного решения задачи по данным реальной транспортной организации.

Направления дальнейших исследований

Разработка рекомендаций по определению критических значений вероятностей с учетом особенностей соответствующего вида перевозок, возможных убытков из-за дефицита провозных возможностей и затрат, связанных с резервом транспортных средств и других факторов, обусловленных конкретными условиями перевозочного процесса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фадеев А.И., Фомин Е.В. Определение оптимальной структуры парка подвижного состава городского пассажирского транспорта общего пользования с учетом взаимного влияния маршрутов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. № 8 (139). С. 189–198.
2. Оптимизация численности автотранспортных средств, обслуживающих регулярные маршруты городских агломераций: монография / Д.А. Дрючин, Т.В. Коновалова, Е.А. Лебедев, С.Л. Надирян, В.И. Рассоха; ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»; ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет». Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2024. 178 с.
3. Захаров Н.С., Ракитин В.А. Методика формирования парка грузовых автомобилей автотранспортного предприятия в зависимости от назначения и технико-эксплуатационных показателей транспортных средств // Инженерный вестник Дона. 2015. № 3. С. 174–188.
4. Козин Е.С., Захаров Н.С., Панфилов А.А., Вохмин Д.М. Системы поддержки принятия решений на транспорте. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2023. 170 с. ISBN 978-5-9961-3106-8. EDN BZSJIL.
5. Рассоха В.И., Дрючин Д.А., Надирян С.Л. Оптимизация структуры парка безрельсовых транспортных средств, обслуживающих городские пассажирские маршруты, на основе результатов математического моделирования // International Journal of Advanced Studies. 2023. Том 13, № 3. С. 180–202. DOI: <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-3-180-202>
6. Ракитин В.А. Анализ методик формирования рациональной структуры парка грузовых автомобилей // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 149. EDN VIDVEN.
7. Курганов В.М., Грязнов М.В. Как повысить КТГ автопарка // Мир транспорта. 2011. № 3. С. 106–117.
8. Kurganov V.M., Gryaznov M.V., Kolobanov S.V. Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes // Journal of Mining Institute. 2020. Vol. 241. P. 10–21. DOI: <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.1.10>. EDN EUEOIJ.
9. Кирюшин И.Н., Ретюньских В.Н. К вопросу изучения связи коэффициента технической готовности автомобилей с эксплуатационным циклом // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2019. № 2(42). С. 112–116.
10. Raposo Hugo & Farinha, José & Ferreira, L.A.A. & Galar, Diego. (2018). Dimensioning reserve bus fleet using life cycle cost models and condition based/predictive maintenance: a case study. Public Transport. 10. 10.1007/s12469-017-0167-x.
11. Raposo Hugo & Farinha, José & Ferreira, Luis & Galar, Diego. (2019). RESERVE FLEET INDEXED TO EXOGENOUS COST VARIABLES. Transport. 34. 437–454. 10.3846/transport.2019.11079.
12. Raposo H. Farinha J. T. Ferreira L. and Galar D. An integrated econometric model for bus replacement and determination of reserve fleet size based on predictivemaintenance, Eksploatacja i Niezawodnoś'c, vol. 19, no. 3. pp. 358–368, 2017.
13. Иванов А.Ю., Панов С.А. Модели резервирования подвижного состава в транспортно-логистических системах // Экономика и математические методы. 2013. Т. 49. Выпуск № 2 С. 87–96.
14. Дорофеев А.Н., Курганов В.М., Король А.А. [и др.] Оценка надежности автомобильного перевозчика в цифровой транспортной платформе // Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 2-2(85). С. 115–122. DOI 10.33979/2073-7432-2024-2-2(85)-115-122. EDN IZUSNX.
15. Guedes P. C. and Borenstein D. “Real-time multi-depot vehicle type rescheduling problem,” Transportation Research Part B: Methodological. 2018. vol. 108. pp. 217–234.
16. Raposo Hugo & Farinha, José & de Almeida-e-Pais, J. Edmundo & Galar, Diego. An Integrated Model for Dimensioning the Reserve Fleet based on the Maintenance Policy. Wseas transactions on systems and control. 2021. 16. 43-65. 10.37394/23203.2021.16.3.
17. Myronenko V, Samsonkin V, Rudkovskiy S. Mathematical Model of Rationale for Reserve Fleet of Vehicles with Uneven Demand for Transportation // American Journal of Engineering Research (AJER). 2018. Volume-5, Issue-5, 2018, pp 238–244.
18. Hou Bowen & Zhao, Shuzhi & Liu, Huasheng & Li, Jin. Optimization Model for Reserve Fleet Sizes in Traditional Transit Systems considering the Risk of Vehicle Breakdowns. Mathematical Problems in Engineering. 2018. 1–10. 10.1155/2018/1609238.

19. Kovtsur E. (2014). Reservation of transporting capacities of freight transport fleet due to the quantitative increase of fleet freight capacity. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 5. 29. 10.15587/1729-4061.2014.27630.

20. Klosterhalfen, Steffen & Kallrath, Josef & Fischer, Gerd. Rail car fleet design: Optimization of structure and size. *International Journal of Production Economics*. 2013. 157. 10.1016/j.ijpe.2013.05.008.

21. Менухова Т.А. Унификация понятий «Коэффициент технической готовности», «Коэффициент выпуска» и «Коэффициент использования автомобилей» с учетом применения новых временных показателей // *Транспортное дело России*. 2013. С. 89–94.

22. Долгов А. П. Теория запасов и логистический менеджмент: методология системной интеграции и принятия эффективных решений. СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 2004. 272 с.

23. Barros, Júlio & Cortez, Paulo & Carvalho, M. A systematic literature review about dimensioning safety stock under uncertainties and risks in the procurement process. *Operations Research Perspectives*. 2021. 8. 100192. 10.1016/j.orp.2021.100192.

24. Скочинская В. А. Методы расчета объема страхового запаса с учетом значимости материальных ресурсов // *Вестник БНТУ*. № 5. 2007. С. 52–57.

25. Скворода Е.В. Методический подход к проектированию стратегии управления производственными запасами на промышленных предприятиях // *Труды БГТУ. Серия 5: Экономика и управление*. 2017. № 2(202). С. 104–108. EDN LAEPIP.

REFERENCES

1. Fadeev A.I., Fomin E.V. Determination of the optimal structure of urban public transport rolling stock taking into account mutual influence of routes. *Proceedings of Irkutsk State Technical University (Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*. 2018; 8 (139); 189–198. (in Russ.)

2. Dryuchin D.A., Konovalova T.V., Lebedev E.A., Nadiryan S.L., Rassokha V.I. Optimization of the number of vehicles serving regular routes of urban agglomerations: monograph ; FGBOU HE «Orenburg State University»; FGBOU HE «Kuban State Technological University». Krasnodar: Publishing House – Yug 2024; 178. (In Russ.)

3. Zaharov N.S., Rakitin V.A. The methodology of forming a fleet of trucks of a motor transport company depending on the purpose of technical and operational indicators of vehicles. *Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Journal of Don]*. 2015; Vol. 3: 174–188. (In Russ.)

4. Kozin Ye.S., Zakharov N.S., Panfilov A.A., Vokhmin D.M. Decision support systems for transportation. Tyumen: Industrial University of Tyumen; 2023: 170. ISBN 978-5-9961-3106-8. EDN BZSJIL (In Russ.)

5. Rassokha V.I., Dryuchin D.A., Nadiryan S.L. Optimization of the structure of the fleet of trackless vehicles serving urban passenger routes based on the results of mathematical modeling. *International Journal of Advanced Studies*. 2023; 13,

no. 3: 180–202. DOI: <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-3-180-202>

6. Rakitin V.A. Development of a technique forming a rational structure of the truck fleet. *Modern problems of science and education*. 2015; 1-1: 149–157. (in Russ.)

7. Kurganov V.M., Griaznov M.V. How to Increase Technical Availability Rate for Vehicle Fleet? *World of Transport and Transportation Journal*. 2011; Vol. 36, No 3: 106–117. (in Russ.)

8. Kurganov V.M., Gryaznov M.V., Kolobanov S.V. Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes // *Journal of Mining Institute*. 2020; Vol. 241: 10–21. DOI: <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.1.10>. EDN EUEOIJ.

9. Kiryushin I.N. To the question of examining the relationship of the coefficient of technical readiness of vehicles operating cycle. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev*. 2019; 2(42): 112–116. (in Russ.)

10. Raposo Hugo & Farinha, José & Ferreira, L.A.A. & Galar, Diego. Dimensioning reserve bus fleet using life cycle cost models and condition based/predictive maintenance: a case study. *Public Transport*. 2018; 10. 10.1007/s12469-017-0167-x.

11. Raposo Hugo & Farinha, José & Ferreira, Luis & Galar, Diego. Reserve fleet indexed to exogenous cost variables. *Transport*. 2019; 34. 437–454. 10.3846/transport.2019.11079.

12. Raposo H. Farinha J. T. Ferreira L. and Galar D. An integrated econometric model for bus replacement and determination of reserve fleet size based on predictivemaintenance. *Eksplotacja i Niezawodnosć*. 2017; vol. 19, no. 3: 358–368, 2017. (in Russ.)

13. Ivanov A.Yu., Panov S.A. Models of Rolling Stock Reservation in Transportation Logistics Systems. *Economics and mathematical methods*. 2013; V. 49. Vol. no 2: 87–96. (in Russ.)

14. Dorofeev A.N. Kurganov V. M., Kohli A. A. Assessment of the reliability of an automobile carrier in a digital transport platform. *The world of transport and technological machines*. 2024; 2-2(85): 115–122. DOI: [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-2-2\(85\)-115-122](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2024-2-2(85)-115-122). EDN IZUSNX.

15. Guedes P.C. and Borenstein D. “Real-time-multi-depot vehicle type rescheduling problem. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2018; vol. 108: 217–234, 2018.

16. Raposo Hugo & Farinha, José & de-Almeida-Pais, J. Edmundo & Galar, Diego. An Integrated Model for Dimensioning the Reserve Fleet based on the Maintenance Policy. *Wseas transactions on systems and control*. 2021; 16: 43–65. 10.37394/23203.2021.16.3.

17. Myronenko V, Samsonkin V, Rudkovskiy S. Mathematical Model of Rationale for Reserve Fleet of Vehicles with Uneven Demand for Transportation. *American Journal of Engineering Research (AJER)*. 2018; Volume-5, Issue-5: 238–244.

18. Hou Bowen & Zhao, Shuzhi & Liu, Huasheng & Li, Jin. Optimization Model for Reserve Fleet Sizes in Traditional Transit Systems considering the Risk of

Vehicle Breakdowns. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018. 1–10. 10.1155/2018/1609238.

19. Kovtsur E. Reservation of transporting capacities of freight transport fleet due to the quantitative increase of fleet freight capacity. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014; 5. 29. 10.15587/1729-4061.2014.27630.

20. Klosterhalfen, Steffen & Kallrath, Josef & Fischer, Gerd. Rail car fleet design: Optimization of structure and size. *International Journal of Production Economics*. 2013; 157. 10.1016/j.ijpe.2013.05.008.

21. Menukhova T.A. Unification of the concepts "Coefficient of technical readiness", "Coefficient of output" and "Coefficient of vehicle utilization" taking into account the application of new time indicators. *Transport Business of Russia*. 2013; 89–94. (in Russ.)

22. Dolgov A. P. *Stock Theory and Logistics Management: Methodology of System Integration and Effective Decision Making*. St. Petersburg: Izd-vo SPb-GUEF, 2004: 272. (in Russ.)

23. Barros, Júlio & Cortez, Paulo & Carvalho, M. A systematic literature review about dimensioning safety stock under uncertainties and risks in the procurement process. *Operations Research Perspectives*. 2021; 8. 100192. 10.1016/j.orp.2021.100192.

24. Skochinskaya V.A. Methods for calculation of reserve stock volume taking into account significance of material resources. *Science & Technique*. 2007; (5): 52–57. (In Russ.)

25. Skovoroda E.V. A methodical approach to designing a strategy for managing production stocks at industrial enterprises. *Proceedings of BSTU. Series 5: Economics and Management*. 2017; 2(202): 104–108. EDN LAEPIP (In Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Фадеев А.И. Постановка задачи, разработка математической модели, анализ результатов, формулирование заключения.

Ильянков А.М. Участие в подготовке исходных данных и расчетах, обзор литературных источников.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Fadeev A.I. Setting the problem, developing a mathematical model, analyzing the results, formulating the conclusion.

Ilyankov A.M. Participation in initial data preparation and calculations, review of literature sources.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фадеев Александр Иванович – д-р техн. наук, проф. кафедры транспорта Сибирского федерального университета (660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д.26).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6581-7087>,

Scopus ID: 57208356151,

SPIN-код: 1304-7849,

e-mail: 9135335784@mail.ru

Ильянков Алексей Михайлович – аспирант кафедры транспорта Сибирского федерального университета (660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д.26).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0924-9934>,

e-mail: ilyankov3322@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander I. Fadeev – Dr. of Sci (Eng.), Professor, Transport Department, Siberian Federal University (26, Academician Kirenskiy Street, Krasnoyarsk, 660074).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6581-7087>,

Scopus ID: 57208356151,

SPIN code: 1304-7849,

e-mail: 9135335784@mail.ru

Alexey M. Ilyankov – Postgraduate student, Transport Department, Siberian Federal University (26, Academician Kirenskiy Street, Krasnoyarsk, 660074).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0924-9934>,

e-mail: ilyankov3322@mail.ru

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Научная статья
УДК 625.712
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-644-671>
EDN: PAXCJU



АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СЛАБЫХ ОСНОВАНИЙ ДОРОЖНЫХ НАСЫПЕЙ

А.С. Александров ✉, Н.П. Александрова, Т.В. Семенова

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

✉ ответственный автор
aleksandrov00@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Приведены сведения об авариях, произошедших на дорогах РФ, США, КНР, Кипра, Индии, из-за недостаточного сопротивления сдвигу слабых грунтов основания насыпи. Поэтому приобретает актуальность анализ методов расчета устойчивости слабых оснований дорожных насыпей.

Методы и материалы. Известные методы определения предельных нагрузок подразделяются на расчеты: по первой критической нагрузке, аналитические и численные решения теории предельного равновесия грунта и расчеты, выполняемые методом конечных элементов. Сделан анализ каждого метода. Особое внимание уделено решению Евгеньева – Казарновского. Это решение является общепринятым методом расчета слабого основания насыпей автомобильных дорог. Авторами показан вывод формул для расчета коэффициента стабильности слабого основания и безопасного давления. Отмечены достоинства и недостатки этого метода. Рассмотрена специфика метода конечных элементов, применяемого для расчета грунтовых оснований. Приведены недостатки программных комплексов PLAXIS и MIDAS, обнаруженные специалистами СГУПС (г. Новосибирск).

Результаты. Предложен расчет устойчивости основания насыпи по напряжению сдвига, представляющего собой эквивалентное напряжение критерия Мора – Кулона. Предлагаемый расчет является аналогом расчета по первой критической нагрузке.

Заключение. Полученные результаты позволяют выполнять расчет слабых оснований насыпей. Поставлены задачи для будущих исследований авторов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: слабое основание насыпи, расчет слабого основания, параметры сопротивления сдвигу

Статья поступила в редакцию 31.05.2025; одобрена после рецензирования 17.06.2025; принята к публикации 22.08.2025.

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: Александров А.С., Александрова Н.П., Семенова Т.В. Анализ методов расчета слабых оснований дорожных насыпей // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 4. С. 644-671. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-644-671>

© Александров А.С., Александрова Н.П., Семенова Т.В., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-644-671>

EDN: PAXCJU

ANALYSIS OF CALCULATION METHODS FOR WEAK FOUNDATIONS OF ROAD EMBANKMENTS

Anatoly S. Aleksandrov ✉, Nataliya P. Aleksandrova, Tatiana V. Semenova
The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia

✉ corresponding author
aleksandrov00@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The article presents information on accidents that occurred on the roads of the Russian Federation, the USA, China, Cyprus, and India due to insufficient shear resistance of weak soils at the base of the embankment. Therefore, the analysis of methods for calculating the stability of weak foundations of road embankments becomes relevant.

Materials and methods. The famous methods for determining ultimate loads are divided into calculations: by the first critical load, analytical and numerical solutions of the theory of limit equilibrium of soil, and calculations performed by the finite element method. Each method has been analyzed. Particular attention is paid to the solution of Evgenyev - Kazarnovskiy. This solution is considered to be a generally accepted method for calculating the weak foundation of highway embankments. The authors have demonstrated the derivation of formulas for calculating the stability coefficient of the weak foundation and safe pressure. The advantages and disadvantages of this method have been noted. The specific features of the finite element method applied to calculate soil foundations have been considered. The disadvantages of the PLAXIS and MIDAS software packages, found by the specialists of the Siberian State Transport University (Novosibirsk), have been presented.

Results. The calculation of the embankment base stability by shear stress, which is the equivalent to the stress of the Mohr-Coulomb criterion, has been presented. The proposed calculation is the analogue of the calculation by the first critical load.

Conclusion. The obtained results allow us to make weak embankment bases calculations. The goals for the authors' future research have been set.

KEYWORDS: weak embankment base, weak base calculation, shear resistance parameters

The article was submitted: May 31, 2025; approved after reviewing: June 17, 2025; accepted for publication: August 22, 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. Aleksandrov A.S., Aleksandrova N.P., Semenova T.V. Analysis of calculation methods for weak foundations of road embankments. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (4): 644-671. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-644-671>

© Aleksandrov A.S., Aleksandrova N.P., Semenova T.V., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Слабые грунты широко распространены на территории России. В своей фундаментальной работе проф. М.Ю. Абелев¹ сообщает, что в отдельную группу слабые грунты выделены в 1965 г. на всесоюзном совещании, состоявшемся в г. Таллине. Классифицирующими признаками слабого грунта приняли сжимаемость и степень влажности. В настоящее время к этим признакам добавили сопротивление сдвигу. Согласно работе М.Ю. Абелева слабые грунты преимущественно залегают ниже уровня грунтовых вод или ниже верховодки, и к ним, как правило, относятся аллювиальные, морские, озерные, дельтовые, лиманные, болотные грунты, реже делювиальные и пролювиальные. Поэтому слабые грунты распространены по всей территории РФ. Проектирование сооружений на слабых грунтах является актуальной задачей дорожного строительства.

Методы расчета слабых оснований насыпей являются базовыми знаниями специалистов дорожной отрасли, они описаны в учебной (А.К. Бируля², В.Ф. Бабков и О.В. Андреев³, И.Е. Евгеньев и В.Д. Казарновский⁴, И.И. Леонович⁵, В.И. Пуркин⁶), справочной (пособие⁷, пособие⁸, справочник⁹) и методической (ОДМ 218.4.4.002–2020¹⁰, ОДМ 218.3.120–2020¹¹) литературе. В указанных нами работах и документах представлены различные методы расчета слабых оснований от фундаментальной двухчленной зависимости Прандтля – Рейснера и классического решения Евгеньева – Казарновского на быструю и медленную

отсыпку насыпей до современных способов, ориентированных на применение метода конечных элементов, реализованного в программных продуктах.

Целью нашей работы является анализ методов расчета слабых оснований для выявления их достоинств и недостатков. Актуальность такой работы состоит в поиске наиболее надежного метода расчета слабых оснований дорожных насыпей. Согласно А.К. Бируля¹² просадки возникают как вследствие деформирования слабого основания, так и из-за деформаций уплотнения грунта в высоких насыпях. Первая причина объясняется большими давлениями, передаваемыми насыпями, на слабое основание. В этом случае при достаточной мощности залежей слабого грунта в основании насыпи образуется поверхность скольжения, по которой грунт отжимается за пределы насыпи. Вторая причина, как правило, обусловлена некачественным уплотнением грунта в теле насыпи. Этот вопрос в нашей статье не рассматривается.

Аварии, обусловленные нарушением устойчивости слабого основания насыпей, происходят как в нашей стране, так и за рубежом [1, 2, 3, 4]. Авторы работы [1] описывают аварию земляной дамбы, произошедшей в округе Медина штата Огайо. В процессе строительства отсыпалась насыпь длиной 91 м, соединяющая межштатные автомагистрали I-76 и I-71. Высота насыпи должна была составить 9,7 м (с учетом дополнительной пригрузки мощностью 0,6 м). Но после отсыпки насыпи на высоту 4,0 м (примерно 43% от проектной высо-

¹ Абелев М.Ю. Слабые водонасыщенные глинистые грунты как основание сооружений. М.: Стройиздат, 1973. 288 с.

² Бируля А.К. Проектирование автомобильных дорог: учебник. Часть 1. М.: Автотрансиздат, 1961. 499 с.

³ Бабков В.Ф., Андреев О.В. Проектирование автомобильных дорог: учебник. Часть 1. М.: Транспорт, 1979. 367 с.

⁴ Евгеньев И.Е., Казарновский В.Д. Земляное полотно автомобильных дорог на слабых грунтах. М.: Транспорт, 1976. 271 с.

⁵ Леонович И.И., Вырко Н.П. Механика земляного полотна. Минск: Наука и техника, 1975. 232 с.

⁶ Пуркин В.И. Проектирование дорог в болотистой местности: учебное пособие. М.: МАДИ, 2021. 84 с.

⁷ Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах (к СНиП 2.05.02-85). М.: Стройиздат, 1989. 192 с.

⁸ Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах. М.: Информавтодор. 2004.

⁹ Справочник инженера дорожника. Изыскания и проектирование автомобильных дорог / О.В. Андреев, В.Ф. Бабков, А.К. Бируля, Е.Н. Гарманов, Т.Н. Глаголева, М.А. Григорьев, В.П. Залуга, К.А. Казанский, М.С. Коганзон, С.В. Коновалов, Е.В. Крутецкий, Ю.С. Крылов, М.Л. Соколов, В.И. Федоров, В.А. Федотов, Г.И. Шейнис, Ю.М. Яковлев. М.: Транспорт, 177. 559 с.

¹⁰ ОДМ 218.4.4.002–2020. Методические рекомендации по использованию существующих насыпей из слабых и обводненных грунтов при реконструкции автомобильных дорог. М.: Росавтодор, 2020. 80 с.

¹¹ ОДМ 218.3.120–2020. Методические рекомендации по расчету насыпей автомобильных дорог на слабых грунтах основания с применением геосинтетических материалов. М.: Росавтодор, 2020. 90 с.

¹² Бируля А.К. Проектирование автомобильных дорог: учебник. ... 499 с.

ты) весь участок длиной 91 м провалился. В процессе обследования установлено [1], что основание насыпи состоит из пяти грунтовых слоев. Фактическая линия скольжения прошла через наиболее слабый слой, характеризующийся сопротивлением недренированному сдвигу 9,6 кПа. Мощность этого слоя 3,6 м, залегание поверхности слоя на глубине 5,8 м от подошвы насыпи. Таким образом, причиной аварии являются слабое основание и чрезмерно быстрая отсыпка насыпи.

Авторы работы [2] выполнили анализ двух аварий, произошедших на шоссе вблизи г. Калькутта (штат Западная Бенгалия, Индия). Аварийные участки располагаются на 18 и 26 км. Обе насыпи отсыпаны по слабому основанию и подтапливаются водой. Первая насыпь (участок 18 км) подтоплена в течение всего года, а вторая – в течение длительного периода. Насыпи укреплены подпорной стенкой. На обоих участках авария произошла сразу после полуночи 9 февраля 2006 года, примерно через месяц после того, как шоссе было открыто для движения автотранспорта. Во время аварии участок недавно построенного двухполосного подъездного пути просел по вертикали примерно на 3 м и сместился в бок примерно на 1 м. На обоих участках подпорная стенка разрушилась без существенных внутренних повреждений, то есть из-за неустойчивости подстилающего грунта, что указывает на глубокое разрушение грунта в основании [2]. Расчеты показали, что расчетная поверхность скольжения прошла под подпорной стенкой по слою слабого грунта с сопротивлением сдвигу 23 кПа [2].

Анализируя аварию на дороге, соединяющей деревни Ната – Пенталия – Панайя (Кипр, курортный район Пафос), авторы работы [3] пришли к выводу, что обрушение откоса произошло по линии скольжения, расположенной гораздо глубже наиболее вероятной поверхности сдвига, определенной расчетом при проектировании. Причина такого несоответствия [3] местоположения расчетной и фактической поверхности скольжения заключается в скоплении воды после обильных осадков. Повышенная влажность грунтов основания насыпи привела к снижению сопротивления сдвигу и обрушению дороги [3].

Авторы работы [4] выполнили обследование двух аварийных участков на скоростной дороге в городском уезде Синьтай (провин-

ция Шаньдун, КНР). Насыпь отсыпана по основанию из пластичного грунта мощностью 14 м. После обильных дождей и увлажнения грунтов основания насыпь просела с образованием выпоров грунта вдоль подошвы [4]. Вследствие наличия таких выпоров причиной аварии посчитали чрезмерное деформирование грунтов основания насыпи, обусловленное снижением их сопротивления сдвигу из-за увлажнения осадками.

Отметим, что в работах [1, 2, 3, 4] основным инструментом определения причин аварий земляных насыпей принят расчет по методу поверхностей скольжения, из которых часть линий скольжения проведена через слои слабого основания. Расчеты выполняются при подстановке в формулы параметров прочности грунта, определенных экспериментально. Примечательно, что все расчеты показали, что наиболее вероятная поверхность скольжения прошла через слой из наиболее слабого грунта. В России базовым методом расчета устойчивости слабого основания является решение Евгеньева – Казарновского.

Аналогичный порядок исследования нами был применен для определения причин образования просадок по ул. Набережная на участке от ул. Романа Кузоваткина до ул. Нефтяников, расположенной в г. Нефтеюганске в пределах поймы р. Обь. Строительство дороги завершено в 2023 г., а диагностика выполнена специалистами нашей кафедры осенью 2024 г. В первую очередь сделан отбор проб грунта насыпи и ее основания. Отбор проб произвели с разных горизонтов насыпи и основания путем колонкового бурения на глубину 10–11 м. В результате установили геологический разрез, состоящий:

- из песчаного грунта насыпи высотой 4–4,5 м;
- насыпного песчаного грунта земляной дамбы, отсыпанной двумя годами ранее для защиты территории от подтопления высотой 1–1,5 м;
- трехслойного основания насыпи из суглинка тяжелого текучепластичной консистенции, суглинка легкого текучего и супеси легкой текучей.

Связные грунты характеризуются показателем текучести, превышающим значение 0,5. Поэтому по классификациям ГОСТ 33149–2014¹³, ГОСТ 33063–2014¹⁴,

¹³ ГОСТ 33149–2014 (Введен впервые) (введен 01.12.2015). Дороги автомобильные общего пользования. Правила проектирования автомобильных дорог в сложных условиях. М.: Стандартинформ, 2015. 40 с.

¹⁴ ГОСТ 33063–2014 (Введен впервые) (введен 01.12.2015). Дороги автомобильные общего пользования. Дороги автомобильные общего пользования. Классификация типов местности и грунтов. М.: Стандартинформ, 2016. 49 с.

СП 34.13330.2021¹⁵ суглинки и супесь являются слабыми грунтами. Кроме того, определение параметров прочности и деформируемости, выполненное при помощи измерительно-вычислительного комплекса АС и С, показало, что модуль деформации супеси при давлении 0,25 МПа меньше 5 МПа. Вследствие чего супесь текучая является слабым грунтом и по классификационному признаку «сжимаемость». Анализ проектной документации позволил установить, что проект не содержит расчетов слабого основания, а конструкции земляного полотна приняты типовые, то есть как для нормальных условий строительства. Поэтому при определении причин появления просадок нами выполнен анализ методов расчета устойчивости слабого основания. В ходе исследования изучены публикации других авторов, преследующих аналогичную цель. В результате мы пришли к выводу о необходимости доработки и развития метода Евгеньева – Казарновского, показав один из вариантов вывода основных формул этого метода (коэффициента стабильности и безопасной нагрузки), с возможностью более точного определения местоположения наиболее опасной точки.

С результатами нашего анализа мы хотим ознакомить коллег и дать свои предложения по совершенствованию метода Евгеньева – Казарновского.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Известные решения расчета слабых оснований можно классифицировать на расчеты: по первой критической нагрузке, аналитические и численные решения теории предельного равновесия грунта. В рамках каждого метода можно применить метод уменьшения параметров прочности, согласно которому в расчет вводят уменьшенные значения параметров сопротивления сдвигу, например, сцепления и тангенса угла внутреннего трения. Анализ различных решений, полученных применением этих методов, является основной целью нашей работы.

Расчеты по первой критической нагрузке берут свое начало от известной работы Н.П. Пузыревского¹⁶. В этой работе получена

формула для вычисления абсолютно безопасного давления на грунтовое основание от нагрузки, распределенной по гибкой полосе. Понятие первой критической нагрузки введено Н.М. Герсевановым в фундаментальной работе¹⁷. В этой работе обосновано, что при рассмотрении зависимости осадки грунтового массива от давления необходимо различать три фазы деформаций (уплотнения, сдвига и разрушения). Первая критическая нагрузка отделяет первую фазу деформаций (фаза уплотнения) от второй (фаза сдвигов). При деформировании грунтового основания в первой фазе осадка массива связана с давлением линейно. Следовательно, первая критическая нагрузка представляет собой наибольшую величину давления, при котором применим расчет осадок от нагрузок по линейным зависимостям.

Здесь сделаем некоторое отступление, которое, с одной стороны, показывает, что деление зависимости осадки от давления на фазы является условным и представляет собой некоторую абстракцию, но, с другой стороны, является вполне приемлемым для инженерных расчетов. Наше замечание вытекает из основ механики сплошной среды, а именно линейной теории упругости, требующей соблюдения законов изменения объема и формы. В частности, закон изменения формы утверждает, что девиатор напряжений D_σ пропорционален девиатору деформаций D_ε ($D_\sigma = 2 \cdot G \cdot D_\varepsilon$, где G представляет собой модуль сдвига). Это значит, что если девиатор напряжений отличен от нуля, то и деформация сдвига отлична от нуля. Следовательно, деформации сдвига отсутствуют только при гидростатическом сжатии, при котором главные напряжения равны¹⁸ ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$). При любом другом напряженном состоянии девиатор напряжений $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ больше нуля, значит, есть и деформация сдвига. Так как в любой точке грунтовой среды возникает трехосное сжатие, характеризующееся главными напряжениями $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ (точки, расположенные вне оси симметрии нагрузки) и $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ (точки, принадлежащие оси симметрии нагрузки), то в каждой точке возникают

¹⁵ СП 34.13330.2021 (Взамен СП 34.13330.2012) (введен 09.02.2021). Свод правил. Автомобильные дороги. СНиП 2.05.02-85*. М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2021. 94 с.

¹⁶ Пузыревский Н.П. Теория напряженности земляных грунтов. Л.: Изд-во ЛИИПС, 1929. 68 с.

¹⁷ Герсеванов Н.М. Опыт применения теории упругости к определению допускаемых нагрузок на грунт на основе экспериментальных работ // Труды МИИТ. 1930. № XV. С. 255–284.

¹⁸ Ельцов Ю.А., Ельцов А.Ю. Прочность и устойчивость в сплошной среде. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2005. 112 с.

и деформации сдвига. Тогда, если давление сколь угодно мало отлично от нуля, то и деформация сдвига отлична от нуля. С увеличением давления, передаваемого сооружением на грунтовое основание, девиаторы напряжений и деформаций возрастают. Поэтому в первой фазе деформирования, называемой фазой уплотнения, возникают как деформации изменения объема, так и деформации сдвига. Но при малых давлениях и девиаторы малы. Вследствие этого в первой фазе деформирования грунтового основания преобладают деформации изменения объема, а деформации сдвига малы. Значит, первая критическая нагрузка представляет собой пороговую величину давления, при превышении которой пренебрегать деформациями сдвига нельзя. Тем не менее деление криволинейной зависимости осадки от давления на три фазы является приемлемым приближением для инженерных расчетов, выполняемых с достаточной точностью, а не с максимальной. Введение такой абстракции позволяет упростить решение и избежать сложных выкладок. Видимо по этой причине учение о фазах деформирования грунтового основания Н.М. Герсеванова популярно среди специалистов и приводится как в учебниках¹⁹

и учебных пособиях²⁰, так и монографиях²¹ по расчету устойчивости оснований. Безусловно, что решения о первой критической нагрузке обладают достаточной точностью для инженерных расчетов.

В основу решения Н.П. Пузыревского положен критерий пластичности Мора – Кулона и формулы Мичелла²². Для простых нагрузок, распределенных по закону прямоугольника или закону треугольника, задачу о напряженном состоянии основания решают в главных осях. В этом случае критерий Мора – Кулона записывают в главных напряжениях. При воздействии на основание нагрузок сложного очертания производят разбиение нагрузки на более простые, для которых имеются известные решения по расчету компонент тензора напряжений. В этом случае задача решается в произвольно ориентированных осях, а критерий Мора – Кулона записывают в компонентах тензора напряжений. Уравнения предельного состояния критерия Мора – Кулона, записанные в разных формах, приведены в таблице 1, а в таблице 2 приведено решение Дж. Мичелла для вычисления главных напряжений и компонент тензора.

Таблица 1

Уравнения предельного состояния критерия Мора – Кулона

Источник: известные уравнения.

Table 1

Limit state equations of the Mohr–Coulomb criterion

Source: well-known equations.

Вид уравнения предельного состояния	Уравнения предельного состояния
В главных напряжениях где σ_1 и σ_3 – максимальное и минимальное главное напряжение	$\frac{1}{\cos \varphi} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi = c$
	$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot c \cdot \operatorname{ctg} \varphi + \sigma_1 + \sigma_3} = \sin \varphi$
В компонентах тензора напряжений где σ_z и σ_x и τ_{zx} – нормальные и касательные напряжения (компоненты тензора)	$\frac{(\sigma_z - \sigma_x)^2 + 4 \cdot \tau_{zx}^2}{(\sigma_z + \sigma_x + 2 \cdot c \cdot \operatorname{ctg} \varphi)^2} = \sin^2 \varphi$

¹⁹ Механика грунтов, основания и фундаменты: учебник / С.Б. Ухов, В.В. Семенов, В.В. Знаменский, З.Г. Тер-Мартirosян, С.Н. Чернышов. М.: Изд-во АСВ, 1994. 527 с.

²⁰ Учебное пособие по курсу «Механика грунтов» / Петраков А.А., Яркин В.В., Таран Р.А., Казачек Т.В.; под ред. Петракова А.А. Макеевка: ДонНАСА, 2004. 164 с.

²¹ Березанцев В.Г. Расчет оснований сооружений. Л.: Изд-во литературы по строительству, 1970. 207 с.

²² Michell J.H. The inversion of plane stress. Proc. Lond. Math. Soc., vol. 34, 1902, Pp. 134–142.

Таблица 2

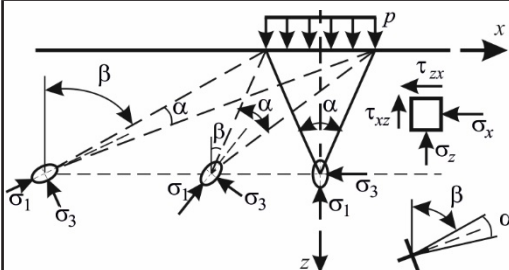
Решение Дж. Мичелла

Источник: заимствован из работы Дж. Мичелла²³

Table 2

John Henry Michell's Calculation

Source: adapted from the work of J. H. Michell²³

Расчетная схема к задаче Мичелла	Формулы расчета напряжений	
	Главные	Компоненты тензора
	$\sigma_1 = \frac{p}{\pi} \cdot (\alpha + \sin \alpha);$ $\sigma_3 = \frac{p}{\pi} \cdot (\alpha - \sin \alpha)$	$\sigma_z = \frac{p}{\pi} \cdot [\alpha + \sin \alpha \cdot \cos(\alpha + 2 \cdot \beta)];$ $\sigma_x = \frac{p}{\pi} \cdot [\alpha - \sin \alpha \cdot \cos(\alpha + 2 \cdot \beta)];$ $\tau_{xz} = \frac{p}{\pi} \cdot [\sin \alpha \cdot \sin(\alpha + 2 \cdot \beta)],$
где p – давление, распределенное по гибкой полосе и передаваемое на основание, Па; α – угол видимости нагрузки, ограниченный отрезками, соединяющими рассматриваемую точку с краями нагрузки, радиан; β – угол между прямой параллельной оси ординат и ближайшим отрезком, ограничивающим угол видимости, как показано на расчетной схеме, радиан		

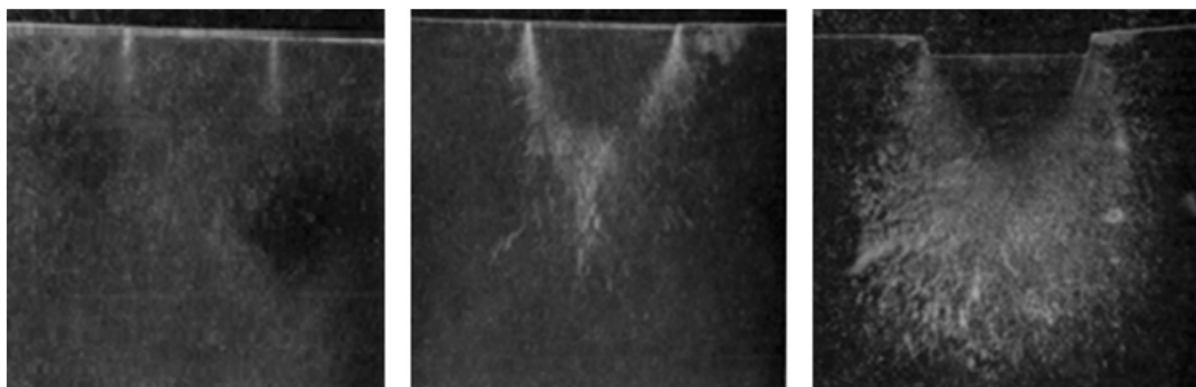


Рисунок 1– Развитие зон разрушения (пластических деформаций) под краями штампа, вдавливаемого в парафин [5]

Figure 1– Development of fracture zones (plastic deformations) under the edges of the stamp pressed into the paraffin [5]

Формулы Дж. Мичелла предназначены для вычисления напряжений от внешней нагрузки, передающей на основание давление величины p . При расчете устойчивости основания в этих формулах необходимо учесть вес грунта в массиве, расположенном над рассматриваемой точкой, а также влияние боковой нагрузки при ее наличии. Поэтому Н.П. Пузыревский формулы, представленные в таблице 1, записал в виде

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{p - \gamma \cdot h}{\pi} \cdot (\alpha + \sin \alpha) + \gamma \cdot (h + z); \\ \sigma_3 &= \frac{p - \gamma \cdot h}{\pi} \cdot (\alpha - \sin \alpha) + \gamma \cdot (h + z), \end{aligned} \quad (1)$$

где γ – вес грунта, Н/м³; h – высота боковой пригрузки, м; z – расстояние от подошвы фундамента до наиболее опасной точки грунтового основания, в которой возникает предельное состояние, м.

²³ Michell J.H. The inversion of plane stress ... Pp. 134–142.

В формуле (1) от давления p , передаваемого внешней нагрузкой, вычитается давление, созданное боковой пригрузкой, которое во втором слагаемом каждой зависимости суммируется с давлением от веса грунта, расположенного в основании под подошвой фундамента. Зависимости (1) подставляются в уравнение предельного состояния условия пластичности Мора – Кулона (см. таблицу 1). Полученное уравнение решается относительно переменной z , определяя ее максимальное значение $z_{\max}$ при угле видимости, равном разности половины числа π (π) и угла внутреннего трения (φ). Полученное уравнение решается относительно давления, после чего получают формулу

$$p = \left(z_{\max} + h + \frac{c}{\gamma} \cdot \operatorname{ctg} \varphi \right) \cdot \frac{\pi \cdot \gamma}{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} + \gamma \cdot h. \quad (2)$$

Под величиной $z_{\max}$ понимают глубину распространения неустойчивых областей, зарождающихся в виде точек под краями нагрузки, распределенной по закону прямоугольника. Это подтверждено экспериментами, в ходе которых наблюдали за развитием пластических зон в основании при увеличении нагрузки. Процесс развития пластических зон под краями штампа, вдавливаемого в парафин, показан на рисунке 1 [5].

Обратим внимание, что процесс пластического деформирования грунта в условиях испытания сопровождается развитием микротрещин, длина которых увеличивается при возрастании нагрузки и вызванной ей деформации. Таким образом, процессы разрушения и пластического деформирования протекают совместно. В силу этого обстоятельства авторы работы [5] предпочитают использовать термин «зона разрушения», заменяя им стандартный термин «зона пластических деформаций». Здесь нами показано, что для характеристики динамики одного и того же процесса развития неустойчивых областей имеется два термина «зона пластических деформаций» и «зона разрушения» или «прорезка» [5].

Возвращаясь к анализу данных рисунка 1, укажем, что по мере увеличения давления, передаваемого штампом на основание, в материале происходит зарождение пластических зон в виде двух точек, расположенных под краями штампа. Давление, соответствующее образованию этих двух пластических точек,

равно первой критической нагрузке Н.М. Герсаванова. При дальнейшем увеличении нагрузки глубина распространения пластических зон возрастает. В конечном итоге пластические зоны смыкаются. Давление, соответствующее смыканию пластических зон, соответствует давлению, при котором происходит потеря несущей способности основания. Давление, соответствующее потере несущей способности основания, называют второй критической нагрузкой. Поэтому в решение (2) вводились различные значения величины $z_{\max}$. Н.П. Пузыревский принял нулевое значение глубины $z_{\max}$. В результате в нашем арсенале появилась формула для вычисления абсолютно безопасного давления на грунтовое основание. Эту формулу дают в виде

$$p_{\text{без}} = \frac{\pi \cdot (\gamma \cdot h + c \cdot \operatorname{ctg} \varphi)}{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} + \gamma \cdot h. \quad (3)$$

В случае отсутствия боковой пригрузки, то есть при $h=0$, зависимость (3) примет вид

$$p_{\text{без}} = \frac{\pi \cdot c \cdot \operatorname{ctg} \varphi}{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}}. \quad (4)$$

Абсолютно безопасное давление, вычисляемое по зависимостям (3) и (4), соответствует величине первой критической нагрузки. Обратим внимание, что Н.П. Пузыревский в основу вывода зависимости (3) положил уравнение предельного состояния критерия Мора – Кулона. Поэтому термин «первая критическая нагрузка» имеет второе определение. В соответствии с этим определением первая критическая нагрузка характеризует величину давления, передаваемого сооружением, при котором в наиболее опасной точке основания образуется площадка и на ней наступает предельное состояние по критерию Мора – Кулона. Угол наклона этой площадки к главным осям определяется суммой или разностью угла в 45 градусов и половины угла внутреннего трения. По учебнику²⁴ давление, вычисляемое по формуле (3), называют начальной критической нагрузкой.

В дальнейшем обратили внимание, что давление, передаваемое сооружением на основание, равное значению, вычисляемому по зависимости (3), приводит к возникновению

²⁴ Механика грунтов, основания и фундаменты: учебник ... 527 с.

предельного состояния только на одной площадке, проведенной через наиболее опасную точку. При таком давлении несущая способность грунтового основания не исчерпана. Поэтому в зависимость (2) стали вводить значения величины $z_{\max}$, превышающие нулевое значение. Так появились формулы Н.Н. Маслова и других специалистов. В.Г. Березанцев²⁵ дал общее название методам расчета критической нагрузки, основанным на подстановке в решение (2) определенной величины $z_{\max}$. Согласно проф. В.Г. Березанцеву этот способ назван методом расчета по модели линейно деформируемой среды. Одновременно с этим В.Г. Березанцев указывает, что при подстановке в решение (2) величины $z_{\max}$, превышающей нулевое значение, вычисленные давления соответствуют фазе сдвигов. В фазе сдвигов связь давлений с осадками основания становится нелинейной. Поэтому применение формул, полученных при $z_{\max} > 0$, противоречит основному постулату модели линейно деформируемой среды, согласно которому связь осадки и давления линейная. Следовательно, расчет критических нагрузок с использованием решений, полученных применением модели линейно деформируемой среды, ограничиваются только решением Н.П. Пузыревского, предназначенным для вычисления первой критической нагрузки.

Применительно к расчету оснований фундаментов решение Н.П. Пузыревского о величине первой критической нагрузки приемлемо, оно приводится в учебниках²⁶. Попытки совершенствования решения Н.П. Пузыревского предпринимаются вплоть до настоящего времени [6, 7, 8]. Специалисты дорожной отрасли применяли решение Н.П. Пузыревского в качестве приближения при определении критической нагрузки на слабое основание. Поясняя применение этого приближения, отметим, что осесимметричная насыпь легко разбивается на три элемента. Двумя крайними элементами являются откосные части, передающие на основание две полосовые нагрузки, распределенные по закону треугольника. Третьим элементом является центральная часть насыпи, ее тело, которое передает полосовую нагрузку, распределенную по закону прямо-

угольника. В этом случае для точного вычисления первой критической нагрузки нужно применить принцип независимости действия сил, вычисляя каждую компоненту тензора напряжений суммированием соответствующих компонент тензоров напряжений от каждой из трех нагрузок. Но можно воспользоваться приближением, состоящим в приведении трапециoidalной нагрузки от насыпи к нагрузке, распределенной по закону прямоугольника. Обе описанные нами расчетные схемы приведены на рисунке 2.

Рассматривая расчетную схему, представленную на рисунке 2, а, следует отметить, что она характеризуется тремя нагрузками, каждая из которых имеет свой угол видимости (α_1 , α_2 и α_3). Биссектрисы углов видимости совпадают с линией действия максимальных главных напряжений σ_1 . Поэтому в одной и той же точке А направление главных максимальных напряжений σ_1 , возникающих от действия разных нагрузок, различно. В этом случае в одной и той же точке для каждой нагрузки имеется своя пара главных площадок, на которые действуют напряжения σ_1 и σ_3 . Ориентации главных площадок от различных нагрузок не совпадают, вследствие чего суммировать главные напряжения нельзя. В этом случае решение в главных напряжениях неприменимо, неприменимо и решение Н.П. Пузыревского. Тем не менее трапециевидную нагрузку можно заменить равновеликой по площади прямоугольной нагрузкой, как это показано на рисунке 2, б. Так как площади трапеции и прямоугольника равны, то вся нагрузка от веса грунта насыпи сохраняется. Для прямоугольной нагрузки (см. рисунок 2, б) имеем две главные площадки и два главных напряжения. В этом случае принимаем уравнение предельного состояния Мора – Кулона, записанное в главных осях, подставляя в него выражения главных напряжений по решению Дж. Мичелла. В итоге приходим к решению Н.П. Пузыревского, которое в полной мере применимо к расчетной схеме, показанной на рисунке 2, б. Однако такое решение даст результаты, отличающиеся от данных расчета, выполненного по более точной расчетной схеме, показанной на рисунке 2, а.

²⁵ Березанцев В.Г. Расчет оснований сооружений ... 207 с.

²⁶ Механика грунтов, основания и фундаменты: учебник ... 527 с.

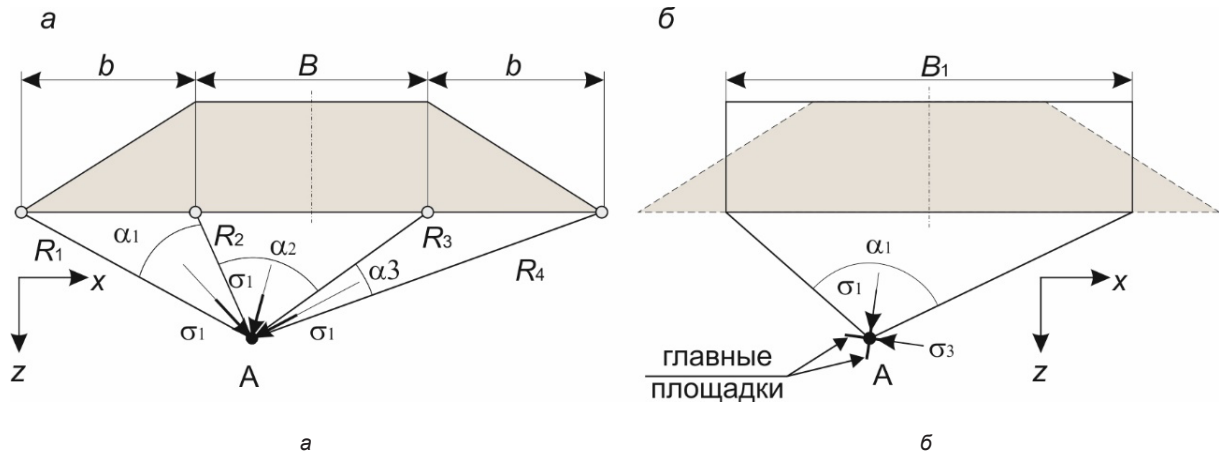


Рисунок 2 – Общепринятые расчетные схемы:
 а – классическая осесимметричная насыпь, передающая на основание трапецевидную нагрузку;
 б – приближение, выполняемое заменой трапецевидной нагрузки на нагрузку, распределенную по закону прямоугольника

Источник: рисунки выполнены авторами, но они аналогичны известным расчетным схемам, представленным в учебниках А.К. Бируля, И.Е. Евгеньева, В.Д. Казарновского и мн. др. авторов.

Figure 2 – Generally accepted calculation schemes:
 а – classical axisymmetric embankment transferring a trapezoidal load to the base;
 б – approximation performed by replacing trapezoidal load on a load distributed according to the rectangle law

Source: the drawings compiled by the authors, but they are similar to the well-known calculation schemes represented in the textbooks written by A.K. Birulya, I.Ye. Yevgenyev and V.D. Kazarnovskiy and many other authors.

Попытку уточнения приближенно-го решения предприняли И.Е. Евгеньев и В.Д. Казарновский, создав расчет на быструю и медленную отсыпку насыпи. Вывод формул безопасных нагрузок при быстрой и медленной отсыпке насыпи можно отнести к методам расчета слабых оснований дорожных насыпей, полученных применением метода линейно деформируемой среды. Тем не менее структура вывода основных зависимостей этого расчета отличается от метода Н.П. Пузыревского. Расчет, созданный И.Е. Евгеньевым и В.Д. Казарновским²⁷, является основным, он применяется в пособиях^{28,29}, справочнике³⁰ и ОДМ 218.4.4.002–2020³¹. Поэтому предпримем попытку тщательного анализа метода Евгеньева – Казарновского.

Решение Евгеньева – Казарновского³² предназначено для оценки устойчивости основания насыпи на трех этапах: начальном, конечном и промежуточном. На начальном этапе слабый грунт находится в природном состоянии, имея наименьшую плотность скелета и наибольшую влажность. В начальном состоянии считается, что процесс консолидации грунта еще не начался. В конечном состоянии грунты консолидированы за счет уплотнения нагрузкой от отсыпанной насыпи, вследствие чего плотность скелета наибольшая, а влажность наименьшая. Считается, что в конечном состоянии процесс консолидации закончился. Промежуточный этап характеризуется протеканием консолидации грунта во времени. На этом этапе происходит уплотнение грунта за

²⁷ Евгеньев И.Е., Казарновский В.Д. Земляное полотно автомобильных дорог на слабых грунтах ... 271 с.

²⁸ Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах (к СНиП 2.05.02-85) ... 192 с.

²⁹ Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах ... 2004.

³⁰ Справочник инженера дорожника. Изыскания и проектирование автомобильных дорог 559 с.

³¹ ОДМ 218.4.4.002–2020. Методические рекомендации по использованию существующих насыпей из слабых и обводненных грунтов при реконструкции автомобильных дорог ... 80 с.

³² Евгеньев И.Е., Казарновский В.Д. Земляное полотно автомобильных дорог на слабых грунтах ...С. 100–116.

счет отжатия воздуха и воды. При решении этой задачи нужно определить время, требуемое для завершения консолидационных процессов. Для решения этих задач И.Е. Евгеньев и В.Д. Казарновский вводят понятия коэффициентов безопасности $k_{\text{без}}$ и стабильности $k_{\text{ст}}$, определяя их отношением безопасной $p_{\text{без}}$ и предельной нагрузок $p_{\text{пр}}$ к фактической нагрузке p_0 . В результате получены две формулы:

$$k_{\text{без}} = \frac{p_{\text{без}}}{p_0}; k_{\text{ст}} = \frac{p_{\text{пр}}}{p_0}. \quad (5)$$

Оговорив различия коэффициентов $k_{\text{без}}$ и $k_{\text{ст}}$, И.Е. Евгеньев и В.Д. Казарновский указывают, что величина коэффициента безопасности для основания насыпи определяется наименьшим значением коэффициента стабильности для горизонтов, расположенных в пределах этого основания. Эта мысль записывается формулами:

$$k_{\text{без}} = [k_{\text{ст. z.}}]_{\min} = [k_{\text{ст}}]_{\min. \min};$$

$$k_{\text{без}} = \frac{[p_{\text{пр}}]_{\min. \min}}{p_0} = \frac{p_{\text{без}}}{p_0}. \quad (6)$$

Зависимости (6) постулируют, что безопасную нагрузку на основании насыпи можно отыскать как наименьшее значение из предельных нагрузок для грунтовых горизонтов, слагающих основание насыпи. Постановка задачи вполне понятна, но дальнейшее решение дано кратко, в виде основных формул, без их вывода. По всей видимости авторы общепринятого решения посчитали, что арифметические выкладки, необходимые при выводе формулы для расчета безопасного давления на основание насыпи, тривиальны, и не стали их приводить в своей работе³³. Для тщательного анализа общепринятого решения нам понадобится вывод формулы безопасного давления, полученной И.Е. Евгеньевым и В.Д. Казарновским. Поэтому вначале приведем основные формулы, представленные в работе И.Е. Евгеньева и В.Д. Казарновского³⁴, а затем покажем вывод этих зависимостей. В процессе вывода

формул обратим внимание на их некоторые особенности, вызывающие замечания.

Приступая к решению задачи, И.Е. Евгеньев и В.Д. Казарновский пишут: «Нагрузку, вызывающую достижение условия предельного равновесия на некотором горизонте z (хотя бы в одной точке), можно определить, решая систему уравнений»³⁵.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} &= f_1 \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) \\ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Далее И.Е. Евгеньев и В.Д. Казарновский указывают, что для нагрузки, распределенной по трапеции, первое уравнение системы (7) оказывается сложным. Поэтому общепринятое решение выполнено графоаналитическим способом с использованием ЭВМ. Расчет безопасного давления на основание насыпи выполняется по формулам:

$$p_{\text{без}} = \frac{c + \gamma \cdot z \cdot \tan \varphi}{\beta};$$

$$p_{\text{без}} = \frac{c + \gamma \cdot z \cdot \tan \varphi}{\beta} + q, \quad (8)$$

где γ – вес грунта, Н/м³; z – ордината рассматриваемого горизонта (точки), отсчитываемая от подошвы насыпи (от поверхности слабого основания) до рассматриваемого горизонта, м; q – интенсивность боковой пригрузки, Па; β – функция очертания эпюры нагрузки, определяемая по графикам.

В нашей статье формулы (8), так же, как и в работе И.Е. Евгеньева и В.Д. Казарновского³⁶, приведены сразу же после системы уравнений (7). В этом случае не прослеживается очевидной связи уравнений системы (7) и выведенных из нее формул (8). Авторы общепринятого решения не приводят математический вывод формул (8). Далее И.Е. Евгеньев и В.Д. Казарновский уточняют зависимости (8), говоря, что величину функции β следует принимать в виде значения $\beta_{\text{оп}}$, которое эта функция принимает в наиболее опасной точке. Благодаря этому утверждению формулы (8) принимают вид

³³ Евгеньев И.Е., Казарновский В.Д. Земляное полотно автомобильных дорог на слабых грунтах ... 271 с.

³⁴ Евгеньев И.Е., Казарновский В.Д. Земляное полотно автомобильных дорог на слабых грунтах ... С. 100–116.

³⁵ Евгеньев И.Е., Казарновский В.Д. Земляное полотно автомобильных дорог на слабых грунтах ... 101 с.

³⁶ Евгеньев И.Е., Казарновский В.Д. Земляное полотно автомобильных дорог на слабых грунтах ... 271 с.

$$p_{\text{без}} = \frac{c + \gamma \cdot z \cdot \tan \varphi}{\beta_{\text{оп}}};$$

$$p_{\text{без}} = \frac{c + \gamma \cdot z \cdot \tan \varphi}{\beta_{\text{оп}}} + q. \quad (9)$$

Далее авторы общепринятого решения первую зависимость формул (8) подставляют в выражение для расчета коэффициента безопасности. В этом случае получим

$$k_{\text{без}} = \left[\frac{p_{\text{пр}}(z)}{p_0} \right]_{\min} = \left[\frac{c + \gamma \cdot z \cdot \tan \varphi}{p_0 \cdot \beta} \right]_{\min}. \quad (10)$$

В зависимостях (10) коэффициент безопасности определяется минимальной величиной коэффициента стабильности, как это следует из формул (6). В данном случае вычисляется наименьшее значение правой части зависимостей (10), которое принимают за величину коэффициента безопасности. Разъясняя суть найденного решения, И.Е. Евгеньев и В.Д. Казарновский пишут³⁷: «В соответствии с принятым нами физическим смыслом коэффициента стабильности он должен определяться по следующей зависимости»

$$k_{\text{ст}} = \frac{c + \gamma \cdot z \cdot \tan \varphi}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \tan \varphi}. \quad (11)$$

Здесь мы отметим, что, следуя определенному алгоритму решения, формулу (11) можно вывести из уравнения предельного состояния критерия Мора – Кулона. Для такого вывода достаточно воспользоваться уравнением предельного состояния критерия Мора – Кулона, записанному в трактовке В.В. Соколовского (см. первое уравнение в таблице 1), система уравнений (7) для вывода выражения (11) не нужна. Из выражения (11) можно получить формулы (8) или (9).

Непосредственно перед выводом формул (11) и (8) обсудим систему уравнений (7). При этом внесем ясность, при каких условиях расчета приемлемо решение в главных осях. Также оговорим целесообразность решения системы уравнений (7) и возможность такого решения.

Анализируя уравнения (7), отметим, что решение задачи в главных осях для симметричной трапецевидной нагрузки возможно только в точках, принадлежащих оси симме-

трии насыпи, показанной на рисунке 2, а. Это объясняется тем, что ось симметрии насыпи совпадает с осью ординат прямоугольной системы и главной осью, вдоль которой возникает напряжение σ_1 . Но в этом случае необходимо правильно вычислять результирующие главные напряжения. Рассматривая рисунок 2, а, отметим, что для каждой из трех нагрузок определено направление напряжения σ_1 , перпендикулярно которому можно задать направление напряжения σ_3 . Каждое из этих главных напряжений действует на главную площадку, расположенную нормально к линии действия этого главного напряжения. Направление главных площадок для каждой из трех нагрузок различно, вследствие чего суммировать три максимальных и три минимальных главных напряжения нельзя. В этом случае решение следует выполнять в компонентах тензора напряжений, или, как еще говорят, в произвольно ориентированных осях. При таком подходе вычисляют результирующие компоненты тензора напряжений $\Sigma \sigma_z$, $\Sigma \sigma_x$ и $\Sigma \tau_{zx}$. Но из анализа изолиний касательных напряжений [9, 10, 11, 12], называемых сдвигами, следует, что эти напряжения концентрируются под краями нагрузки, распределенной по трапеции. Их величина уменьшается по мере приближения к оси трапецевидной насыпи. Причем для одной части насыпи касательные напряжения положительны, а для второй части этой насыпи – отрицательны [9, 10, 11, 12]. В точках оси симметрии насыпи касательные напряжения равны нулю [11, 12]. Поэтому при решении задачи об устойчивости основания насыпи в наиболее опасной точке, лежащей на оси симметрии нагрузки, касательные напряжения не учитывают. Но в точке, принадлежащей оси симметрии трапецевидной насыпи, результирующие главные напряжения нужно определять суммированием нормальных напряжений, возникающих в этой же точке от разных нагрузок. Результирующее максимальное главное напряжение вычисляется суммой трех нормальных вертикальных напряжений ($\sigma_1 = \Sigma \sigma_z$). А минимальное главное напряжение находят суммой трех нормальных горизонтальных напряжений ($\sigma_3 = \Sigma \sigma_x$).

Рассматривая возможность решения системы уравнений (7), отметим, что первое уравнение этой системы является постановкой задачи, которое постулирует, что максимальное касательное напряжение является некоторой

³⁷ Евгеньев И.Е., Казарновский В.Д. Земляное полотно автомобильных дорог на слабых грунтах ... 109 с.

функцией среднего нормального напряжения. Второе уравнение представляет собой один из возможных вариантов решения первого уравнения. В данном случае второе уравнение системы (7) представляет собой уравнение предельного состояния критерия Мора – Кулона, записанное в главных осях для полных напряжений, то есть без вычета порового давления. Помимо второго уравнения системы (7), первое уравнение имеет и другие известные решения. Наиболее точным решением является уравнение огибающей, которая строится к кругам предельных напряжений [13, 14]. Кроме уравнения огибающей можно воспользоваться приближением, проведя к кругам напряжений предельную прямую Кулона [15]. Построение предельной прямой является наиболее простым, но наименее точным приближением. В целях повышения точности приближения к кругам напряжений проводят кусочно-линейные функции³⁸, например, билинейную [16]. Таким образом, поставив задачу определенным образом, можно прийти либо к нелинейной зависимости касательного напряжения от средней величины нормального, либо к более простой линейной связи этих напряжений. Следовательно, второе уравнение системы (7), соответствующее предельному состоянию по критерию Мора – Кулона, является наиболее простым решением первого уравнения системы (7). В попытке совместного решения уравнений системы (7) смысла нет. Кроме того, второе уравнение системы (7) представляет собой критерий Мора – Кулона, он уже сам по себе является критерием расчета грунтового основания по сопротивлению сдвигу. Это уравнение, если и решают совместно с другими уравнениями, то только с дифференциальными уравнениями равновесия грунтовой среды, как это предусматривает теория предельного равновесия. Система уравнений теории предельного равновесия грунта называется канонической, она коренным образом отличается от системы (7). Поэтому подход к решению задачи в виде формулирования системы двух уравнений (7) является неверным, запутывающим специалистов. Например, показанное нами решение Н.П. Пузыревского опирается на критерий Мора – Кулона и формулы расчета напряжений, подставляемые в уравнение предельного состояния. Аналогично решается задача о проверке толщины дорожной одежды по сопротивлению сдвигу в грунте земляного

полотна. В этом решении вычисляют напряжения сдвига как эквивалентные напряжения условия Мора – Кулона. Этот подход в полной мере применим к выводу формулы (11).

По нашему мнению, целесообразно показать разницу в подходах к решению задачи об устойчивости грунтового основания к сдвигу, применяемыми специалистами дорожной отрасли и специалистами в области расчетов фундаментов. Рассматривая решение Н.П. Пузыревского, несложно заметить, что вначале вычисляются результирующие главные напряжения от давления, передаваемого фундаментом, и веса грунта основания. После этого результирующие главные напряжения поставляются в уравнение предельного состояния Мора – Кулона, которое решается относительно давления. Специалисты дорожной отрасли суммируют эквивалентные напряжения критерия Мора – Кулона, возникающие от внешней нагрузки и веса материала, расположенного выше рассматриваемой точки. В этом случае применение принципа суперпозиции силы распространяется на напряжения сдвига, а критерий Мора – Кулона записывается в виде

$$\sum_{i=1}^n T_i \leq c, \quad (12)$$

где i и n – порядковый номер и число нагрузок, T_i – напряжение сдвига (эквивалентное напряжение критерия Мора – Кулона) от i -й нагрузки, Па.

Для простых пояснений и дальнейших арифметических выкладок положим, что на рассматриваемую точку действует давление, передаваемое насыпью на основание и вес грунта основания, расположенного выше рассматриваемого горизонта. Тогда результирующее напряжение сдвига определится суммой эквивалентных напряжений критерия Мора – Кулона от двух нагрузок, то есть насыпи T_p и основания T_{oc} . В этом случае условие сопротивления сдвигу (12) примет вид

$$T_p + T_{oc} \leq c. \quad (13)$$

Решение задачи выполним для точек оси симметрии трапецевидной насыпи и проведем в главных осях, но помня, что $\sigma_1 = \Sigma \sigma_z$ и $\sigma_3 = \Sigma \sigma_x$. Тогда напряжения сдвига T_p и T_{oc} найдем по формулам:

³⁸ Ельцов Ю.А., Ельцов А.Ю. Прочность и устойчивость в сплошной среде ... 112 с.

$$T_p = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (14)$$

$$T_{oc} = \frac{\gamma \cdot z - \xi \cdot \gamma \cdot z}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\gamma \cdot z + \xi \cdot \gamma \cdot z}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (15)$$

где ξ – коэффициент бокового давления.

Напряжения сдвига, определяемые по формулам (14) и (15), подставим в критерий сопротивления сдвигу (13). Тогда получим

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi + \frac{\gamma \cdot z - \xi \cdot \gamma \cdot z}{2 \cdot \cos \varphi} - \\ - \frac{\gamma \cdot z + \xi \cdot \gamma \cdot z}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi \leq c. \end{aligned} \quad (16)$$

Критерий устойчивости к сдвигу (16) содержит коэффициент бокового давления, который в механике грунтов вычисляют либо с использованием гипотезы А. Динника³⁹, либо с применением гипотезы А. Гейма. В механике горных пород, помимо закона упругости А. Динника и закона гидростатики А. Гейма, применяются и другие математические представления для вычисления коэффициента бокового давления. Согласно закону упругости А. Динника коэффициент бокового давления находят из условия равенства нулю деформации бокового расширения. После преобразований приходят к выводу, что коэффициент бокового давления ξ является функцией коэффициента Пуассона μ и определяется по формуле

$$\xi = \frac{\mu}{1 - \mu}. \quad (17)$$

Как известно, максимальная величина коэффициента Пуассона составляет 0,5. В этом случае коэффициент бокового давления будет иметь наибольшую величину, равную единице. При равенстве коэффициента бокового давления единице ($\xi=1$) нормальные напряжения одинаковы. Это и есть закон гидростатики А. Гейма. Именно этот закон принимают для расчета слабых, как правило, водонасыщенных грунтов. Положив в критерии (16) $\xi=1$, получим

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi - \gamma \cdot z \cdot \operatorname{tg} \varphi \leq c. \quad (18)$$

Если напряжения, возникающие в основании насыпи от действия веса грунта, рас-

положенного в этом основании над рассматриваемой точкой, перенести в правую часть критерий (18), то получим

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi \leq c + \gamma \cdot z \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (19)$$

Разделив правую часть неравенства (19) на его левую часть, получим

$$\begin{aligned} 1 \leq \frac{c + \gamma \cdot z \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi} \quad \text{или} \\ \frac{c + \gamma \cdot z \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi} \geq 1. \end{aligned} \quad (20)$$

Сравнивая формулу (11) и выведенный критерий (20), можно заметить, что

$$k_{ct} = \frac{c + \gamma \cdot z \cdot \tan \varphi}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \tan \varphi} \geq 1. \quad (21)$$

Получив критерий устойчивости основания насыпи (21), процитируем И.Е. Евгеньева и В.Д. Казарновского⁴⁰, они пишут: «При $k_{ct} > 1$ в данной точке возникает допредельное состояние, при $k_{ct} < 1$ – запредельное и при $k_{ct} = 1$ – предельное». Из анализа формул (11) и (21) следует, что величина коэффициента стабильности является функцией глубины. Поэтому в расчете необходимо отыскать наименьшее значение этого коэффициента.

Теперь рассмотрим вывод формулы для расчета безопасного давления из формулы для расчета коэффициента стабильности. При этом выводе формул рассмотрим точки, принадлежащие оси симметрии нагрузки. В этих точках результирующие главные напряжения вычисляют суммированием соответствующих нормальных напряжений, то есть по формулам $\sigma_1 = \Sigma \sigma_z$ и $\sigma_3 = \Sigma \sigma_x$. В этих простых формулах главные и нормальные напряжения можно представить произведениями давления p и соответствующего коэффициента влияния ($K_1 = \Sigma K_z$ и $K_3 = \Sigma K_x$). Коэффициенты влияния учитывают геометрические характеристики насыпи и глубину расположения рассматриваемой точки в основании насыпи. Указанные нами действия можно записать уравнениями

³⁹ Динник А.Н. О давлении горных пород и расчет крепи круглой шахты // Инженерный работник. 1925. № 7. С. 1–12.

⁴⁰ Евгеньев И.Е., Казарновский В.Д. Земляное полотно автомобильных дорог на слабых грунтах ... 100 с.

$$k_{\text{ст}} = \frac{c + \gamma \cdot z \cdot \tan \varphi}{\frac{\sum \sigma_z - \sum \sigma_x}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sum \sigma_z + \sum \sigma_x}{2} \cdot \tan \varphi} =$$

$$= \frac{c + \gamma \cdot z \cdot \tan \varphi}{\frac{p \cdot \sum K_z - p \cdot \sum K_x}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{p \cdot \sum K_z + p \cdot \sum K_x}{2} \cdot \tan \varphi} \quad (22)$$

Давление p является общим множителем, который выносится за скобки, а оставшаяся в скобках функция коэффициентов влияния $\sum K_z$ и $\sum K_x$ численно равна функции β . Выполнив эти действия, получим

$$k_{\text{ст}} = \frac{c + \gamma \cdot z \cdot \tan \varphi}{p \cdot \left(\frac{\sum K_z - \sum K_x}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sum K_z + \sum K_x}{2} \cdot \tan \varphi \right)} =$$

$$= \frac{c + \gamma \cdot z \cdot \tan \varphi}{p \cdot \beta} \quad (23)$$

Рассматривая формулу (23), можно утверждать, что в наиболее опасной точке оси симметрии трапецевидной нагрузки функция β приобретет наибольшее значение β_{max} . В этом случае решение уравнения (23) относительно давления p определит безопасную нагрузку

$$p_{\text{без}} = \frac{c + \gamma \cdot z \cdot \tan \varphi}{k_{\text{ст}} \cdot \beta_{\text{max}}} \quad (24)$$

При величине коэффициента стабильности $k_{\text{ст}}$, равной единице, формула (24), совпадает с первой формулой (9). Проведя дополнительные рассуждения в формуле (24), можно учесть боковую пригрузку. Таким образом, из зависимости (11) мы получили формулу (24), совпадающую с решением Евгеньева – Казарновского.

Сделанные нами арифметические выкладки показывают, что вывод формул для расчета коэффициента стабильности (21) и безопасного давления (24) требует подстановки в условие пластичности Мора – Кулона формул теории упругости для расчета напряжений, а система уравнений (7) не нужна. Рассматривая показанное нами решение, отметим, что оно справедливо при вычислении коэффициента бокового давления по формуле (17). Но известны и другие решения, согласно которым коэффициент бокового давления является функцией угла внутреннего трения. Обзор

данных зависимостей выполнен Л.А. Строковой [17]. Авторы большинства таких формул полагают, что коэффициент бокового давления равен единице при нулевой величине угла внутреннего трения. Здесь возникает противоречие, состоящее в том, что при выводе формул (21) и (24) мы положили $\xi=1$, полагая $\varphi>0$. Но большинство функциональных зависимостей $\xi=f(\varphi)$, полученных для нормально уплотненных грунтов, постулируют, что $\xi=1$ только при $\varphi=0$. Поэтому рассчитывая коэффициент бокового давления как функцию угла внутреннего трения, в зависимостях (21) и (24) необходимо положить $\varphi=0$. В этом случае критерий Мора – Кулона превращается в третью теорию прочности с одним параметром сопротивления сдвигу, а зависимости (21) и (24) примут другой вид. По В.В. Соколовскому таким сопротивлением сдвигу обладает идеально связная среда, у которой сцепление больше нуля, а угол внутреннего трения равен нулю. Казалось бы, что в этом случае особой проблемы нет, нужно просто изменить формулы (21) и (24), приняв в них $\varphi=0$, но это противоречит модели упрочнения грунта, используемой в критерии Мора – Кулона. Согласно этой модели $\varphi=0$ только при $c=0$. Для устранения этого недостатка необходимо изменить гипотезу упрочнения, применяемую в критерии Мора – Кулона.

Тем не менее решение Евгеньева – Казарновского применимо к достаточно большой номенклатуре грунтов и позволяет вычислить безопасное давление на слабое основание с достаточной для этих случаев точностью. По этой причине решение Евгеньева – Казарновского является общепринятым.

В завершении анализа решения Евгеньева – Казарновского отметим, что специалисты по-разному определяют расстояние до расчетного горизонта z . В правильной трактовке величина z представляет собой расстояние, измеряемое по оси симметрии трапецевидной нагрузки от точки, взятой на поверхности слабого основания, то есть на подошве насыпи до наиболее опасной точки, расположенной в слабом основании. Схожая трактовка величины z приведена в пособиях^{41,42}, в которых указано, что z является глубиной рассматриваемого горизонта от поверхности земли. Обратим внимание, что методика определения

⁴¹ Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах (к СНиП 2.05.02–85) ... 92 с.

⁴² Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах. ... 2004.

величины z по пособиям^{43,44} не опирается на понятие наиболее опасной точки. Но согласно этим пособиям величина функции β , определяемая графическим способом, зависит от глубины z . Поэтому при расчете любого грунтового слоя слабого основания имеется возможность определения такой величины функции $\beta_{\text{он}}$, при которой безопасное давление для этого слоя будет наименьшим. В этом случае ордината z будет ничем иным, как расстоянием до наиболее опасной точки $z_{\text{он}}$. В ОДМ 218.4.4.002–2020 приведено упрощенное определение величины $z_{\text{он}}$. Согласно трактовке величины z , приведенной в ОДМ 218.4.4.002–2020, она является глубиной расположения середины расчетного слоя в основании насыпи. Следовательно, по ОДМ 218.4.4.002–2020 местоположение наиболее опасной точки принимается в середине рассматриваемого слоя. Согласно примерам расчета устойчивости слабого основания, представленным в учебном пособии В.И. Пур-

кина⁴⁵, глубина расчетного горизонта принимается на нижней границе рассматриваемого слоя. Таким образом, мнения специалистов дорожной отрасли о местоположении расчетного горизонта (наиболее опасной точки) в рассматриваемом грунтовом слое слабого основания разнятся. Поэтому задача определения местоположения наиболее опасной точки внутри расчетного слоя слабого основания актуальна. Эту задачу можно решить построением эпюры результирующего напряжения сдвига, вычисляемому по формуле (16) при использовании закона А. Динника или зависимости (18) при применении закона А. Гейма. В данном случае наиболее опасной точкой будет точка с наибольшим напряжением сдвига. Таким образом, представленный нами алгоритм вывода формулы Евгеньева – Казарновского содержит решение задачи о глубине залегания наиболее опасной точки.

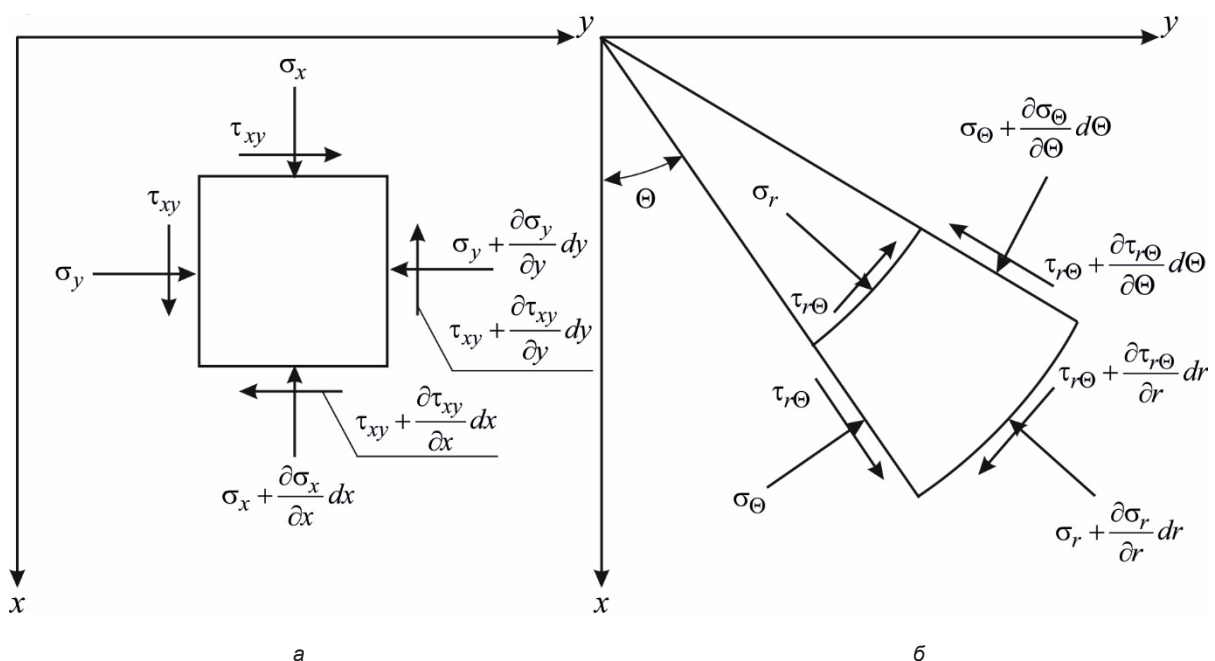


Рисунок 3 – Схема равновесия элементарного объема сыпучей среды:
а – в прямоугольной системе координат; б – в полярной системе координат
Источник: заимствован из работы М.В. Малышева⁴⁶.

Figure 3 – The equilibrium scheme of the elementary volume of the bulk granular environment:
a – in a rectangular coordinate system; b – in a polar coordinate system
Source: borrowed from the work of M.V. Malyshev.

⁴³ Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах (к СНиП 2.05.02–85) ... 92 с.

⁴⁴ Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах. ... 2004.

⁴⁵ Пуркин В.И. Проектирование дорог в болотистой местности: учебное пособие ... 84 с.

⁴⁶ Малышев М.В. Приближенное решение плоской задачи теории предельного равновесия сыпучей среды ... 5 с.

Таблица 3

Математические и физические уравнения канонической системы по М.В. Малышеву
Источник: заимствован из работы М.В. Малышева⁴⁷.

Table 3

Mathematical and physical equations of the canonical system
Source: taken from the work of M.V. Malyshev (see footnote 24)

Система координат	Математические и физические уравнения канонической системы, определяющие ее предельное равновесие
Прямоугольная	$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \gamma; \quad \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0; \quad \frac{\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \cdot \tau_{xy}^2}}{\sigma_x + \sigma_y + 2 \cdot c \cdot \operatorname{ctg} \varphi} = \sin \varphi$
Полярная	$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = \gamma \cdot \cos \theta; \quad \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{2 \tau_{r\theta}}{r} = -\gamma \cdot \sin \theta;$ $\frac{\sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + 4 \cdot \tau_{r\theta}^2}}{\sigma_r + \sigma_\theta + 2 \cdot c \cdot \operatorname{ctg} \varphi} = \sin \varphi$

Другим вариантом решения задачи об устойчивости слабого основания является теория предельного равновесия грунта (ТПРГ). Методы расчета грунтовых оснований, полученные применением этой теории, включают в себя как точные аналитические решения, так и приближенные. В нашей стране ТПРГ начала развиваться в 30-х – 40-х годах 20 в. Подчеркивая актуальность работ, выполненных в рамках этой теории, достаточно сказать, что первое издание книги⁴⁸ В. В. Соколовского вышло в свет в 1942 г. В.В. Соколовский нашел общее решение для целого ряда задач. Метод В.В. Соколовского основан на введении в дифференциальные уравнения новых переменных, посредством которых уравнения приведены к каноническому виду. Дифференциальные уравнения равновесия элементарного объема грунтовой среды (точки) записывают в прямоугольных или полярных координатах. Расчетные схемы равновесия точки грунта в прямоугольной и полярной системе координат приведены на рисунке 3, который заимствован из работы М.В. Малышева⁴⁹.

Из анализа расчетных схем, показанных на рисунке 3, вытекают дифференциальные уравнения равновесия плоской задачи. Эти уравнения дополняются физическим уравне-

нием предельного равновесия, которое принимают из критерия Мора – Кулона. Таким образом, для решения плоской задачи имеется каноническая система уравнений, состоящая из двух математических дифференциальных уравнений равновесия и одного физического алгебраического уравнения предельного состояния, полученного из критерия Мора – Кулона. Уравнения канонической системы приведены в таблице 3, они заимствованы из работы М.В. Малышева⁵⁰.

Можно сказать, что появление канонической системы уравнений и обобщающего метода В.В. Соколовского разделяет решения теории предельного равновесия грунта на две части. Первую часть составляют решения, полученные без явного привлечения канонической системы уравнений. Для таких решений через грунтовой массив проводят линию скольжения, отделяющую часть земляного сооружения. Решения, полученные таким способом, иногда называют методом поверхностей скольжения. Рассматривая историю развития данного метода, следует отметить изменение представлений специалистов о форме поверхности скольжения.

В начале становления этого метода полагалось, что поверхность скольжения можно

⁴⁷ Малышев М.В. Приближенное решение плоской задачи теории предельного равновесия сыпучей среды ... 50 с.

⁴⁸ Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1942. 208 с.

⁴⁹ Малышев М.В. Приближенное решение плоской задачи теории предельного равновесия сыпучей среды. М.: Изд-во ВОДГЕО, 1957. 50 с.

⁵⁰ Малышев М.В. Приближенное решение плоской задачи теории предельного равновесия сыпучей среды ... С. 5–7.

составить из прямолинейных отрезков. В последствие это приближение отвергли, найдя решения для круглоцилиндрической поверхности. В отсеченной круглоцилиндрической поверхностью скольжения части земляного сооружения возникают две грунтовые области. Одна область стремится сдвинуть грунт по линии скольжения, а другая часть, наоборот, удерживает массив. В этом случае наиболее часто применяются приближенные решения, основанные на разбиении отсеченной линией скольжения части грунтового массива на отдельные элементы (отсеки). Далее, рассматривая каждый элемент, определяют, к какому классу (сдвигающих или удерживающих) относятся создаваемые им усилия или моменты. Сдвигающие силы или моменты суммируются. Отдельно от них суммируются удерживающие силы или моменты. Рассчитывая отношение суммы удерживающих моментов или сил к сумме сдвигающих моментов или сил, вычисляют величину коэффициента устойчивости. Далее величину коэффициента устойчивости сравнивают с предельным значением. На основании этого делают вывод об устойчивости призмы выпирания, или, наоборот, о сдвиге этой призмы по рассматриваемой линии скольжения. В этом случае уравнения канонической системы не применяются, но равновесие призмы выпирания обеспечивается при расчете коэффициента устойчивости.

Таким образом, метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения применяют для решения задач об устойчивости откосов и оснований земляных сооружений. Этот метод широко известен и распространен. Но для точного определения сумм удерживающих и сдвигающих сил важно, чтобы предполагаемая поверхность скольжения совпадала с фактической, по которой происходит обрушение. Круглоцилиндрическая поверхность является криволинейной, но она отличается по форме от фактической поверхности скольжения. Поэтому появились работы, в которых поверхность скольжения задавали кривой, отличающейся от формы круглоцилиндрической поверхности. Формы поверхности скольжения давали

в виде: ломаной, сложного криволинейного очертания, кубического сплайна, логарифмической спирали. Классификация решений, полученных методом поверхностей скольжения, приводится в работе А.В. Жабко [18].

Отличие формы поверхности скольжения от составленной из прямых отрезков и круглоцилиндрической поверхности следует из результатов экспериментов, в которых для наглядности фотографировались траектории движения частиц. Первым такие фотографии сделал В.И. Курдюмов⁵¹. Отдавая должное методу фотографической фиксации положения грунтовых частиц, М.В. Малышев в работе [19], дословно цитируя В.И. Курдюмова, писал: «Если фотографировать в течение нескольких секунд песок, заключенный в сосуде со стеклянной стенкой и подвергаемый раздавливанию стержнем ..., то те песчинки, которые при этом остаются в покое, должны выйти на фотографии вполне резко, отчетливо, тогда как изображения песчинок, двигавшихся при фотографировании, должны оказаться не резкими, размазанными. Вся совокупность размазанных изображений должна определить собою фигуру призмы выпирания, а граница между изображениями, размазанными и резкими, кривую скольжения призмы выпирания».

Метод фотофиксации В.И. Курдюмова получил признание и развитие. Так был разработан метод цветных полосок, состоящий в том, что при изготовлении грунтовой модели в нее закладываются полоски из того же грунта, но окрашенного красителем. При приложении нагрузки грунтовая модель деформируется, вместе с ней деформируются и цветные полоски. По конфигурации цветных полосок можно судить о форме поверхности скольжения. Такие эксперименты выполняются в настоящее время, в качестве примера приведем кандидатские диссертации А.Л. Калинина⁵² и М.В. Шохирева⁵³. Фотографии, сделанные авторами обеих диссертаций, показывают, что линия скольжения криволинейна. Согласно М.В. Шохиреву местоположение точек, принадлежащих линии скольжения, наилучшим образом описывается уравнением логарифмической спирали.

⁵¹ Курдюмов В.И. К вопросу о сопротивлении естественных оснований. Фотографический способ исследования процесса разрушения песчаного слоя под влиянием местной нагрузки. Вторая публичная лекция, прочитанная в зале Института инженеров путей сообщения 11 декабря 1889 г. СПб, Тип. Эрлих, 1891.

⁵² Калинин А.Л. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу в песчаных грунтах: дис. ... канд. техн. наук по специальности 2.1.8. Омск: ФГБОУ ВО «СибАДИ», 2024. 317 с.

⁵³ Шохирев М.В. Определение несущей способности двухслойных оснований фундаментов аналитическими и численными методами: дис. ... канд. техн. наук по специальности 2.1.2. Новосибирск: ФГБОУ ВО «СГУПС», 2024. 164 с.

Решения, полученные применением ТРПГ, предназначены для расчета предельных давлений на однослойное основание. М.В. Шохирев⁵⁴ пишет: «Что касается двухслойных оснований, имеются решения только для основания с жестким подстилающим слоем. ... Решение для двухслойного основания статическим методом ТРПГ получить не удастся». В настоящее время М.В. Шохирев совместно с проф. А.М. Карауловым и проф. К.В. Королевым [20, 21, 22] получили решение о несущей способности двухслойных оснований фундаментов. В этих решениях рассмотрены случаи расположения линии скольжения как в верхнем, так и нижнем слое двухслойного основания, а также на границе раздела слоев.

Основания дорожных насыпей, как правило, представлены несколькими грунтовыми слоями, из которых, по крайней мере, часть сложена слабыми грунтами. Такие условия залегания слабых грунтов в основаниях дорожных насыпей сдерживают применение решений теории предельного равновесия грунта в области проектирования земляного полотна автомобильных дорог. Тем не менее до появления решения Евгеньева – Казарновского специалисты дорожной отрасли определяли предельное давление на основание насыпи по известной формуле Прандтля – Рейснера. Двухчленная зависимость Прандтля – Рейснера является фундаментальной в теории предельного равновесия грунта. Развитием этого решения стала трехчленная зависимость К. Терцаги, к которой можно привести любое аналитическое решение. Теоретическое обоснование этой трехчленной зависимости приведено в работах К.В. Королева в статье [23] и докторской диссертации⁵⁵.

В настоящее время при решении задач этим методом выделяют два разных случая. В первом случае основание стабилизировано, вследствие чего закон Кулона или уравнение предельного состояния критерия Мора – Кулона записывают в полных напряжениях.

Во втором случае основание рассматривают как нестабилизированное, в котором возникает поровое давление. В этом случае задачу решают в эффективных напряжениях, а в качестве параметров сопротивления сдвигу применяют эффективные сцепление и угол внутреннего трения, которые вводят в закон Кулона или уравнение предельного состояния Мора – Кулона. Отметим, что круг задач, решаемых применением теории предельного равновесия грунта, постоянно расширяется. Обзор таких решений можно посмотреть в первых главах докторских диссертаций А.М. Караулова⁵⁶ и К.В. Королева.

Рассматривая применение численных методов строительной механики к расчету оснований насыпей, следует отметить, что ввиду наличия программного обеспечения они являются наиболее популярными. Компьютерные программы получили широкое распространение как в инженерной практике, так и научных исследованиях, в том числе диссертационных. Говоря о методе конечных элементов (МКЭ), следует отметить, что он наиболее востребован из всех численных методов. Истоки становления МКЭ связывают с работами Дункана и Коллара, опубликованными в 1934⁵⁷ и 1935⁵⁸ гг. В этих работах введены понятия матриц жесткости, демпфирования и инерции, а также предложен метод решения задач о колебаниях применением алгебры матриц. Также нужно отметить, что пионеры, создававшие численные методы расчета, не ориентировались на проектирование строительных конструкций, и, в частности на расчет слабого основания насыпей. Так W.J. Duncan и Collar A.R., работая совместно с R.A. Frazer, занимались колебаниями, исследуя вибрирование (flutter) крыла самолета. Но так как численные методы строительной механики, так же, как и вариационные принципы механики сплошной среды, обладают большой универсальностью, то благодаря усилиям специалистов эти методы и принципы стали применяться при расчете строительных конструкций и грунтовых оснований. Наи-

⁵⁴ Шохирев М.В. Определение несущей способности двухслойных оснований фундаментов аналитическими и численными методами ... 14 с.

⁵⁵ Королев К.В. Несущая способность оснований в стабилизированном и нестабилизированном состоянии: дис. ... д-ра техн. наук по специальности 05.23.02. Санкт-Петербург, 2015. 326 с.

⁵⁶ Караулов А.М. Несущая способность оснований осесимметричных фундаментов зданий и сооружений: дис. на соиск. ... д-ра техн. наук по специальности 05.23.02. Новосибирск, 2008. 291 с.

⁵⁷ Duncan W. J., Collar, A. R. A method for the solution of oscillations problems by matrices. Philosophical Magazine. 1934. Series, 7, 17, pp. 865–885.

⁵⁸ Duncan W. J., Collar, A. R. Matrices applied to the motions of damped systems. Philosophical Magazine. 1935. Series 7, 19, pp. 197–214.

большую универсальность из всех численных методов имеет МКЭ, он заложен во многих программных продуктах, позволяющих производить, в том числе расчеты слабых оснований грунтовых сооружений. МКЭ относится к сетчатым методам, а главным элементом сетки являются узлы. Каждый узел обладает степенями свободы, характеризующими его положение в пространстве. В статических задачах положение узла в пространстве описывают тремя линейными и тремя угловыми перемещениями, понимая под ними смещения вдоль осей (x , y , iz) и углы поворота относительно этих же осей. При решении динамических задач количество степеней свободы может возрасти до восемнадцати, здесь к упомянутым линейным и угловым перемещениям добавлены их скорости и ускорения, то есть производные по времени первого и второго порядка. Для узлов сетки составляют уравнения равновесия, учитывая в них силы инерции, компоненты матриц жесткости, примыкающих к узлу элементов, а также перемещения узлов, принадлежащих элементам. Точность метода зависит от размера ячейки сетки, определяющей количество узлов. При стремлении площади ячейки к нулю число узлов возрастает до бесконечности. В этом случае расчет по МКЭ сходится к аналитическому математически строгому решению. При уменьшении ячейки сетки трудоемкость расчета возрастает, но, как мы заметили, решение инженерных задач должно обладать достаточной точностью, а не максимальной. Поэтому специалисты, использующие компьютерные расчеты МКЭ, стремятся подобрать размер ячейки сетки так, чтобы точность расчета была приемлема, а трудоемкость для этой приемлемой точности была бы минимальной. Казалось бы, все хорошо и замечательно, но А.М. Караулов и К.В. Королев обратили внимание на то, что между результатами расчета предельных нагрузок на основание по МКЭ и точному решению ТПРГ имеются отличия. Эти различия описаны К.В. Королевым и А.М. Карауловым в работе⁵⁹, в которой подмечено две детали. Первая деталь состоит в том, что осадка, вычисленная по МКЭ, на графике «давление–осадка» существенно выходит за пределы, характерные для расчета по ТПРГ. Вторая деталь состоит в том, что в некоторых зонах грунтового основания при расчете по МКЭ имеет место существен-

ное нарушение условий равновесия. В 2022 г. А.М. Караулов, К.В. Королев и А.О. Кузнецов опубликовали статью [24], в которой выполнили детальное сопоставление результатов расчета по точному решению ТПРГ и по МКЭ в программных комплексах PLAXIS и MIDAS. В результате авторы работы [24] установили, что поля напряжений, рассчитанные МКЭ, не всегда удовлетворяют требованиям равновесия. В выводах А.М. Караулов, К.В. Королев и А.О. Кузнецов пишут: «Применение МКЭ к расчету несущей способности оснований требует повышенного внимания особенно в том, что касается характера и развития областей пластических деформаций и выполнения условий равновесия». Таким образом, применение МКЭ к расчету предельной нагрузки требует выбора программного продукта, то есть оценки возможности применения данного комплекса к решаемой задаче. Для этого нужно убедиться, что уравнения равновесия будут соблюдены во всех зонах грунтового основания. Применение популярных программных комплексов PLAXIS и MIDAS требует повышенного внимания, что нам убедительно показали авторы статьи [24].

Подводя итог нашему анализу, скажем, что мы осознаем успехи специалистов, работающих в каждом из рассмотренных направлений. Безусловно, поиск новых решений необходим, но актуальность работ, направленных на совершенствование нормативных методов расчета, также бесспорна. По этой причине авторы предпримут попытку модификации классического решения Евгеньева – Казарновского.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Решения задачи о первой критической нагрузке на слабое основание будем базировать на критерии Мора – Кулона в произвольно ориентированных осях. Но форма записи этого критерия должна быть такова, чтобы в левой части находилось эквивалентное напряжение (напряжение сдвига), а в правой части сцепление. Для этого воспользуемся критерием Мора – Кулона для реального грунта, записанного в главных напряжениях (см. таблицу 1), и формулами расчета главных напряжений через компоненты тензора. Критерий Мора – Кулона в главных осях для реального грунта записывают в виде, предложенном В.В. Соколовским, а именно

⁵⁹ Королев К. В., Караулов А. М. Об определении предельной нагрузки в упругопластических расчетах грунтовых оснований методом конечных элементов // Геотехника: актуальные теоретические и практические проблемы / Межвуз. тем. сб. тр. / СПбГАСУ. СПб.: СПбГАСУ, 2007. С. 102–107.

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi \leq c. \quad (25)$$

Формулы для вычисления главных напряжений, девиатора и суммы главных напряжений через компоненты тензора хорошо известны, они имеют вид

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\sigma_z + \sigma_x}{2} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(\sigma_z - \sigma_x)^2 + 4 \cdot \tau_{zx}^2}; \\ \sigma_3 &= \frac{\sigma_z + \sigma_x}{2} - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(\sigma_z - \sigma_x)^2 + 4 \cdot \tau_{zx}^2}. \end{aligned} \quad (26)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sqrt{(\sigma_z - \sigma_x)^2 + 4 \cdot \tau_{zx}^2}. \quad (27)$$

$$\sigma_1 + \sigma_3 = \sigma_z + \sigma_x. \quad (28)$$

Применение формул (27) и (28) в критерии Мора – Кулона (25) позволяет заменить девиатор и сумму главных напряжений их величинами, выраженными через компоненты тензора. Сделав такую замену, получим

$$\frac{\sqrt{(\sigma_z - \sigma_x)^2 + 4 \cdot \tau_{zx}^2}}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_z + \sigma_x}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi \leq c. \quad (29)$$

Так как в критерии (29) результирующие компоненты тензора напряжений необходимо определять суммированием соответствующих

компонент, возникающих от действия каждой из трех нагрузок (см. рисунок 2, а), то критерий (29) перепишем в виде

$$\frac{\sqrt{(\sum \sigma_z - \sum \sigma_x)^2 + 4 \cdot \sum \tau_{zx}^2}}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sum \sigma_z + \sum \sigma_x}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi \leq c. \quad (30)$$

В точках основания, принадлежащих оси симметрии, нагрузки касательные напряжения равны нулю. Поэтому в этих точках критерий (30) примет вид

$$\frac{\sum \sigma_z - \sum \sigma_x}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sum \sigma_z + \sum \sigma_x}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi \leq c. \quad (31)$$

Таким образом, неравенство (30) является критерием Мора – Кулона для оценки сопротивления сдвигу на площадке, проведенной через любую произвольно взятую точку слабого основания насыпи. Критерий (31) – это частный случай неравенства (30), он применим только к точкам, принадлежащим оси симметрии нагрузки.

Компоненты тензора напряжений от прямоугольной нагрузки вычисляются по формулам Мичелла, они приведены в таблице 2. Формулы для расчета компонент тензора напряжений от нагрузки, распределенной по бесконечной гибкой полосе по закону треугольника, приведены в таблице 4.

Таблица 4

Расчет напряжений полосовой нагрузки, распределенной по закону треугольника

Источник: составлено авторами.

Table 4

Calculation of band-pass load stresses distributed according to the triangle law

Source: compiled by the authors.

Расчетная схема к решению задачи	Формулы расчета напряжений компонент тензора напряжений
	$\begin{aligned} \sigma_z &= \frac{p}{\pi} \cdot \left(\alpha \cdot \frac{x}{b} - \frac{1}{2} \sin 2 \cdot \beta \right); \\ \sigma_x &= \frac{p}{\pi} \cdot \left[\alpha \cdot \frac{x}{b} - \frac{z}{b} \cdot \ln \frac{R_1^2}{R_2^2} \sin \alpha + \frac{1}{2} \sin 2 \cdot \beta \right]; \\ \tau_{xz} &= \frac{p}{2 \cdot \pi} \cdot \left(1 + \cos 2 \cdot \beta - 2 \cdot \frac{z}{b} \cdot \alpha \right), \end{aligned}$
где p, α и β – параметры аналогичные, поясненные в таблице 2; R_1 и R_2 – кратчайшие расстояния от соответствующего края нагрузки до рассматриваемой точки, с другой стороны, R_1 и R_2 – это гипотенузы двух прямоугольных треугольников	

Рассматривая правила определения компонент тензора напряжений по формулам таблиц 2 и 4, следует отметить два обстоятельства.

Первое: необходимо обращать внимание на начало отчета. Для симметричных нагрузок, таких как нагрузка, распределенная по бесконечной полосе по закону прямоугольника (см. схему в таблице 2), начало отчета находится в точке, лежащей на поверхности основания и принадлежащей оси симметрии нагрузки. В этой точке значение координат x и z равно нулю. Для несимметричных нагрузок, например, для нагрузки, распределенной по бесконечной полосе по закону треугольника, начало отчета расположено на краю нагрузки.

Второе: формулы таблиц 2 и 4 не являются единственным вариантом определения компонент напряжений от нагрузок, распределенных по бесконечной полосе. Дело в том, что во всех представлениях формулах угол видимости нагрузки α определяется одинаково, но правила определения второго угла β в формулах разных авторов могут отличаться. Например, в таблице 5 приведена расчетная схема и формулы для вычисления компонент тензора напряжений от полосовой нагрузки, изменяющейся по закону прямоугольника, в которых используются углы α и β_0 .

Сравнивая правила отчета углов β и β_0 , показанных на расчетных схемах в таблицах 2 и 5, несложно заметить, что величина этих углов различна, но значения углов связаны. Один из

данных углов можно определить через другой угол и половину угла видимости. Несложно заметить, что

$$\beta_0 = \beta + \frac{\alpha}{2}; \quad \beta = \beta_0 - \frac{\alpha}{2}. \quad (32)$$

Обратим внимание, что подстановка первой формулы (32) в зависимости таблицы 5 позволяет выполнить их преобразование формулы в таблице 2. Показывая эти преобразования, получим

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \frac{p}{\pi} \cdot \left\{ \alpha + \sin \alpha \cdot \cos \left[2 \cdot \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right) \right] \right\} = \\ &= \frac{p}{\pi} \cdot \left[\alpha + \sin \alpha \cdot \cos (2 \cdot \beta + \alpha) \right] \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{p}{\pi} \cdot \left\{ \alpha - \sin \alpha \cdot \cos \left[2 \cdot \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right) \right] \right\} = \\ &= \frac{p}{\pi} \cdot \left[\alpha - \sin \alpha \cdot \cos (2 \cdot \beta + \alpha) \right] \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \tau_{xz} &= \frac{p}{\pi} \cdot \sin \alpha \cdot \sin \left[2 \cdot \left(\beta + \frac{\alpha}{2} \right) \right] = \\ &= \frac{p}{\pi} \cdot \sin \alpha \cdot \sin (2 \cdot \beta + \alpha) \end{aligned} \quad (35)$$

Таблица 5

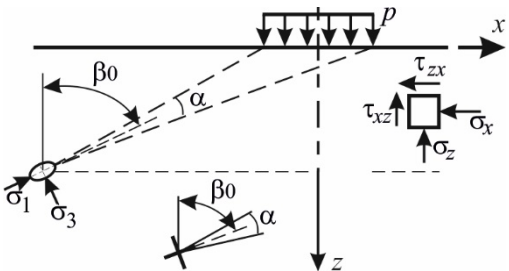
Расчет напряжений от полосовой нагрузки, распределенной по закону прямоугольника

Источник: составлено авторами.

Table 5

Calculation of stresses from a band-pass load distributed according to the rectangle law

Source: compiled by the authors.

Расчетная схема к решению задачи	Формулы расчета напряжений компонент тензора напряжений
	$\begin{aligned} \sigma_z &= \frac{p}{\pi} \cdot \left[\alpha + \sin \alpha \cdot \cos (2 \cdot \beta_0) \right]; \\ \sigma_x &= \frac{p}{\pi} \cdot \left[\alpha - \sin \alpha \cdot \cos (2 \cdot \beta_0) \right]; \\ \tau_{xz} &= \frac{p}{\pi} \cdot \sin \alpha \cdot \sin (2 \cdot \beta_0) \end{aligned}$
где β_0 – угол между прямой параллельной оси ординат и биссектрисой углов видимости, как показано на расчетной схеме, радиан	

Аналогично если вторую формулу (32) подставить в зависимости таблицы 2, то получим выражения таблицы 5. Следовательно, формулы таблиц 2 и 5 тождественны. Такие тождественные формулы есть для полосовой треугольной нагрузки. Поэтому можно использовать любые формулы, но нужно обращать внимание на углы β , β_0 и им подобные. Дело в том, что определение этих углов выполняют из тригонометрии прямоугольных треугольников, но для определения углов β и β_0 , показанных в таблицах 2 и 5, используются разные прямоугольные треугольники. Поэтому после выбора формул для расчета компонент тензора напряжений плоской задачи необходимо проанализировать расчетную схему и получить формулы для определения углов β или β_0 , а также угла видимости α . Сделав это для прямоугольной и треугольных нагрузок нужно просуммировать соответствующие компоненты тензоров напряжений. Специалистам дорожной отрасли можно воспользоваться книгой И.Е. Евгеньева и В.Д. Казарновского⁶⁰, в которой наши старшие коллеги уже решили эту задачу, дав результирующие компонент тензора напряжений в виде

$$\frac{\sigma_z}{p} = \frac{1}{n \cdot \pi} \cdot [n \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + (\alpha_1 + \alpha_3) + d \cdot (\alpha_1 - \alpha_3)] \quad (36)$$

$$\frac{\sigma_x}{p} = \frac{1}{n \cdot \pi} \cdot \left[n \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + (\alpha_1 + \alpha_3) + d \cdot (\alpha_1 - \alpha_3) - 2 \cdot g \cdot \ln \frac{R_1 \cdot R_4}{R_2 \cdot R_3} \right] \quad (37)$$

$$\frac{\tau_{xz}}{p} = -\frac{g}{n \cdot \pi} \cdot (\alpha_1 - \alpha_3) \quad (38)$$

где n, d и g – параметры, зависящие от геометрических характеристик насыпи и координат x и z .

$$n = \frac{2 \cdot b}{B}; \quad d = \frac{x}{B/2} = \frac{2 \cdot x}{B}; \quad g = \frac{z}{B/2} = \frac{2 \cdot z}{B}. \quad (39)$$

Правая часть формул (36)–(38) является результирующим коэффициентом влияния

для каждой компоненты тензора напряжений трапецевидной нагрузки. С учетом коэффициентов влияния расчет напряжений можно представить произведением двух величин. В этом случае будут справедливы формулы

$$\sum \sigma_z = p \cdot \sum K_z; \quad \sum K_z = \frac{1}{n \cdot \pi} \cdot [n \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + (\alpha_1 + \alpha_3) + d \cdot (\alpha_1 - \alpha_3)] \quad (40)$$

$$\sum \sigma_x = p \cdot \sum K_x; \quad \sum K_x = \frac{1}{n \cdot \pi} \cdot \left[n \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + (\alpha_1 + \alpha_3) + d \cdot (\alpha_1 - \alpha_3) - 2 \cdot g \cdot \ln \frac{R_1 \cdot R_4}{R_2 \cdot R_3} \right] \quad (41)$$

$$\sum \tau_{xz} = p \cdot \sum K_{xz}; \quad \sum K_{xz} = -\frac{g}{n \cdot \pi} \cdot (\alpha_1 - \alpha_3). \quad (42)$$

При расчете слабого основания насыпи по первой критической нагрузке в качестве критерия обеспечения устойчивости нужно принять условие (13). В левой части этого критерия необходимо вычислить два эквивалентных напряжения критерия Мора – Кулона, возникающих от разных нагрузок. Напряжение сдвига T_p возникает от давления насыпи, передаваемого на слабое основание, оно определяется по формуле

$$T_p = \frac{\sqrt{(\sum \sigma_z - \sum \sigma_x)^2 + 4 \cdot \sum \tau_{xz}^2}}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sum \sigma_z + \sum \sigma_x}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (43)$$

Зависимость (43) позволяет вычислить напряжение сдвига в любой точке основания насыпи, расположенной как на оси симметрии трапецевидной нагрузки, так и вне этой оси. Из анализа выражения (38) следует, что для любой точки, расположенной на оси симметрии трапецевидной нагрузки, углы видимости треугольных нагрузок α_1 и α_3 равны. Вследствие этого результирующее касательное напряжение τ_{xz} равно нулю. Поэтому в точках, расположенных в слабом основании на оси симметрии трапецевидной нагрузки, напря-

⁶⁰ Евгеньев И.Е., Казарновский В.Д. Земляное полотно автомобильных дорог на слабых грунтах ...81 с.

жение сдвига определяется по более простому выражению, а именно по формуле

$$T_p = \frac{\sum \sigma_z - \sum \sigma_x}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sum \sigma_z + \sum \sigma_x}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (44)$$

Применяя зависимости (40)–(42) в формулах (43) и (44), можно рассчитать эквивалентное напряжение критерия Мора – Кулона, возникающее в основании, от давления, передаваемого насыпью.

Эквивалентное напряжение критерия Мора – Кулона, возникающее в любой точке основания насыпи от действия веса грунта, расположенного под подошвой насыпи, вычисляется по формуле (15). Анализируя эту формулу, мы показывали, что коэффициент бокового давления можно вычислить либо с применением гипотезы А. Динника, либо с применением закона А. Гейма. В первых расчетах дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу применению этих двух разных гипотез отводилось серьезное внимание. Слабые основания, как правило, сложенные водонасыщенными грунтами рассчитывали по гипотезе А. Гейма, полагая, что $\xi=1$. Проверку сопротивления сдвигу в грунте земляного полотна при расчете дорожных одежд, наоборот, выполняли с применением гипотезы А. Динника, полагая что $\xi=\mu/(1-\mu)$. В таком разделении правил расчета коэффициента бокового давления заложен глубокий смысл. Здесь считается, что влажность рабочего слоя земляного полотна даже в расчетный период года может не достигать полной влагоемкости. В этом случае целесообразно полагать, что $\xi<1$.

Так было до 2001 г., в котором вступил в действие ОДН 218.046–01⁶¹, впоследствии замененный на ПНСТ 542–2021⁶², затем на ГОСТ Р 71404–2024⁶³. В этих документах расчет дорожной одежды по сопротивлению сдвигу выполняется с применением гипотезы А. Гейма. Таким образом, в XXI в. специалисты дорожной отрасли перестали делать различия между расчетом напряжений от

собственного веса в слабых грунтах и грунтах рабочего слоя земляного полотна. Тем не менее отличие физического состояния грунтов рабочего слоя земляного полотна и слабого грунта основания насыпи очевидны. Поэтому расчет напряжений с применением гипотезы А. Гейма справедлив лишь для малой части грунтов, обладающих высокой пористостью и влажностью, превышающей влажность на границе текучести. Также заметим, что гипотеза А. Динника базируется на законе упругости, согласно которому зависимость вычисления коэффициента бокового давления как функции коэффициента Пуассона получена из условия равенства наименьшей главной деформации ε_3 нулю. Поэтому номенклатура грунтов, для которых применима гипотеза А. Динника, тоже ограничена. Поиск более универсальной зависимости для определения коэффициента бокового давления актуален и выполняется специалистами в области механики горных пород вплоть до настоящего времени [25, 26]. В механике горных пород предложены различные гипотезы о зависимости горизонтального напряжения от вертикального, например известная формула С.Г. Михлина⁶⁴. Но одной из задач механики горных пород является устройство горных выработок, которые коренным образом меняют природное напряженное состояние массива грунта. Основание насыпи представляет собой природный массив грунта, на котором возводят земляное сооружение. Поэтому в арсенале специалистов дорожной отрасли остаются две гипотезы – А. Динника и А. Гейма. Напряжение сдвига от веса грунта слабого основания можно определить либо по формуле (15), либо с учетом гипотезы А. Гейма. Во втором случае зависимость (15) примет вид

$$T_{oc} = -\gamma \cdot z \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (45)$$

Тогда, применяя гипотезу А. Динника, суммируя напряжения сдвига, вычисляемые по

⁶¹ ОДН 218.046–01 (взамен ВСН 46-83) (срок действия с 20.12.00 г. до 15.05.2018 г.). Проектирование нежестких дорожных одежд. М.: ГСДХ Минтранса России, 2001. 146 с.

⁶² ПНСТ 542–2021 (взамен ПНСТ 265–2018) (срок действия с 01.06.2021 г. до 01.06.2024 г.). Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 мая 2021 г. № 34-пнст. М.: Стандартинформ, 2021 // ИС «Техэксперт» / АО «Кодекс». Дата обновления: 11.11.2024.

⁶³ ГОСТ Р 71404–2024 (взамен ПНСТ 542–2021) (введен 01.09.2024 г.) Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 августа 2024 г. № 1022-ст. М.: Стандартинформ, 2024 // ИС «Техэксперт» / АО «Кодекс». Дата обновления: 11.11.2024.

⁶⁴ Михлин С. Г. Распределение напряжений в полуплоскости с эллиптическим вырезом // Сборник научных трудов. Сейсмологический институт АН СССР. 1934. № 29а. С. 17–29.

формулам (15) и (43), получим, что напряжение сдвига, возникающее в любой точке основания от действия обеих нагрузок, вычисляется по формуле

$$T = \frac{\sqrt{(\sum \sigma_z - \sum \sigma_x)^2 + 4 \cdot \sum \tau_{zx}^2}}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sum \sigma_z + \sum \sigma_x}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi + \frac{\gamma \cdot z - \xi \cdot \gamma \cdot z}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\gamma \cdot z + \xi \cdot \gamma \cdot z}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (46)$$

Рассматривая точки, расположенные на оси симметрии трапецевидной нагрузки, формулу (46) преобразуем к виду

$$T = \frac{\sum \sigma_z - \sum \sigma_x}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sum \sigma_z + \sum \sigma_x}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi + \frac{\gamma \cdot z - \xi \cdot \gamma \cdot z}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\gamma \cdot z + \xi \cdot \gamma \cdot z}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (47)$$

Формула (46) представляет собой результирующее напряжение сдвига, возникающее в любой точке слабого основания от нагрузки, передаваемой насыпью, и от веса грунта слабого основания при условии применения гипотезы А. Динника. Формула (47) является частным случаем формулы (46), она справедлива лишь для определения напряжения сдвига в точках, расположенных в слабом основании на оси симметрии трапецевидной нагрузки.

Во втором случае, применяя гипотезу А. Гейма, суммируем напряжения сдвига, вычисляемые по формулам (43) и (45). Тогда получим

$$T = \frac{\sqrt{(\sum \sigma_z - \sum \sigma_x)^2 + 4 \cdot \sum \tau_{zx}^2}}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sum \sigma_z + \sum \sigma_x}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi - \gamma \cdot z \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (48)$$

Так же, как и в первом случае, для точек, расположенных на оси симметрии трапецевидной нагрузки, формулу (48) преобразуем к виду

$$T = \frac{\sum \sigma_z - \sum \sigma_x}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sum \sigma_z + \sum \sigma_x}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi - \gamma \cdot z \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (49)$$

Обсуждая полученные нами формулы (46)–(49), отметим, что поскольку гипотеза А. Динника обобщает гипотезу А. Гейма, то зависимость (46) обобщает все остальные зависимости. Расчет напряжений сдвига по

глубине слабого основания, выполненный по соответствующей конкретным грунтово-гидрологическим условиям формуле, позволяет определить местоположение самой опасной точки. Наиболее опасной точкой будет точка, в которой напряжение сдвига T достигает наибольшей величины. Через эту точку можно провести самую опасную площадку, повернутую к главным осям под углом 45 градусов плюс или минус половина угла внутреннего трения. Вдоль этой наклонной площадки будет действовать вычисленное напряжение сдвига. Также отметим, что напряжение сдвига не является касательным напряжением. Напряжение сдвига в критерии Мора – Кулона представляет собой разность касательного напряжения, стремящегося срезать материал вдоль площадки скольжения, к нормальному напряжению, прижимающему сдвигаемую часть бесконечно малого объема грунта к этой площадке скольжения.

Формула (49) представляет собой частный случай всех других возможных решений. Поэтому справедливость применения зависимости (49) ограничена. Эта зависимость применима в наименьшем количестве случаев. Именно эта зависимость (49) является аналогом решения Евгеньева – Казарновского. Разница между решением (49) и классическим представлением Евгеньева – Казарновского состоит в том, что при применении зависимости (49) результат расчета нужно сравнивать со сцеплением, а в традиционном расчете вычисляется безопасная нагрузка, которую нужно сравнивать с давлением, передаваемым насыпью. Эта аналогичность двух расчетов показана нами при переходе от критерия (18) к формуле (24). С зависимостью (49) можно поступить аналогичным образом, получив формулу (24).

Этой статьей авторы хотят заложить начало большой работы, посвященной правилам определения первой критической нагрузки на слабое основание насыпей. Результатом данной статьи являются формулы (46)–(49), которые необходимо развить в последующих публикациях на ряд условий, характерных для быстрой и медленной отсыпки насыпей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нашей работе выполнен анализ различных методов расчета слабых оснований земляных сооружений. Четко показано, что расчет слабых оснований дорожных насыпей выполняется на первую критическую нагрузку. При этом приведены достоинства расчетов, полученных применением теории предельного равновесия грунта и метода конечных эле-

ментов. Отмечены проблемы, возникающие при использовании некоторых программных продуктов. Показано, что классическое решение Евгеньева – Казарновского о первой критической нагрузке является частным случаем более общей формулы (46). Учитывая накопленные знания специалистами дорожной отрасли, наиболее рационально развивать решение старших коллег И.Е. Евгеньева и В.Д. Казарновского. Именно этот путь приведет к быстрому совершенствованию нормативного расчета. Кроме того, расчет по первой критической нагрузке обладает запасом прочности, связанным с тем, что предельное состояние наступает только в наиболее опасной точке, а не по всей линии скольжения. Рассмотренные нами аварии явным образом свидетельствуют, что такой запас прочности необходим.

Задачами дальнейшего решения являются:

1. Преобразование расчета в напряжениях к сдвигу к расчету в безопасных давлениях, под которыми понимается первая критическая нагрузка.

2. Учет в расчетных формулах порового давления, влияющего на устойчивость основания в нестабилизированном состоянии. Это можно сделать введением эффективного сцепления и угла внутреннего трения, которые необходимо определить экспериментально, обработав опытные данные консолидированных недренированных трехосных испытаний методами математической статистики.

3. Сопроводить полученные результаты графоаналитическим методом, позволяющим облегчить расчеты, или компьютерной программой.

В завершении статьи авторы хотят выразить благодарность своим предшественникам, работавшим в этой области инженерных знаний. Труды наших коллег позволили приобрести начальные знания и определить свой собственный путь в расчетах слабых оснований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ellithy G.S., Stark T.D. Case Study: Unsaturated Embankment Failure on Soft Soils. // J. Geotech. Geoenviron. Eng., 2020, 146(12): 05020011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002382](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002382)
2. Debasis R., Raghvendra S. Failure of Two High Embankments at Soft Soil Sites. // 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering: 2008, Paper No 8.06b. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0887-3828\(2008\)22:6\(373\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0887-3828(2008)22:6(373))
3. Hadjigeorgiou J., Kyriakou E., Papanastasiou P. A Road Embankment Failure Near Pentalia in Southwest Cyprus // In: Int. Symp. Stab. Rock Slopes Open Pit Min. Civ. Eng. The South African Institute of Mining and Metallurgy, Cape Town, 2006, pp 343–352.
4. Gu S., Liu W., Ge M. Failure and Remediation of an Embankment on Rigid Column-Improved Soft Soil: Case Study // Hindawi, Advances in Civil Engineering, Volume 2020, Article ID 2637651. <https://doi.org/10.1155/2020/2637651>
5. Барвахов В.А., Болдырев Г. Г., Уткин М.М. Расчет осадок и кренов сооружений с учетом неопределенности свойств грунтовых оснований // Геотехника. 2016. № 1. С. 12–29.
6. Богомолов А.Н., Богомолова О.А., Ушаков А.Н. Два подхода к определению областей пластических деформаций в однородном основании ленточного фундамента // Construction and Geotechnics. 2021. Т. 12, № 3. С. 105–116. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2021.3.11>
7. Бартоломей Л.А., Богомолова О.А., Гейдт В.Д., Гейдт А.В. Сопоставление величин расчетного сопротивления грунтового основания ленточного фундамента, полученных разными методами // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Вып. 3–4(92). С. 5–14.
8. Буй Ч.Ш. Длительная устойчивость водонасыщенных оснований насыпей // Вестник МГСУ. 2006. № 1. С. 61–38.
9. Богомолов А.Н., Ушаков А.Н., Богомолова О.А. Напряженно-деформированное состояние упругой полуплоскости при действии нагрузок, распределенных по полюсу // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архит. 2010. Вып. 20 (39). С. 5–20.
10. Богомолов А.Н., Богомолова О.А., Богомолов С.А. Решение смешанной задачи теории упругости и теории пластичности для однородного основания и его сопоставление с экспериментальными данными // Известия вузов. Строительство. 2024. №4. С. 5–22.
11. Богомолова О.А., Жиделев А.В. Расчет устойчивости системы «основание – насыпь» // Construction and Geotechnics. 2021. Т. 12, № 4. С. 19–36. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2021.4.02>
12. Тер-Мартirosян З.Г., Сидоров В.В., Олодо Т.Д. Напряженно-деформированное состояние дамбы и ее основания с учетом их взаимодействия // Инженерная геология. 2011. № 6. С. 30–34.
13. Hoek E., Brown E.T. Practical estimates of rock mass strength // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1997. Vol. 34. No. 8. Pp. 1165–1186.
14. Li Bin, et al. Modification of linear regression method for rock shear strength parameters under triaxial condition // Rock and Soil Mechanics. 2022. 43(10). Pp. 2689–2697. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2022.5637>
15. Jitsangiam P., et al. A new mechanistic framework for evaluation of cyclic behaviour of unsaturated unbound granular materials. // International Journal of GEOMATE 13(39) (2017). Pp. 111–123. <https://doi.org/10.21660/2017.39.95681>
16. Yawei li., et al. Mechanical properties of intact rock and fractures in welded tuff from Newberry volcano // Proceedings, Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 30 - February 1, 2012. SGP-TR-191.
17. Строкова Л.А. Учет переуплотнения грунтов в расчетах оседания земной поверхности при

сооружении туннелей // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316, № 1. С. 147–151.

18. Жабко А.В. Теория расчета устойчивости откосов и оснований. Анализ, характеристика и классификация существующих методов расчета устойчивости откосов // Известия Уральского государственного горного университета. 2015. № 4. С. 45–57.

19. Малышев М.В. О линиях скольжения и траекториях перемещения частиц в сыпучей среде // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1971. № 6. С. 1–5.

20. Караулов А.М., Королев К.В., Шохирев М.В. Оценка несущей способности двухслойных грунтовых оснований // Известия вузов. Строительство. 2020. № 11. С. 18–27.

21. Шохирев М.В., Караулов А.М., Королев К.В. Расчет несущей способности двухслойного грунтового основания для наклонной нагрузки // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2023. № 6. С. 2–6.

22. Шохирев М.В. К методике расчета несущей способности двухслойных оснований // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3. С. 57–66.

23. Королев К. В. Канонические уравнения статики сыпучей среды при малом влиянии удельного веса грунта и решение задачи Прандтля // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2012. № 5. С. 2–6.

24. Караулов А.М., Королев К.В., Кузнецов А.О. К оценке несущей способности грунтовых оснований. // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2022. № 2. С. 2–8.

25. Шашенко А.Н., Смирнов А.В., Хозяйкина Н.В. Оценка начального поля напряжений при проектировании подземных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12. С. 37–49.

26. Каспарьян Э.В., Федотова Ю.В., Кузнецов Н.Н. Развитие представлений о естественном напряженном состоянии массивов скальных пород // Вестник Кольского РАН научного центра. 2019. №3(11). С. 65–79.

REFERENCES

1. Ellithy G.S., Stark T.D. Case Study: Unsaturated Embankment Failure on Soft Soils. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2020. 146 (12): 05020011. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002382](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002382)
2. Debasis R., Raghvendra S. Failure of Two High Embankments at Soft Soil Sites. *Proc. 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*: 2008: 8.06b. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0887-3828\(2008\)22:6\(373\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0887-3828(2008)22:6(373))
3. Hadjigeorgiou J., Kyriakou E., Papanastasiou P. A Road Embankment Failure Near Pentalia in Southwest Cyprus. *In: Int. Symp. Stab. Rock Slopes Open Pit Min. Civ. Eng. The South African Institute of Mining and Metallurgy, Cape Town*. 2006: 343–352.
4. Gu S., Liu W., Ge M. Failure and Remediation of an Embankment on Rigid Column-Improved Soft Soil: Case Study. *Hindawi, Advances in Civil Engineering*. 2020: 2637651. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/2637651>

5. Barvashov V.A., Boldyrev G.G., Utkin M.M. Calculation of settlements and tilts of engineering structures taking into account uncertainty of foundation soil properties. *Geotechnics*, 2016. 1: 4–21. (In Russ.)

6. Bogomolov A.N., Bogomolova O.A., Ushakov A.N. Two approaches for determining areas of plastic deformation in a homogeneous base foundation. *Construction and Geotechnics*. 2021. 12 (3): 105–116. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2021.3.11>

7. Bartolomey L.A., Bogomolova O.A., Geidt V.D., Geidt A.V. Comparison of the values of the calculated resistance of the soil base of the ribbon foundation obtained by different methods. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture*. 2023. 3-4 (92): 5–14. (In Russ.)

8. Bui T.S. Long-term stability of water-saturated embankment bases. *MGSU Bulletin*. 2006. 1: 61–68. (In Russ.)

9. Bogomolov A.N., Ushakov A.N., Bogomolova O.A. Stress-strain state of elastic half-plane action for the loads distributed over the band. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*. 2010. 20 (39): 5–20. (In Russ.)

10. Bogomolov A.N., Bogomolova O.A., Bogomolov S.A. Solution of the mixed problem of the theory of elasticity and the theory of soil plasticity for a homogeneous base and its comparison with experimental data. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2024. (4): 5–22. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2024-784-4-5-22>

11. Bogomolova O.A., Zhidlev A.V. Calculation of the “base – embankment” system stability. *Construction and Geotechnics*. 2021. 12 (4): 19–36. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2021.4.02>

12. Ter-Martirosian Z.G., Sidorov V.V., Olodo T.D. The stress-strain state of the dam and its base, taking into account their interaction. *Engineering geology*. 2011. 6: 30–34.

13. Hoek E., Brown E.T. Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 1997. 34 (8): 1165–186.

14. LI Bin, et al. Modification of linear regression method for rock shear strength parameters under triaxial condition. *Rock and Soil Mechanics*. 2022. 43 (10): 2689–2697. DOI: <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2022.5637>

15. Jitsangiam P., et al. A new mechanistic framework for evaluation of cyclic behaviour of unsaturated unbound granular materials. *International Journal of GEOMATE*. 2017. 13 (39): 111–123. DOI: <https://doi.org/10.21660/2017.39.95681>

16. Yawei li., et al. Mechanical properties of intact rock and fractures in welded tuff from Newberry volcano. *Proceedings, Thirty - Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California. January 30 - February 1*. 2012. SGP-TR-191.

17. Strokova L.A. The effect of over consolidation ratio of soils for design a surface settlements due to tunneling. *News of Tomsk Polytechnic University*. 2010. 316 (2): 35–37. (In Russ.)

18. Zhabko A.V. The theory of calculating the stability of slopes and foundations. Analysis, characteristics and classification of existing methods for calculation

ing the stability of slopes. *Izvestiya of the Ural State Mining University*. 2015. 40 (4): 45–57. (In Russ.)

19. Malyshev M.V. On sliding lines and trajectories of particle movement in a loose medium. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1971. 6: 1–5. (In Russ.)

20. Karaulov A.M., Korolev K.V., Shokhirev M.V. Estimation of bearing ability the two-layer earth bases. *News of higher educational institutions. Construction*. 2020. 11: 18–27. (In Russ.)

21. Shohirev M.V., Karaulov A.M., Korolev K.V. Calculation of the bearing capacity of a two-layer soil base under an inclined load. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2023. 6: 2–6. (In Russ.)

22. Shokhirev M. V. Additions to the method of calculating the load-bearing capacity of two-layer foundations. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022. 62: 57–66. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.52170/1815-9265_2022_62_57.

23. Korolev K.V. Canonical equations of statics in loose medium with a little effect of specific weight of soil and solution of the Prandtl problem. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2012. 5: 2–6. (In Russ.)

24. Karaulov A.M., Korolev K.V., Kuznetsov A.O. On the assessment of the bearing capacity of soil bases. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2022. 2: 2–8. (In Russ.)

25. Shashenko A.N., Smirnov A.V., Khozyaykina N.V. Initial stress field estimation in underground mine planning. *Gornyy informatsionno - analiticheskiy byulleten'*. 2017. 12: 37–49. (In Russ.)

26. Kasparyan E.V., Fedotova I.V., Kuznetsov N.N. Development of Conceptions about the Natural Stress State of Hard Rock Massifs. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*. 2019. 3 (11): 65–79. (In Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Александров А.С. Анализ состояния вопроса, вывод зависимости для расчета первой критической нагрузки на слабое основание насыпи. Написание текста статьи.

Александрова Н.П. Анализ методов расчета оснований насыпи методами теории предельного равновесия грунта. Общее редактирование.

Семенова Т.В. Анализ методов расчета слабых оснований насыпей численными методами строительной механики. Общее редактирование.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

A.S. Alexandrov Analysis of the scientific discourse, derivation of the dependence for calculating the first critical load on a weak embankment base. Text writing.

N.P. Alexandrova Analysis of methods for calculating embankment bases by the methods of the theory of limit equilibrium of soil. General editing.

T.V. Semenova Analysis of methods for calculating weak embankment bases using numerical methods of structural mechanics. General editing.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александров Анатолий Сергеевич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Строительство

и эксплуатация дорог» института «Автомобильно-дорожное, промышленное и гражданское строительство» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644080, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>,

Researcher ID: I-8860-2018,

SPIN-код: 7573-4997,

Author ID (Scopus): 57191531014,

e-mail: aleksandrov00@mail.ru

Александрова Наталья Павловна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» института «Автомобильно-дорожное, промышленное и гражданское строительство» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644080, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5534-6338>,

SPIN-код: 6893-9560,

Author ID (Scopus): 57191525817,

e-mail: nata26.74@mail.ru

Семенова Татьяна Викторовна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» института «Автомобильно-дорожное, промышленное и гражданское строительство» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644080, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1921-8531>,

SPIN-код: 6344-3503,

Author ID (Scopus): 57793795915,

e-mail: sibadisemenova@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandrov Anatoly S. – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Road Construction and Maintenance, Civil Engineering Institute, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644080).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>,

Researcher ID: I-8860-2018,

SPIN-code: 7573-4997,

Author ID (Scopus): 57191531014,

e-mail: aleksandrov00@mail.ru

Aleksandrova Nataliya P. – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Road Construction and Operation, Civil Engineering Institute, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644080).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5534-6338>,

SPIN-code: 6893-9560,

Author ID (Scopus): 57191525817,

e-mail: nata26.74@mail.ru

Semenova Tatiana V. – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Road Construction and Maintenance, Civil Engineering Institute, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644080).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1921-8531>,

SPIN-code: 6344-3503,

Author ID (Scopus): 57793795915,

e-mail: sibadisemenova@yandex.ru

Научная статья
УДК 691.32
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-672-683>
EDN: ZNCLGZ



МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ БЕТОН НА КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ ДЛЯ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ С УЧЕТОМ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ КИТАЯ

Р.В. Лесовик ✉, Чжан Сюань

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

✉ ответственный автор
ruslan_lesovik@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Мелкозернистый бетон широко используется в строительной отрасли Китая и является самым «революционным» материалом технологии бетонного строительства. За последнее десятилетие в связи с быстрым развитием городского строительства, освоением земельных ресурсов, характеризующихся особыми природно-климатическими условиями для строительства высотных и супервысотных зданий и сооружений, требуется разработка высокоэффективных мелкозернистых высокопрочных бетонов для создания фундаментов. Особую значимость в современном строительстве приобретают свайные фундаменты.

Результаты. В статье приведены результаты по получению мелкозернистых бетонов классов В25 и В30 на разработанных композиционных вяжущих для свайных фундаментов с повышенными показателями водопроницаемости W8 и морозостойкости F300.

Обсуждение и заключение. Изучение микроструктуры показало плотное зарастание новообразованиями пор цементного камня, на контактной зоне с заполнителями равномерной бахромой распределились гидросиликаты кальция и алюминия, плотно сросшиеся в единый гидрогранат. Составы мелкозернистых бетонов, приготовленных с применением композиционных вяжущих, показали, что в разработанных бетонах снижается расход цемента на 12% с обеспечением требуемой нормативной прочности и обеспечением повышенной водопроницаемости и морозостойкости. Учитывая специфические природно-климатические условия грунтов Китая, разработанный состав обеспечит высокую водостойкость и долговечность мелкозернистых бетонов для свайных фундаментов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мелкозернистый бетон, композиционное вяжущее, портландцемент, минеральный наполнитель, свайный фундамент, грунты, микроструктура, прочность

Статья поступила в редакцию 26.06.2025; одобрена после рецензирования 18.08.2025; принята к публикации 22.08.2025.

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: Лесовик Р.В., Чжан Сюань. Мелкозернистый бетон на композиционном вяжущем для свайных фундаментов с учетом природно-климатических условий Китая // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, №. 4. С. 672-683. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-672-683>

© Лесовик Р.В., Чжан Сюань, 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-672-683>

EDN: ZNCLGZ

FINE-GRAINED CONCRETE WITH COMPOSITE BINDER FOR PILE FOUNDATIONS IN TERMS OF ENVIRONMENT AND CLIMATE IN CHINA

Ruslan V. Lesovik ✉, Zhang Xuan

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

✉ corresponding author
ruslan_lesovik@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Fine-grained concrete has been widely used in construction industry of China and has remained the most "revolutionary" material in concrete construction technology over the past 10 years. Due to the rapid development of urban construction, land development, characterized by special environment and climate conditions for building high-rise and super high-rise buildings and structures, the development of highly efficient fine-grained high-strength concrete for foundations is required. Pile foundations are of particular importance in modern construction.

Results. The article presents the results of obtaining fine-grained concretes of B25 and B30 classes with the developed composite binders for pile foundations having an increased water permeability W8 and frost resistance F300.

Discussion and conclusion. The study of the microstructure showed a dense overgrowth of the pores of the cement stone, calcium and aluminum hydrosilicates were distributed in a uniform fringe on the contact zone with the aggregates, tightly fused into a single hydrogranate. It has been shown that for the compositions of fine-grained concretes with composite binders the cement consumption in the developed concretes is reduced by 12 per cent, while ensuring the required normative strength and increased water permeability and frost resistance. Taking into account the specific environment and climate conditions for soils in China, the developed composition will ensure high water resistance and durability of fine-grained concretes for pile foundations.

KEYWORDS: fine-grained concrete, composite binder, portland cement, mineral filler, pile foundation, soils, microstructure, strength

The article was submitted: June 06, 2025; **approved after reviewing:** August 18, 2025; **accepted for publication:** August 22, 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. Ruslan V. Lesovik, Zhang Xuan. Fine-grained concrete with composite binder for pile foundations in terms of environment and climate in China. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (4): 672-683. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-672-683>

© Ruslan V. Lesovik, Zhang Xuan, 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время Китай является мировым лидером в реализации масштабных проектов городского строительства, что обусловлено стремительной урбанизацией и необходимостью обеспечения комфортных условий жизни для более чем 1,4 млрд чел. [1, 2]. Современные строительные технологии, инновации в проектировании и устойчивое развитие стали основой для трансформации городов в умные, экологичные и функциональные пространства. В стране широко используют самые передовые технологии строительства, применение которых обеспечивает быстрые сроки строительства зданий и сооружений различного назначения [3, 4]. Строительные компании широко используют сборные железобетонные конструкции, а также широко применяют промышленные и бытовые отходы при производстве строительных материалов. Особое место в общем объеме строительства занимает строительство монолитных и панельных домов, которые обеспечивают высокие темпы строительства [5, 6, 7]. Занимая значительную территорию, страна характеризуется наличием разнообразных грунтов, от слабых водонасыщенных почв до скальных пород [8, 9, 10, 11]. Так, в Пекине грунты представлены многослойной структурой: верхние слои – насыпные и песчаные, нижние – глинистые и известняковые [12, 13]. В Китае встречается несколько десятков видов почв, что связано с разнообразием природно-климатических условий [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21]. В северо-восточной части страны распространены тёмные луговые почвы с большим количеством перегноя и минеральных элементов – азота, фосфора, калия; в течение рек Сунгари и Нуьцзян залегают луговые чернозёмные почвы; в низовьях Сунгари и Уссури встречаются лугово-болотные и глеево-луговые почвы, для

освоения которых необходимы дренажные работы; в горных и холмистых районах залегают бурые лесные почвы, располагающиеся в основном по крутым склонам, и подходят только для лесопосадок; в северо-западной части страны представлены серо-бурые почвы пустынь, а также серозёмы, каштановые и светлые горностепные и горно-луговые почвы; в побережье Бохайского залива и Жёлтого моря засоление земель связано с деятельностью моря; в равнинах господствуют краснозёмы с низким содержанием органического вещества и минеральных элементов, большой вязкостью и повышенной кислотностью [22, 23, 24, 25]. На формирование почвенных ресурсов Китая также повлияло многовековое выращивание риса, что привело к появлению особых разновидностей почв, например, «рисовых болотистых» на юге и «восточно-карбонатных» на Лесовом плато [26, 27, 28, 29]. Дополнительную сложность создают климатические факторы: страна подвержена стихийным бедствиям, таким как наводнения и оползни, что требует усиления устойчивости фундаментов [30, 31].

Свайные фундаменты являются фундаментами глубокого заложения и широко используются при строительстве гражданских и жилых зданий и сооружений мостов и гаваней. Это особенно актуально для мягких грунтов, где армирование фундамента не подходит или существуют особые грунты, такие как разжижаемые грунты, влажный лёсс, экспансивные грунты и сезонно замерзающие грунты (рисунки 1, 2, 3, 4). На рисунках 1 и 2 приведены фотографии города Хайлара, построенного на свайных фундаментах. Особых условий установки и эксплуатации железобетонных конструкций требуют различные климатические зоны Китая, включающие зоны от вечной мерзлоты до субтропиков.



Рисунок 1 – Панорама города Хулун-Буир

Источник: <https://ru.lovepik.com/image-500998345/panoramic-view-over-hailar-city.htm>
(дата обращения: 16.04.2025).

Figure 1 – Panorama of Hulun Buir city

Source: <https://ru.lovepik.com/image-500998345/panoramic-view-over-hailar-city.htm> (accessed: 16.04.2025).



Рисунок 2 – Панорама жилого массива на реке Хайлар

Источник: <https://stock.adobe.com/ru/search?k=hulunbuir> (дата обращения: 16.04.2025).

Figure 2 – Panorama of a residential area on the Khaylar River

Source: <https://stock.adobe.com/ru/search?k=hulunbuir> (accessed: 16.04.2025).



Рисунок 3 – Побережье Бохайского залива

Источник: <https://www.tutu.ru/geo/china/article/resorts/> (дата обращения: 16.04.2025).

Figure 3 – The coast of the Bohai Bay

Source: <https://www.tutu.ru/geo/china/article/resorts/> (accessed: 16.04.2025).



Рисунок 4 – Панорама города Хайлара

Источник: <https://zhuanlan.zhihu.com/p/370454873> (дата обращения: 16.04.2025).

Figure 4 – Panorama of Hailar city

Source: <https://zhuanlan.zhihu.com/p/370454873> (accessed: 16.04.2025).

Проблема разработки свайных фундаментов с высокими технико-экономическими показателями представляет особую значимость при возведении строительных объектов Китая. При изготовлении свайных фундаментов используют мелкозернистые бетоны, в качестве вяжущего применяют портландцементы, расход которых в составах бетонов достаточно велик. Для оптимизации технико-экономических показателей железобетонных свай целесообразно использовать композиционное вяжущее, способствующее повышению физико-механических характеристик и снижению экономических затрат на их производство. В связи с вышеизложенным целью настоящей работы явилась разработка составов мелко-

зернистых бетонов с использованием композиционных вяжущих.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При выполнении работы использовали следующие материалы: портландцемент российского и китайского производства; кварцевый песок северной провинции Китая, отсеб гранитного щебня фракций 5,00–0,63 мм, пластифицирующая добавка Melment F10. Основные физико-механические характеристики и химический состав клинкеров портландцементов российского и китайского производителей: ЦЕМ 0 42,5Н ЗАО «Белгородский цемент» и китайской фирмы West China Cement приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Химический состав ЦЕМ 0 42,5Н ЗАО «Белгородский цемент» и китайского портландцемента Хайлар Мэнси
Источник: составлено авторами.

Table 1

Chemical composition of 0 42.5N CEM from Belgorod Cement CJSC and from Chinese Hailar Mansi Portland cement
Source: compiled by the authors.

Марка цемента	Химический состав, масс. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Прочее
Белгородский цемент								
ЦЕМ 0 42,5Н	19,02	4,90	3,42	65,98	1,45	3,44	0,57	1,22
Цемент фирмы West China Cement								
ЦЕМ 0 42,5Н	20,27	4,53	3,41	64,98	1,3	2,89	0,47	2,15

Таблица 2

Строительно-технические характеристики портландцемента
Источник: составлено авторами.

Table 2

Construction and technical characteristics of Portland cement
Source: compiled by the authors.

Наименование показателя	ЦЕМ 0 42,5Н «Белгородский цемент»	Цемент Хайлар Мэнси
Минеральный состав клинкера, масс. %	59,0	59,0
C ₃ S	18,8	23,4
C ₂ S	7,0	4,7
C ₃ A	13,1	12,4
C ₄ AF		
Удельная поверхность, м ² /кг	330	325
Нормальная густота цементного теста, %	25,6	28,6
Сроки схватывания, мин, начало/конец	95/308	189/347
Предел прочности в возрасте 2 сут, МПа: изгиб/сжатие	5,8/19,2	4,2/19,6
Предел прочности в возрасте 28 сут, МПа: изгиб/сжатие	8,1/50,1	7,6/45,3
Предел прочности при сжатии после тепловлажностной обработки, МПа	39,5	-
Тонкость помола, остаток на сите № 008, %	7,0	3,8
Удельная эффективная активность естественных радионуклидов A _{эфф} , Бк/кг	2,42	-

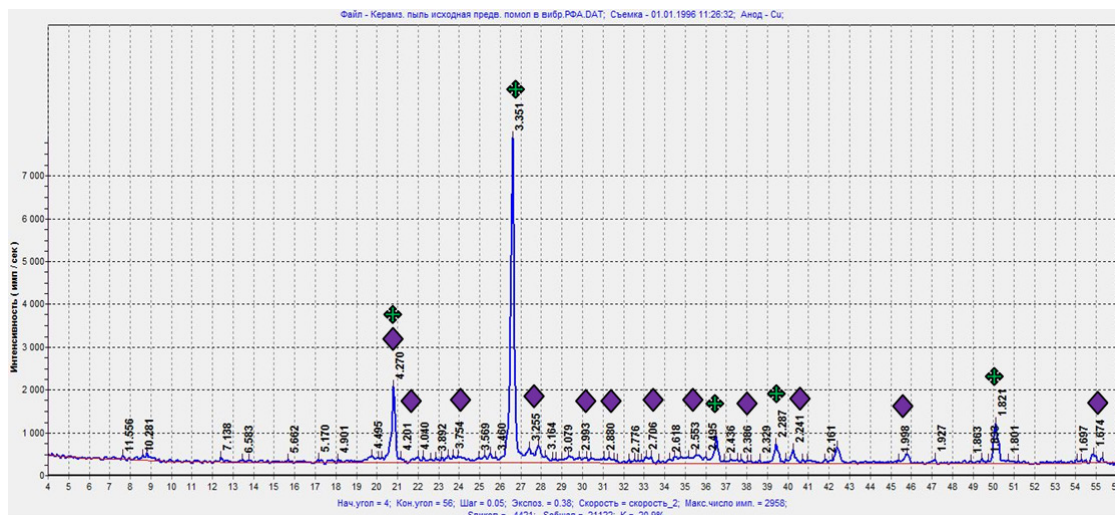


Рисунок 5 – Рентгенограмма кварцевого песка
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Radiograph of quartz sand
Source: compiled by the authors.

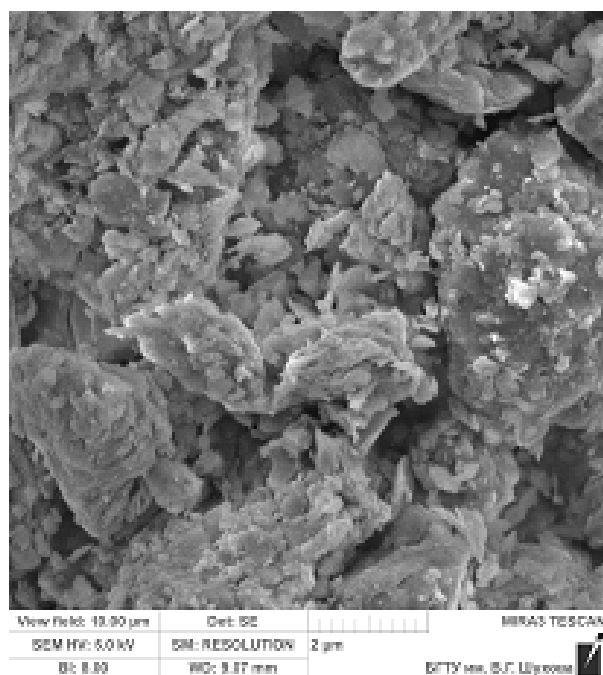


Рисунок 6 – Микроструктура кварцевого песка
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Quartz sand microstructure
Source: compiled by the authors.

Таблица 3

Основные показатели качества композиционных вяжущих, полученных в вибрационной мельнице
Источник: составлено авторами.

Table 3

Main quality indicators of composite binders obtained in a vibrating mill
Source: compiled by the authors.

№ составов	Составы, %			НГ, %	Сроки схватывания, мин		R _{сж} , МПа	
	Цемент	Кварцевый песок	Melment F10		начало	конец	2 сут	28 сут
Время механоактивации – 30 мин								
1	100	-	0,8	28,2	171	210	46,9	88,8
2	90	10	0,8	32,4	179	223	47,8	102,9
3	80	20	0,8	33,1	189	234	47,1	97,5
4	70	30	0,8	38,7	197	237	45,9	87,3

Качество цемента определяли по ГОСТ 30744–2001* «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка».

Кварцевый песок. В качестве минерального наполнителя применялся местный кварцевый песок (около города Хайлара). Представительная проба кварцевого песка исследовалась по гранулометрическому составу, был проведен химический, рентгенофазовый и микроструктурный анализ. Рентгеноструктурным анализом на приборе ДРОН-3.0 было установлено, что минеральный состав песка представлен в основном низкотемпературным тригональным кварцем, базальные отражения 0,427; 0,335; 0,246; 0,229; 0,213; 0,182; 0,167 нм (рисунок 5).

Микроструктура кварцевого песка представлена на рисунке 6.

В работе была использована пластифицирующая добавка Melment F10.

Вода в исследованиях применялась по ГОСТ 23732–2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия». Использовалась Белгородская водопроводная вода, pH которой составляет 7,1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Композиционные вяжущие получали при совместном помоле портландцемента, кварцевого песка (карьер близ города Хайлара) и пластифицирующей добавки Melment F10 в вибрационной мельнице, активированных в течение 30 мин. Основные показатели качества полученных композиционных вяжущих в вибрационной мельнице приведены в таблице 3.

При проведении исследований было установлено, что наиболее эффективным является состав при соотношении цемента и песка: 90/10 и введении пластифицирующей добавки в количестве 0,8%. Указанный состав превышает показатель прочности бездобавочного цемента на 15,9%, состав с содержанием кварцевого песка 20% превышает прочность бездобавочного цемента на 9%. В дальнейших исследованиях при разработке мелкозернистых бетонов использовали композиционное вяжущее, полученное при активации портландцемента и кварцевого песка в течение 30 мин в вибрационной мельнице и с введением пластифицирующей добавки Melment F10 в количестве 0,8%, обеспечивающее получение прочности 102,9 МПа в возрасте 28 сут.

Были разработаны мелкозернистые бетоны различных классов на предложенном композиционном вяжущем составе 90% цемента и 10% кварцевого песка, отсева гранитного щебня фракций 5,00–0,63 мм, кварцевом песке и пластифицирующей добавки в лабораторных условиях и апробированы в производственных условиях предприятия железобетонных изделий города Хайлара.

Подбор состава бетона осуществлялся в соответствии с нормативной документацией. При подборе составов мелкозернистых бетонов и проведении испытаний использовали местные материалы: песок кварцевый мелкий, удовлетворяющий требованиям нормативной документации для использования в бетонах (модуль крупности – 1,8; насыпная плотность 1450 кг/м³); отсев гранитного щебня фракций

5,00–0,63 мм; пластифицирующая добавка Melment F10; вода в соответствии с нормативными требованиями для использования в мелкозернистых бетонах. Подготовка и испытания бетонных смесей и бетонов осуществлялась в соответствии с нормативной документацией на мелкозернистые бетоны для свайных фундаментов^{1,2,3,4,5}.

Разработанные составы бетонных смесей для свайных фундаментов и их характеристики приведены в таблице 4.

Полученные мелкозернистые бетоны соответствуют классам В25 и В30 с водопроницаемостью W8 и морозостойкостью 300. Анализ составов мелкозернистых бетонов, приготовленных с применением композиционных вяжущих, показал, что разработанные бетоны

снижают расход цемента на 12% с обеспечением требуемой нормативной прочности, обеспечивают повышенную водопроницаемость и морозостойкость.

Таким образом, получен высокопрочный мелкозернистый бетон оптимального состава и плотной структуры с высокими физико-механическими и эксплуатационными показателями, что указывает на целесообразность применения композиционных вяжущих.

Изучена микроструктура проб бетонных образцов составов № 2 и 4 (рисунок 7). Отмечается плотное обрастание зерен заполнителя продуктами гидратации композиционного вяжущего: гидросиликатами кальция и алюминия. Микроструктура проб – мелкозернистая и равномерно распределенная.

Таблица 4
Составы бетонных смесей для свайных фундаментов и их основные характеристики
Источник: составлено авторами.

Table 4
Compositions of concrete mixtures for pile foundations and their main characteristics
Source: compiled by the authors.

№	Класс бетона	Удобукладываемость	Состав компонентов бетона, кг						Водонепроницаемость	Морозостойкость
			Цемент	Композиционное вяжущее	Песок кварцевый	Отсев гранитного щебня	Добавка Melment F10			
							кг	%		
1	B 25	П2	450	-	580	1260	2,92	0,65	W6	300
2	B25	П2	-	400	605	1295	2,92	0,65	W8	300
3	B30	П2	470	-	590	1260	3,05	0,65	W6	300
4	B30	П2	-	410	625	1295	3,05	0,654	W8	300

¹ СНиП 2.02.03–85. Свайные фундаменты. М.: ФГУП ЦПП, 2006. 46 с.

² СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. Введ. 2011-05-20. М.: ОАО «ЦПП», 2011. 86 с.

³ Леонарде Д. Основания и фундаменты. М., 1968.

⁴ СП 52-102–2004. Предварительно напряженные железобетонные конструкции. М., 2005.

⁵ СНиП 2.02.03–83*. Свайные фундаменты. М.: Стройиздат, 1986.

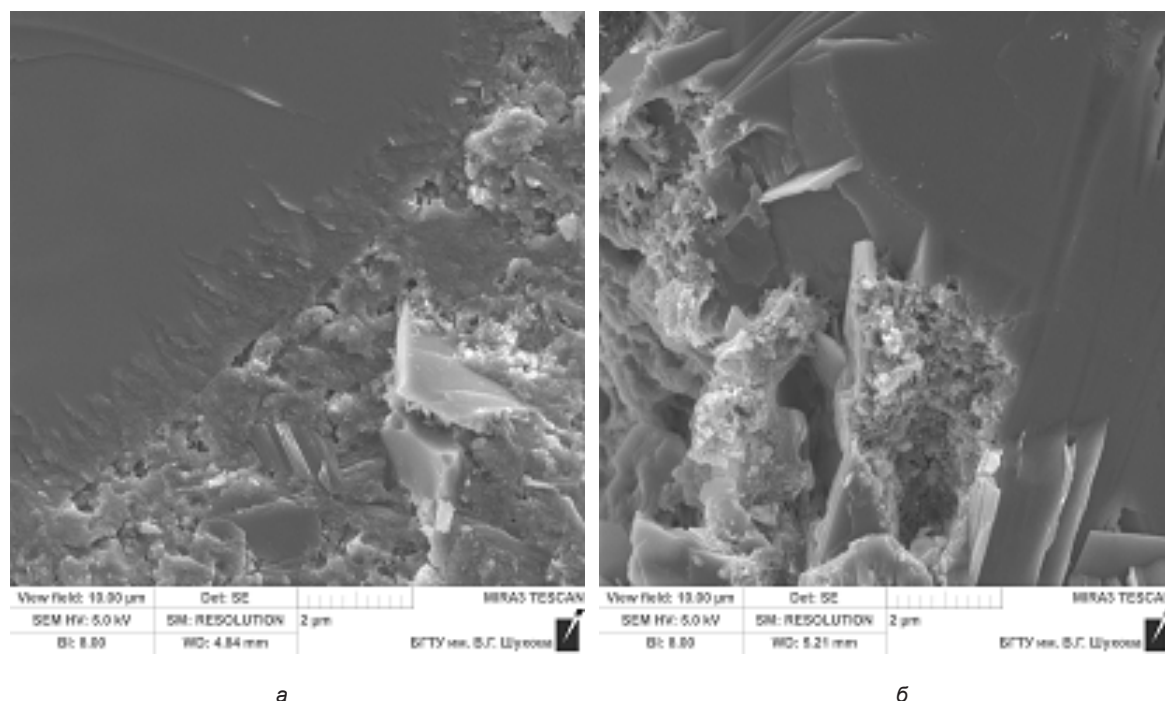


Рисунок 7 – Микроструктура проб бетонных образцов составов № 2 и 4 в возрасте 28 сут: а – состав № 2; б – состав № 4
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Microstructure of concrete samples of compositions No. 2 and No. 4 at the age of 28 days
Source: compiled by the authors.

К 28-суточному возрасту отмечается плотное зарастание новообразованиями пор цементного камня (см. рисунок 7). На контактной зоне с заполнителями равномерной бахромой распределены гидросиликаты кальция и алюминия, плотно сросшиеся в единый гидрогранат. Отчетливо видна заросшая граница между заполнителем и кристаллическими новообразованиями гидратированного композиционного вяжущего. Анализ микроструктуры согласуется с результатами физико-механических испытаний. Отмечается, что минеральный наполнитель, равномерно распределенный в вяжущем, формирует тончайшие подложки, на которых прорастают продукты гидратации композиционного вяжущего, создающие пространственную структуру. Отмечается, что в заводских составах микроструктура цементного камня более однородная, равномерно-зернистая и более пористая, что обусловлено приготовлением бетонной смеси в бетоносмесителе.

Из разработанных составов бетонной смеси повышенной прочности были изготовлены сваи с классом бетона В27,5 и испытаны в соответствии с требованиями ГОСТа. Выпущенные сваи были использованы при усилении

фундаментов жилого дома. Анализ полученных результатов свидетельствует о высокой эффективности использования композиционных вяжущих при приготовлении мелкозернистых бетонов для свайных фундаментов, что позволяет рекомендовать их для промышленного внедрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили установить возможность и целесообразность использования разработанных композиционных вяжущих, полученных на основе портландцемента, минеральной добавки – кварцевого песка и пластифицирующей добавки, для изготовления мелкозернистых бетонов для свайных фундаментов. Мелкозернистые бетоны на композиционных вяжущих показали, что разработанные составы соответствуют классам В25 и В30, обеспечивают повышенную водопроницаемость W8 и морозостойкость 300, при снижении расхода портландцемента на 12%. Учитывая специфические природно-климатические условия грунтов Китая, разработанный состав обеспечит высокую водостойкость и долговечность мелкозернистых бетонов для свайных фундаментов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Ru Bao Kh, Tszide S. Construction Economics. Beijing: Beijing Book Co. Inc. 2020. https://books.google.ru/books?id=xLlwEAAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs_atb&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (accessed: 05.04.2024).
2. Guiqing L. Looking Back on the Past 70 Years, We Will Create a High-Quality Future for the Construction Industry. *Architecture*. 2019; 12–19. DOI: <https://doi.org/CNKI:SUN:JANZ.0.2019-02-005>.
3. Jinfeng L. Main Problems and Analysis of the Industrial Structure of the Construction Industry of China. *Construction Economics*. 2003; 3–8. DOI: <https://doi.org/CNKI:SUN:JZJJ.0.2003-08-000>.
4. Jingchen Yu. Direct investments of Chinese enterprises in construction in Russia: evaluation of the effectiveness. *Izvestiya SpbGEU*. 2023; 4: 198–203. URL: <https://unecon.ru/wp-content/uploads/2023/08/izvestiya-spbgeu-4-2023.pdf> (accessed: 28.02.2024).
5. Lentin Ch, Yongqing M. Occupying the Managerial Heights of the Future Market — Thinking about the Current Restructuring of the Construction Industry. *Management of a Construction Company*. 2007; 37–39. DOI: <https://doi.org/CNKI:SUN:SGQY.0.2007-09-013>.
6. Liqin Ch, Boyi S, Jianshuang F. Study of the Business Structure of the Construction Industry in China. *Construction Economics*. 2009; 8–12. DOI: <https://doi.org/CNKI:SUN:JZJJ.0.2009-04-005>.
7. Xu V. How Chinese Construction Companies can Expand Foreign Markets. *Foreign Investment in China*. 2024; 106–108. <https://doi.org/CNKI:SUN:WQZG.0.2024-01-035>
8. Zhang W. Comparative Analysis of Settlement Calculations for Pile Foundations Based on American and Chinese Standards. *Comprehensive Utilization of Fly Ash*. 2022; (36-3). DOI: <https://doi.org/10.58339>.
9. Liu F. Application of Cement Mixing Piles in Infrastructure Projects at the Langqi Block of Fuzhou Area, China (Fujian) Free Trade Zone. *Green Environmental Protection Building Materials*. 2019; (2), 3.
10. Tang J. Application of Cast-in-Place Piles and Prefabricated Piles in Road and Bridge Foundation Construction. *China Kitchen & Bathroom*. 2021; (9), 55–56.
11. Wang J., Shu L., & Bao F. Application of Two Types of Piles in Foundation Treatment at Dayuzhang Pumping Station. *China Water Transport: Lower Half Month*. 2020; (7), 2.
12. Pang M. Research on the Application of Self-Positioning Pile-Driving Vessels in High-Pile Wharf Pile Sinking Construction. *China Water Transport: Lower Half Month*. 2019; 19(5), 2.
13. Chang, L., Xia, S., Wan, H., et al. Application of Cement Fly Ash Piles in Anchor Wall Construction for a Bridge. In *Proceedings of the 15th National Academic Conference on Geotechnical and Foundation Engineering of the Chinese Hydraulic Engineering Society*. 2019.
14. Liang, T., Wu, J., Liao, E., et al. Application of Helical Piles in a Photovoltaic Power Station in Algeria. *China Science and Technology Investment*. 2019; 12, 84, 137.
15. Li W. Numerical Analysis and Application Study of Compacted Gravel Piles in Liquefied Sandy Foundation Reinforcement. *China Science and Technology Investment*. 2020.
16. Zhao T. Application of Pile Axial Force and Lateral Resistance Testing in High-Capacity Static Load Testing. *China Science and Technology Panorama*. 2020. (5), 6.
17. Zhang, X., Bai, Y., He, Z., et al. Study on Horizontal Dynamic Response of Steel Pipe Helical Piles Considering Pile-Soil Interaction. *Chinese Journal of Construction Machinery*. 2019.
18. Sun G. Analysis of Pile Foundation Types and Construction. *Chemical Enterprise Management*. 2018; (13), 1.
19. Xiong T. Analysis of Pile Foundation Types and Applicable Characteristics in Civil Engineering. *Architecture & Decoration*. 2018; (10), 1.
20. Chen J., Ma G., Lü R., et al. Analysis of Pile Foundation Types and Applicable Characteristics in Civil Engineering. *Science and Wealth*. 2017. (35).
21. Liu C., & Guo X. On the Types and Fabrication of Post and Core Crowns. *Journal of Jingmen Vocational and Technical College*. 2004; 19(6), 3.
22. Lei H., Chen L., Xu G., et al. Influence of Cement Types and Tooth Preparation Timing on Microleakage of Fiber Post Crowns. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*. 2010; 14(3), 461–464.
23. Shi Z., Yang J., Li Z., et al. Comprehensive Management of Soil and Water Loss in the Low Mountain and Hilly Areas of Southern Red Soil Regions. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2018; 32(1), 4.
24. Liu X., Wu G., Zhang Y., et al. Effects of Biochar Application Methods on Nutrients and Nitrogen-Phosphorus Transformation-Related Enzyme Activities in Black Soil and Fluvo-Aquic Soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*. 2021; 32(8), 10.
25. Yan H., Yin, Q., Ding, S., et al. Impact of Biochar on Physicochemical Properties and Fungal Community Structure in Loess Soil. *Environmental Science*. 2018. 39(5), 8.
26. Xi Q. Study on Secondary Calcification of Soils in Typical Lithic Calcisol Engineering Afforestation Areas and Suitable Afforestation Techniques (Master's thesis). Beijing Forestry University. 2019.
27. Hu, X., Nan, Z., Wang, S., et al. Adsorption and Desorption Characteristics of Cu, Zn, and Pb in Oasis Irrigation Desert Soil in Arid Regions. *Ecology and Environmental Sciences*. 2009; (6), 181–186.
28. Zhang W., Liu Y., Dong C., et al. Effects of Nitrogen Fertilizer Management on Yield and Nitrogen Use Efficiency of Winter Wheat/Spring Maize in Fluvo-Aquic Soil. *Acta Pedologica Sinica*. 2019; 56(1), 165–175.
29. Su B., Xiang L., Liu S., et al. A Multi-Type Land Soil Ecological Restoration System and Its Working Method (Patent No. CN112090943A). China. 2020.
30. Cheng P., & Wang J. Impact of Freeze-Thaw Cycles on Consolidation and Deformation Characteristics of Undisturbed Over-Wet Soil. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2019; 41(4), 7.
31. Yu D., Shi X., Wang H., et al. Comparative Characteristics of Genetic Classification Alpine Soils and Systematic Classification. *Soils*. 2005; 37(6), 7.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Лесовик Р.В. Формулирование темы, цели и задач исследования. Руководство процессом проведения исследования. Выбор методов исследования. Редактирование текста статьи.

Чжан Сюань Сбор материалов и применение методов исследования. Обработка полученных данных и представление их в виде таблиц. Подготовка текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

R.V. Lesovik Formulating the concept, purpose and objectives of the research. Management of the research process. Selection of the research methods. Editing the manuscript.

Zhang Xuan Gathering Materials and applying research methods. Processing the obtained data and presenting it in the form of tables.. Writing the text of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лесовик Руслан Валерьевич – д-р техн. наук, проф. Белгородского государственного технологического университета В.Г. Шухова, проректор по международной деятельности (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5707-1289>,

SPIN-код: 3873-0296,

Scopus ID: 55934372500,

Researcher ID: I-8160-2018,

e-mail: ruslan_lesovik@mail.ru

Чжан Сюань – аспирант Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, 532339133@qq.com).

e-mail: 532339133@qq.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ruslan V. Lesovik – Dr. of Sci. (Eng.), Prof. Belgorod State Technological University V.G. Shukhov, Vice-Rector for International Affairs (Kostyukova St., 46, Belgorod, 308012).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5707-1289>,

SPIN code: 3873-0296,

Scopus ID: 55934372500,

Researcher ID: I-8160-2018,

e-mail: ruslan_lesovik@mail.ru

Zhang Xuan – postgraduate student of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov (Kostyukova St., 46, Belgorod, 308012).

e-mail: 532339133@qq.com

Научная статья
УДК 69.05
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-684-696>
EDN: REHQDA



ФОРМИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПОТОКОВ С НЕПОСТОЯННЫМИ РАБОЧИМИ КАДРАМИ

Л.Д. Маилян, Н.О. Сизен ✉

Донской государственный технический университет
г. Ростов-на-Дону, Россия

✉ ответственный автор
sizen0263@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Современное строительное производство ведется в основном поточным методом. Время – деньги. А значит, скорость создания конечной продукции играет главную роль. Однако использование поточного метода предполагает бесперебойное функционирование всей организационно-технологической системы. Любой выпавший из нее элемент может привести к срыву всех процессов и в конечном итоге к увеличению срока строительства. Трудовые ресурсы строительства – параметр, который, с нашей точки зрения, правильно учесть не легче, а иногда и сложнее, чем, например, изменяющиеся в цене материалы. Это обусловлено тем, что такие ресурсы – живые, а значит, фактор неопределенности при их учете играет большую роль, чем при расчете других ресурсов. Цель данного исследования состоит в развитии научно-методологического подхода к формированию строительных потоков в условиях дефицита квалифицированных рабочих кадров для сокращения количества простоев и, как следствие, повышения производительности труда. В качестве модели исследования использовалась ситуация, при которой, с одной стороны, в силу технологических особенностей на разных захватках нужно различное число работников, а с другой стороны, существует неопределенность обеспечения рабочей силой в целом.

Материалы и методы. В исследовании мы применяли, прежде всего, математическую статистику. Базу данных для исследования составляли сведения из открытых источников, а также информация, получаемая от строительных подрядных организаций при прохождении производственной практики магистрантами Донского государственного технического университета. Достоверность этих сведений подтверждена в ходе многолетнего сотрудничества предприятий с университетом и достаточно большой выборкой статистических данных. Использовались регулярный мониторинг выполнения норм выработки на исследуемых предприятиях, анализ временных параметров потока, мониторинг потребления ресурсов, анализ качества выполняемых работ. Фиксировались методы решения текущих проблем, связанных с рабочими кадрами. Опыт строительных организаций, в которых проходят производственную практику наши студенты, показал, что весьма продуктивным является использование совмещения профессий, когда рабочий одной профессии временно (от одного дня до нескольких недель) переходит на работу по другой профессии.

Результаты. Исследование позволило: обозначить причины возникновения дефицита и текучести рабочих кадров (отсутствие на рынке труда квалифицированных кадров по требуемой профессии, невысокий уровень заработной платы, небольшой социальный пакет, высокий уровень заболеваемости, сезонный характер некоторых работ и др.); сформулировать предложения по минимизации текучести кадров в строительстве; рассчитать строительный поток с непостоянным составом бригад; предложить мероприятия по нейтрализации неопределенности в обеспечении кадрами строительных потоков (по оптимизации кадровых вопросов в поточном строительстве); разработать предложения по совмещению рабочих профессий; проанализировать результаты внедрения предложенных мероприятий.

Обсуждение и заключение. Практическая ценность работы для строительных организаций заключается в том, что применение наших предложений позволяет решить проблему дефицита рабочих кадров, не используя экономичные методы, не расходуя существенные средства. Полученные результаты нашего исследования прошли практическое внедрение. В дальнейшем желательно было бы провести исследование в области психологии по быстрой адаптации временных работников. Психологические аспекты весьма важны в случаях частой замены работников. Особенно это важно в случаях временной работы, т.к. в таких ситуациях просто невозможно рассчитывать на долгую постепенную адаптацию работников.

© Маилян Л.Д., Сизен Н.О., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: поточный метод строительства, трудовые ресурсы, непостоянные рабочие кадры, текучесть кадров, совмещение профессий, простой, качество работ, захватка

Статья поступила в редакцию 29.04.2025; одобрена после рецензирования 2025; принята к публикации 22.08.2025.

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. Формирование строительных потоков с непостоянными рабочими кадрами // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, №. 4. С. 684-696. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-684-696>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-684-696>

EDN: REHQDA

DESIGN OF CONSTRUCTION FLOWS WITH VARIABLE WORKING STAFF

Liya D. Mailyan, Nikolay O. Sizen ✉

Don State Technical University

Rostov-on-Don, Russia

✉ corresponding author

sizen0263@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. Modern construction process is carried out mainly by the production line method. Time is money. This means that the speed of creating the final product plays a major role. However, the use of the production line method requires continuous functioning of the entire organizational and technological system. Any element that falls out of it can lead to a breakdown of all processes and, ultimately, to an increase in the construction period. Labor resources in construction is a parameter that is sometimes more difficult to be taken into account compared to materials that vary in price. This is due to the fact that such resources are living resources, which means that the uncertainty factor should be of much greater importance compared to calculating other resources. The purpose of this study is to develop a scientific and methodological approach to designing construction flows in conditions of qualified labor shortage aimed at reducing the number of downtimes and, as a result, increasing labor productivity. As a research model, a situation was used in which, on the one hand, due to technological features, different numbers of workers are needed at different sites, and, on the other hand, there is uncertainty with labor availability.

Materials and methods. In the study mathematical statistics has been used. The database was formed based on the information from open sources, as well as information from construction contractors the author worked for as a post-graduate student of the Don State Technical University. The reliability of this data was confirmed during long-term cooperation of these enterprises with the university and a fairly large sample of statistical data. Regular monitoring production standards compliance at the enterprises under the study, analysis of time parameters of the flow, monitoring resource consumption, analysis of work quality were used. Methods for solving current problems related to labor force were recorded. The experience of construction organizations has shown that combining occupations is very productive, when a worker from one professional field can temporarily (from one day to several weeks) work in another profession.

Results. The study allowed to: identify the reasons for the shortage and turnover of workers (lack of qualified personnel in the required profession on the labor market, low salary level, small benefits, high morbidity rate, seasonal nature of some jobs, etc.); suggest measures for minimizing the personnel turnover in construction; calculate the construction flow with unstable teams of workers; propose measures to neutralize the uncertainty in providing workforce for construction flows (to optimize personnel issues in flow construction); develop proposals for combining blue-collar jobs; analyze the results of implementing the proposed measures.

Discussion and conclusions. The practical value of the study is related to the possibility for construction organizations to solve the problem of labor shortage without using economic methods and without spending significant funds. The results of our study have been practically implemented. In the future, it would be desirable to conduct a study in the field of psychology on the rapid adaptation of temporary workers. Psychological aspects are very im-

© Mailyan L.D., Sizen N.O., 2025



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

portant in cases of frequent replacement of workers. This is especially important in situations with temporary works organization, since it is impossible to provide a long gradual adaptation of workers.

KEYWORDS: flow construction method, labor resources, temporary workers, staff turnover, combination of professions, forced break, quality of work, isolated part of the work front

The article was submitted: April 29, 2025; **approved after reviewing:** June 06, 2025; **accepted for publication:** August 22, 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. Design of construction flows with variable working staff. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (4): 684-696. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-684-696>

ВВЕДЕНИЕ

Современное строительное производство ведется в основном поточным методом. Время – деньги. А значит, скорость создания конечной продукции играет главную роль. Если с качеством возведенного объекта строительства потребитель будет знакомиться уже после его ввода в эксплуатацию, то объект, который строится быстро, он видит сразу, и готов платить за него более высокую цену. Показатели повышения качества и сокращения сроков строительства, как правило, противоречат друг другу. И если строительство объекта ведется не для собственных нужд, а на продажу, то приоритет отдается срокам. Однако использование поточного метода предполагает бесперебойное функционирование всей организационно-технологической системы. Любой выпавший из нее элемент может привести к срыву всех процессов и в конечном итоге к увеличению срока строительства.

Научный интерес к поточному методу строительства появился в 30-е годы прошлого века. С тех пор учеными нашей страны и представителями зарубежных научных школ решено множество проблем в организации поточного строительства, исследованы все параметры строительных потоков и элементы, составляющие поточную систему в строительстве. Российская наука особенно преуспела на этом поприще в 80-е годы XX в. Имена В.А. Афанасьева, И.Г. Галкина, А.А. Гусакова, Л.Г. Дикмана и их коллег золотыми буквами вписаны в историю строительных научных дисциплин.

С проведением рыночных реформ усложнились многие аспекты уже разработанных ранее параметров. Наибольшему усложнению подверглись механизмы обеспечения строительных процессов ресурсами.

Трудовые ресурсы строительства (строительные кадры, рабочий персонал) – параметр, который, с нашей точки зрения, правильно учесть не легче, а иногда и сложнее, чем учесть, например, изменяющиеся в цене материалы. Это обусловлено тем, что такие ресурсы – живые, а значит, фактор неопределенности при их учете играет большую роль, чем при расчете других ресурсов. Рабочая сила – трудовой ресурс, который может быть подвержен негативному воздействию в результате заболеваемости и (или) увольнению работников. Человеческий фактор, таким образом, не в меньшей степени влияет на процесс строительного производства, чем технический фактор, отрицательное проявление которого, по аналогии, может быть выражено в поломках строительных машин и механизмов.

В XXI в. различные ученые продолжают исследование строительных потоков, и, по описанным выше причинам, прежде всего, они исследуют обеспечение их ресурсами. Например, С. Бертельсен¹, В. Шахзад, А.Н. Бескопыльный, С.А. Стельмах, Е.М. Щербань и др. решают проблему увязки производства, поставки и использования строительных материалов [1, 2, 3]. Предельные параметры комплексного потока строительства рассчитывали Д. Ротими, О.В. Фоменко², И.В. Кущенко и др. [4, 5]. Оценку надежности строительных

¹ Bertelsen, S., Koskela, L., Henrich, G., & Rooke, J. (2006). Critical Flow – Towards a Construction Flow Theory. In 14th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (pp. 31-40). (Proceedings of the Annual Conference of the International Group for Lean Construction; Vol. 2006). The International Group for Lean Construction. <https://iglc.net/Papers/Details/412>

² Фоменко О.В. Предельные параметры разрешенного строительства, реконструкции объектов капитального строительства и последствия их несоблюдения // Кадастр недвижимости. 2023. № 2 (71). С. 46-58. EDN: GKSHFU

потоков при влиянии различных факторов проводили Г.И. Абдуллаев, Н.А. Худайбердиева, М.В. Мацнев, А.В. Скрыпников и др. [6, 7, 8].

Множество современных научных публикаций посвящено и трудовым ресурсам строительства [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]. А именно, А.А. Горшков, А.В. Ищенко, Т.Д. Мошуд, Д. Сират и др. моделировали оптимальный состав строительного персонала [9, 10, 11, 12]. Проблему обеспечения организационно-технологической надежности строительства в условиях недостатка кадров рассматривали в своих трудах Н.П. Кузьмич, Л.В. Ермолина, Н.Н. Пронина и др. [13, 14]. Взаимосвязь эффективности управления рабочими кадрами с повышением производительности труда на строительных потоках анализировали А. Ратнаяке³, Ю. Чэнь, М. Сяо, К. Миддлтон, М. Адерет, А. Юргайтис, Ю.В. Сизова, Т.В. Учаева и др. [15, 16, 17, 18, 19]. Ценностно-ориентированный подход к строительным кадрам изучали Б.Д. Баскоро, Е.В. Андреева, Т. Аканби и др. [20, 21, 22]. Модели подготовки квалифицированных кадров для строительства разрабатывали Е.В. Андреева, О.Б. Гольцова, Ц. Чжан, И.Д. Минина и др. [21, 22, 23, 24].

Однако вышеуказанные авторы не поднимали вопрос об организации строительных потоков при недостатке рабочих кадров в увязке с ситуациями, когда по технологии работ в потоках должно быть колеблющееся число работников. Отсюда целью настоящего исследования является развитие научно-методологического подхода к формированию строительных потоков в условиях дефицита квалифицированных рабочих кадров для сокращения количества простоев и, как следствие, повышения производительности труда. Основной ситуационной моделью, использовавшейся для достижения цели исследования, послужила ситуация, при которой, с одной стороны, в силу технологических особенностей на разных захватках нужно различное число работников, а с другой стороны, существует неопределенность обеспечения рабочей силой в целом. Обе стороны исследования можно назвать как «строительные потоки с непостоянными кадрами», но природа непостоянства в них является разной.

Исходя из цели, нами поставлены следующие задачи исследования:

- 1) выявить причины возникновения дефицита рабочих кадров;
- 2) рассчитать строительный поток с непостоянным составом бригад;
- 3) предложить меры по нейтрализации неопределенности в обеспечении кадрами строительных потоков с учетом непостоянного состава бригад;
- 4) разработать предложения по совмещению рабочих профессий;
- 5) исследовать практические аспекты предложенных мероприятий.

Объектом данного исследования являются частные и специализированные строительные потоки.

Предмет исследования – объективные и субъективные причины непостоянства рабочих кадров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе применена, прежде всего, математическая статистика. Базу данных для исследования составляли сведения из открытых источников, а также информация, получаемая от строительных подрядных организаций при прохождении производственной практики магистрантами Донского государственного технического университета. Достоверность этих сведений подтверждена в ходе многолетнего сотрудничества предприятий с университетом и достаточно большой выборкой статистических данных.

Использовались регулярный мониторинг выполнения норм выработки на исследуемых предприятиях, анализ временных параметров потока, мониторинг потребления ресурсов, анализ качества выполняемых работ. Фиксировались методы решения текущих проблем, связанных с рабочими кадрами.

Оценить потребное число работников можно по формуле

$$P = \frac{P}{T} \times \text{Кнеоп},$$

где P – потребность в работающих (чел.),

T – общие трудозатраты на выполнение строительно-монтажных работ (чел.-дни),

P – продолжительность производства работ (дни),

Кнеоп – коэффициент неопределенности (принимается в диапазоне 1,1–1,3).

³ Rathnayake A., Murguia D., Middleton C. (2023). Analysing the Impact of Construction Flow on Productivity, Proceedings of the 31st Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC31), 1510-1521. doi.org/10.24928/2023/0172

Рассчитав требуемое количество рабочих кадров, организация должна произвести их набор. Однако бывает не всегда возможно принять нужное количество работников необходимой квалификации. Как отмечают Л.В. Ермолина, Н.Н. Пронина и Д.А. Мельникова, проблема дефицита кадров ранее «решалась достаточно прозаично – притоком мигрантов из стран ближнего зарубежья» [14]. Однако ослабление курса рубля по отношению к евро и другие события последних лет сделали «непривлекательным российский рынок труда для граждан из стран СНГ» [14]. Но даже если первоначально укомплектовать штат удастся, то сразу можно столкнуться с таким явлением, как текучесть кадров. Она может быть обусловлена экономическими колебаниями в отрасли (предложение более высокой зарплаты на других объектах и (или) территориях, сезонность работы), отсутствием возможности для обучения и развития персонала, низким социальным пакетом и др. Привлечение же сотрудников специализированных кадровых компаний по аутстаффингу в строительстве малоэффективно. Аутстаффинг подходит в случаях, когда нужна мало-квалифицированная рабочая сила (грузчики, уборщики, разнорабочие). Кроме того, услуги таких компаний могут оказаться дорогими.

Столкнувшись с текучестью кадров в исследуемых организациях, нами сформирован ряд предложений по преодолению этого явления. Данные предложения представлены ниже, в разделе «Результаты исследования». Однако это попутные результаты. Основная идея нашего исследования состоит в том, что излишнюю текучесть кадров можно использовать при проведении работ с колеблющимся количеством состава бригад. Например, сегодня-завтра на текущей захватке работает бригада из 6 чел., а на следующей захватке послезавтра требуется только 5 рабочих. И в случае увольнения кого-либо из бригады не нужно решать, куда направить лишнего человека, какой работой его обеспечить, чтобы не оплачивать ему простой.

Это же обстоятельство (обусловленное организационно-технологическими особенностями разное количество рабочих в бригаде) можно использовать и в условиях эпидемии ОРВИ и других заболеваний, когда многие работники оказываются временно нетрудоспособными.

Однако когда на следующую захватку требуется на 1-2 рабочих больше, чем на теку-

щую, а один из работников заболел, а ещё другой подал заявление на увольнение, становится трудно обеспечить непрерывность технологического процесса, а значит и нормальную продолжительность выполнения всего комплекса работ. В данном случае мы видим выход в формировании большого кадрового резерва, в котором находятся кандидаты на работу, в т. ч. и такие, которым нужна временная работа и (или) просто подработка. Большинство солидных организаций пренебрегают такими кандидатами на работу, предпочитая нанимать только тех, которые готовы работать на одном месте продолжительное время. Но тогда работников нужно привлекать высокими заработными платами и (или) другими социальными гарантиями (тоже носящими материальный характер), а это влечёт увеличение издержек строительного производства. И это в нынешних условиях, когда цена на строительную продукцию (на первичном рынке) практически перестала расти. А значит, у таких организаций будет падать прибыль. Малые и средние подрядные организации легче относятся к временным работникам, кроме того, им труднее находить новых работников и (или) перебрасывать работников с других участков, поэтому наша рекомендация должна им помочь.

Кроме того, опыт строительных организаций, в которых проходят производственную практику обучающиеся бакалавриата и магистратуры Донского государственного технического университета, показал, что весьма продуктивным является использование совмещения профессий, когда рабочий одной профессии временно (от одного дня до нескольких недель) переходит на работу по другой профессии. Анализ, проведенный в ходе настоящего исследования на этих предприятиях, позволил сформировать рекомендации по возможному совмещению профессий. Они приведены также ниже, в разделе «Результаты исследования».

В качестве примера формирования потоков с непостоянным составом кадров, обусловленным технологией производства работ, можно привести следующий исследованный нами практический пример при строительстве общественного здания. Нами было установлено 5 частных потоков по 4 захваткам. Состав бригад меняется от захватки к захватке. Исходные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета потока с непостоянным составом кадров

Источник: составлено авторами.

Table 1

Initial data for calculating a flow with a non-permanent staff

Source: compiled by the authors

Номер частного потока	Количество человек на соответствующих захватках				Нормативная трудоемкость на 1 захватку, чел.-ч
	1	2	3	4	
1	6	5	7	6	48
2	8	7	9	8	64
3	10	9	11	10	80
4	7	6	8	7	56
5	9	8	10	9	72

Таблица 2

Расчет продолжительности потоков на каждой захватке

Источник: составлено авторами.

Table 2

Calculation of flows duration for each division

Source: compiled by the authors

Номер частного потока	Формула расчета по соответствующей захватке				Принимаемая продолжительность потока, дни
	1	2	3	4	
1	$48/(6 \times 8) = 1$ день	$48/(5 \times 8) = 1.2$ дня ≈ 1 день	$48/(7 \times 8) = 0.86$ дня ≈ 1 день	$48/(6 \times 8) = 1$ день	4
2	$64/(8 \times 8) = 1$ день	$64/(7 \times 8) = 1.14$ дня ≈ 1 день	$64/(9 \times 8) = 0.89$ дня ≈ 1 день	$64/(8 \times 8) = 1$ день	4
3	$80/(10 \times 8) = 1$ день	$80/(9 \times 8) = 1.11$ дня ≈ 1 день	$80/(11 \times 8) = 0.91$ дня ≈ 1 дн	$80/(10 \times 8) = 1$ день	4
4	$56/(7 \times 8) = 1$ день	$56/(6 \times 8) = 1.17$ дня ≈ 1 день	$56/(8 \times 8) = 0.88$ дня ≈ 1 день	$56/(7 \times 8) = 1$ день	4
5	$72/(9 \times 8) = 1$ день	$72/(8 \times 8) = 1.13$ дня ≈ 1 день	$72/(10 \times 8) = 0.9$ дня ≈ 1 день	$72/(9 \times 8) = 1$ день	4

Расчет продолжительности работ на каждой захватке определяем по формуле

$$t = Q / (n \times T),$$

где Q – трудоемкость процесса,

n – количество рабочих,

$T = 8$ ч (продолжительность рабочей смены).

Конкретные вычисления и полученные продолжительности потоков сведены в таблицу 2.

Из таблицы 2 следует, что продолжительность всех потоков получилась одинаковая, но на 2-й захватке трудоемкость работ каждого потока была выше среднего, а на 3-й захватке – ниже среднего. Следовательно, кто-то из работающих на 3-й захватке может на некоторое время перейти на другой вид работ по совмещаемой профессии, а при работах на 2-й за-

хватке может потребоваться помощь другого совместителя, который в момент выполнения этих работ не имеет большой загрузки.

Организационно-технологическая система нормально функционирует при совмещении рабочих профессий, когда не допускается снижения скорости выполнения конечной продукции. При этом возможны простои отдельного оборудования, обслуживаемого одним совмещающим профессии работником. Основные процессы, выполняющиеся наиболее производительными машинами, должны быть непрерывными, со сменой в необходимые моменты предметов труда. При использовании такого подхода в условиях поточного строительного производства можно добиться сокращения численности работников при одновременном росте производительности труда, и, как правило, увеличении заработка [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам проведенных исследований нами сформулированы предложения по минимизации текучести кадров в строительстве (таблица 3).

Таблица 3
Мероприятия по решению проблемы текучести кадров в строительстве
Источник: составлено авторами.

Table 3
Measures to address the problem of staff turnover in construction
Source: compiled by the authors

Виды мероприятий	Предлагаемые меры
Организационные	1. Создание гибких графиков работы с учетом личных потребностей сотрудников. 2. Внедрение системы наставничества для быстрого обучения новых работников. 3. Формирование кадрового резерва (как временных работников, так и ищущих постоянную работу), в т. ч. через сотрудничество с учебными заведениями
Технологические	1. Внедрение самых современных технологий для снижения физической нагрузки. 2. Использование цифровых инструментов управления строительными потоками. 3. Разработка и использование унифицированных технологических карт
Управленческие	1. Создание резервного пула квалифицированных работников. 2. Организация постоянного обучения новым технологиям и методикам. 3. Внедрение системы оценки эффективности каждого потока. 4. Разработка гибких методик замены персонала между потоками. 5. Автоматизация процессов планирования и координации между специализированными группами. 6. Создание единой информационной системы для передачи знаний между сотрудниками
Мотивационные	1. Внедрение системы бонусов за качественное выполнение специализированных работ. 2. Предоставление эксклюзивного социального пакета. 3. Создание программ лояльности для работающих долгое время сотрудников
Регулирующие	1. Регулярный анализ эффективности внедренных решений. 2. Своевременное реагирование на проблемы текучести. 3. Корректировка системы мотивации в соответствии с результатами

В результате решения задачи по нейтрализации (снятию) неопределенности в обеспечении рабочими кадрами строительных потоков предложены следующие мероприятия (таблица 4).

Таблица 4
Оптимизация кадровых вопросов в поточном строительстве
Источник: составлено авторами.

Table 4
Optimization of personnel issues in continuous construction
Source: compiled by the authors

Предлагаемые мероприятия	Ожидаемые последствия
Создание кадрового резерва	Дает возможность быстрого нахождения работника требуемой квалификации на постоянную или временную работу
Внедрение системы наставничества	Позволяет быстро скорректировать навыки нового или переведенного с другого участка работника. Создает основу непрерывного обучения
Использование совмещения профессий	Безболезненный временный переход работника на другой участок (процесс, поток) строительства (производства работ) в случаях, когда происходит колебание потребного количества рабочей силы (на одном потоке падает, а на другом – увеличивается)
Дополнительный контроль качества работ	Позволяет выявить погрешности, возникающие в результате часто меняющихся в одном процессе работников

Проведенное исследование и апробация его в ростовских строительных организациях позволило нам дать предложения по совмещению рабочих профессий, исходя из степени легкости применения одних профессиональных навыков к другим (таблица 5).

Таблица 5
Рекомендуемые варианты совмещения рабочих профессий в строительстве
Источник: составлено авторами.

Table 5
Recommended options for combining blue-collar jobs in construction
Source: compiled by the authors

Основная профессия	Совмещаемые профессии
Арматурщик	Монтажник, такелажник, плотник, бетонщик, газосварщик
Каменщик	Монтажник, такелажник, плотник, бетонщик
Бетонщик	Монтажник, такелажник, плотник, арматурщик, каменщик, транспортный рабочий
Монтажник	Каменщик, такелажник, плотник, бетонщик, арматурщик, газосварщик
Плотник	Монтажник, такелажник, землекоп, кровельщик
Транспортный рабочий	Такелажник, землекоп, бетонщик
Такелажник	Монтажник, слесарь, плотник, арматурщик, транспортный рабочий
Машинист строительных машин	Электромонтер, такелажник, слесарь, электросварщик, газосварщик
Электросварщик	Электромонтер, такелажник, слесарь, монтажник, газосварщик

После 3-месячного внедрения предложенных мероприятий на предприятиях, сотрудничающих с нами в рамках научной работы и производственной практики, мы рассчитали полученные результаты по производственным сбоям до внедрения этих мероприятий и после (рисунки 1 и 2).

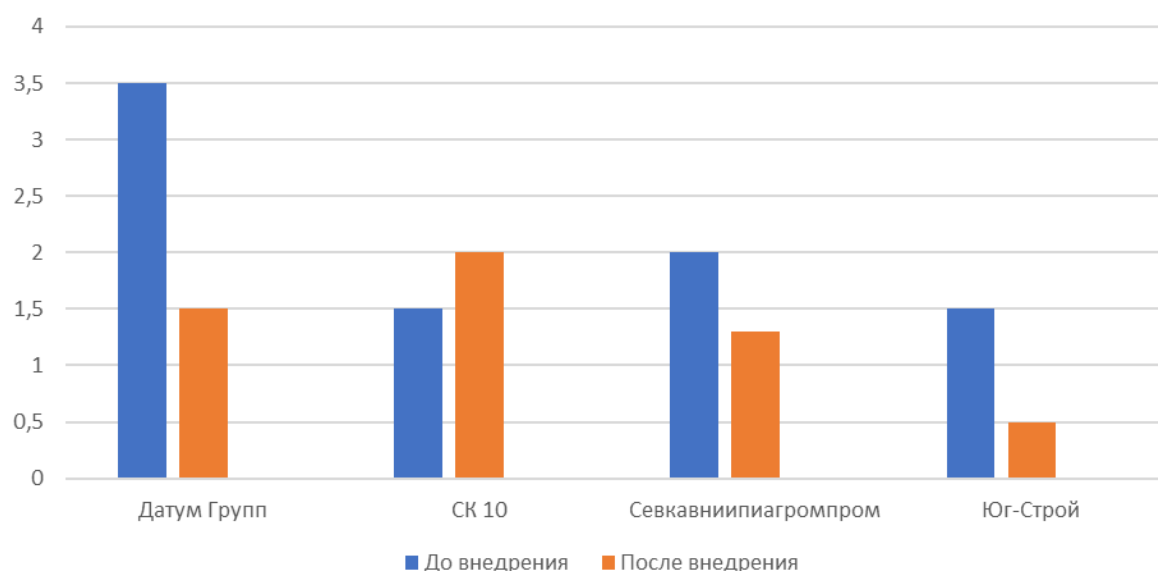


Рисунок 1 – Суммарное по всем строительным потокам среднеемесячное время простоев, обусловленное недостатком рабочих кадров, до внедрения мероприятий и после, дни
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Total average monthly downtime for all construction flows due to lack of labor, before and after the measures being implemented, days
Source: compiled by the authors.

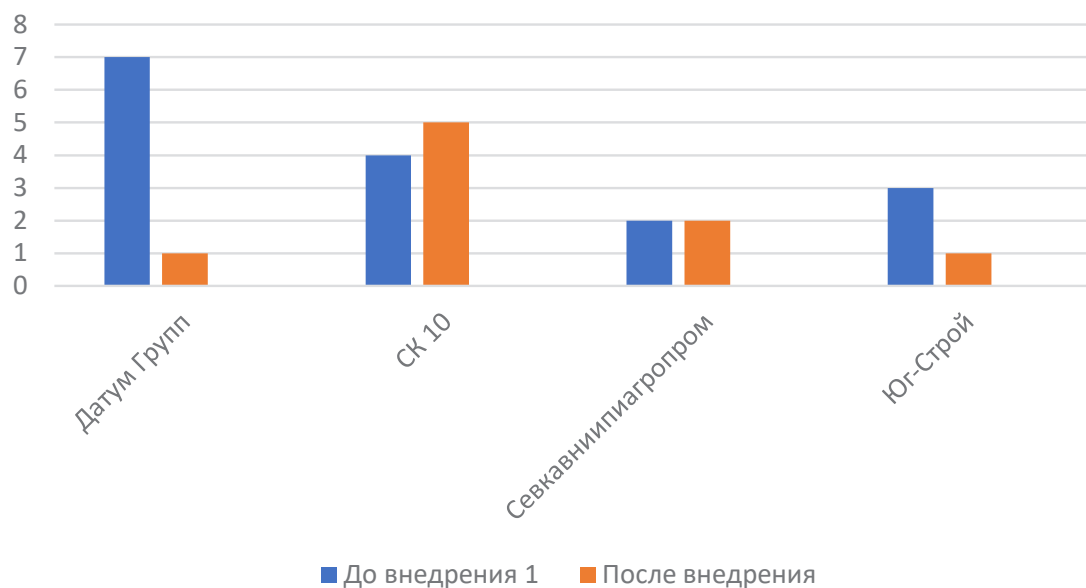


Рисунок 2 – Среднемесячное количество несоответствий требуемым параметрам качества выполненных работ, до внедрения мероприятий и после
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Average monthly number of non-compliances with the required quality parameters of the performed works, before and after implementation of measures
Source: compiled by the authors.

Из диаграмм, представленных на указанных рисунках, видно, что предложенные нами мероприятия в основном дали положительные результаты. Факт, что в одной организации наши предложения не увенчались успехом, а в другой – успех был незначительный, не говорит о том, что разработанные предложения не подходят или нуждаются в существенной доработке. Это, прежде всего, указывает на то, что данные организации к внедрению мероприятий подошли формально. Новшества не всегда вызывают энтузиазм на производстве. Даже самые лучшие предложения работают не всегда. Кроме того, каждый производственный процесс имеет определенные потенциальные возможности эффективности, предопределенные вещественными факторами, изменить которые в ходе начавшегося строительства невозможно. Тем не менее необходимо совершенствовать механизм внедрения научных разработок в производство.

В ходе исследования установлено также, что организации, имеющие у себя институт наставничества и проводящие обучение сотрудников без отрыва от производства, легче справляются с нештатными ситуациями, когда приходится привлекать рабочих к исполнению функций другой профессии. Сотрудники таких организаций оказываются более подготовленными к другим работам, чем сотрудники других организаций, имевшие опыт работы в разных профессиях, но в новой организации выполнявшие только одну функцию и не обучавшиеся другим. Организациям, не имеющим института наставничества, дана рекомендация проводить обучение рабочих без отрыва от производства выполнению других профессиональных функций согласно таблице 5, и (или) периодически проводить повышение квалификации сотрудников в специализированных организациях дополнительного образования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе описанного исследования совмещено решение проблемы формирования строительных потоков в условиях дефицита рабочих кадров с ситуациями, когда в силу технологических особенностей на разных захватках нужно различное число работников.

В итоге решены следующие задачи:

1) обозначены причины возникновения дефицита и текучести рабочих кадров (отсутствие на рынке труда квалифицированных кадров по требуемой профессии, невысокий уровень заработной платы, небольшой социальный пакет, высокий уровень заболеваемости, сезонный характер некоторых работ и др.);

2) сформулированы предложения по минимизации текучести кадров в строительстве;

3) рассчитан строительный поток с непостоянным составом бригад;

4) предложены мероприятия по нейтрализации неопределенности в обеспечении кадрами строительных потоков (по оптимизации кадровых вопросов в поточном строительстве);

5) разработаны предложения по совмещению рабочих профессий;

6) проанализированы результаты внедрения предложенных мероприятий.

Научная новизна исследования состоит в предложенном подходе к преодолению нехватки рабочих кадров.

Практическая ценность работы для строительных организаций заключается в том, что применение наших предложений позволяет решить проблему дефицита рабочих кадров, не используя экономичные методы, не расходуя существенные средства.

Полученные результаты исследования прошли практическое внедрение пока в четырех организациях. В настоящее время нами готовятся предложения и для других предприятий.

Необходимо иметь в виду, что для использования совмещения профессий нужно регулярно проводить повышение квалификации работников и обучение без отрыва от производства. Такое обучение может быть весьма малобюджетным, оно не требует существенных затрат, как, например, обучение новой профессии, далекой по своим функциям от основной.

В дальнейшем желательно было бы провести исследование в области психологии по быстрой адаптации временных работников.

Психологические аспекты весьма важны в случаях частой замены работников. Особенно это важно в случаях временной работы, т.к. в таких ситуациях просто невозможно рассчитывать на долгую постепенную адаптацию работников.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Moshood T.D., Rotimi J.O.B. and Shahzad W. Enhancing construction organizations' performance through strategic decision-making: unveiling the mediating role of quality of information. *International Journal of Organizational Analysis*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJOA-01-2024-4228>
2. Beskopylny A.N., Shcherban' E.M., Stel'makh S.A., Chernil'nik A., Elshaeva D., Ananova O., Mailyan L.D., Muradyan V.A. Optimization of the properties of eco-concrete dispersedly reinforced with hemp and flax natural fibers. *Journal of Composites Science*. 2025. 9(2), 56. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs9020056>
3. Stel'makh S.A., Beskopylny A.N., Shcherban' E.M., Mavzolevskii D.V., Drukarenko S.P., Chernil'nik A.A., Elshaeva D.M., Shilov A.A. Influence of Corn Cob Ash Additive on the Structure and Properties of Cement Concrete. *Construction Materials and Products*. 2024. 7 (3). 2. DOI: <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-3-2>
4. Elkhidir E., Patel T. and Rotimi J.O.B. Predictive Modelling for Residential Construction Demands Using ElasticNet Regression. *Buildings*. 2025. 15(10), 1649. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15101649>
5. Kushchenko I.V. Determination of the level of redundancy of the complex construction flow of the cluster-territory of the existing city development. *Real Estate: Economics, Management*. 2024. № 4. P. 48-51. EDN: EJTXUJ
6. Абдуллаев Г.И. Особенности оценки надежности строительных потоков // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2010. № 6. С. 24–26. EDN: ODXLVH
7. Худайбердиева Н.А., Оразгельдиев Г., Сейитмедов Ы. Особенности оценки надежности строительных потоков // *Инновационная наука*. 2024. № 9-2. С. 234–235. EDN: WKCZQR
8. Мацнев М.В., Скрыпников А.В., Торопцев В.В., Тверитнев О.Н., Брюховецкий А.Н., Зеликов В.А., Казачек М.Н. Количественная оценка влияния климатических факторов на создание сезонных заделов и темпы специализированных дорожно-строительных потоков // *Строительные и дорожные машины*. 2021. № 5. С. 25–31. EDN: LPFGUQ
9. Горшков А.А., Морозенко А.А. Повышение эффективности организации труда на основе рационального движения персонала при сооружении сложных инженерных объектов // *Наука и бизнес: пути развития*. 2021. № 10 (124). С. 12–17. EDN: TPYHUM

10. Moshood T.D., Rotimi J.O.B. and Shahzad W. Impact of information quality on strategic decision-making in construction organization: unravelling complexity and contingencies. *Management Research Review*. 2025. Vol. 48 No. 4. pp. 578–603. DOI: <https://doi.org/10.1108/MRR-06-2024-0422>
11. Сират Д. Разработка подходов к совершенствованию производственных структур и состава персонала строительных компаний с учетом затрат // Вестник СибАДИ. 2025; 22(1): 124–135. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-124-135>. EDN: AWCVGH
12. Ищенко А.В., Данилочкин М.Н., Тарасенко И.С. Планирование трудового ресурса при формировании производственных программ строительных организаций // Инженерный вестник Дона. 2022. № 3. Режим доступа: https://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_22_3_Ishenko.pdf_91c91935c2.pdf (дата обращения: 28.04.2025). EDN: VXLNHA
13. Кузьмич Н.П., Бурчик В.В. Влияние трудового обеспечения на организационно-технологическую надежность строительных организаций // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. 2021. № 1. С. 63–66. EDN: BSYDMG
14. Ермолина Л.В., Пронина Н.Н., Мельникова Д.А. Развитие строительной отрасли России в условиях дефицита кадров // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 148–153. DOI: https://doi.org/10.51608/26867818_2023_4_148
15. Chen Y., Qiu W. and Xiao M. (2025). Influence mechanisms of digital construction organizations' capabilities on performance: evidence from SEM and fsQCA. *Engineering, Construction and Architectural Management*. DOI: <https://doi.org/10.1108/ECAM-03-2024-0373>
16. Adereth M. For labor to build upon. *British Journal of Industrial Relations*. 2023. V. 61. № 1. P. 216–218. DOI: <https://doi.org/10.1111/bjir.12706>
17. Юргайтис А.Ю., Никишкин М.В. Анализ влияния специфических факторов на производительность рабочих при монолитных работах // Строительное производство. 2021. № 1. С. 22–28. DOI: https://doi.org/10.54950/26585340_2021_1_22
18. Сизова Ю.В., Васильева Л.А., Миროнова Т.И., Тараканов Д.А. Анализ условий труда работников на строительных площадках // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. 2024. № 10. С. 155–159. EDN: QPEYNV
19. Учаева Т.В. Применение эффективной кадровой политики как метод повышения производительности труда строительного предприятия // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2021. № 2 (265). С. 15–21. EDN: TMPDLC
20. Baskoro B.D. Work value, knowledge sharing, and creative performance among construction employees in Jakarta. *RUDN Journal of Public Administration*. 2021. V. 8. № 2. P. 200–215. DOI: <https://doi.org/10.22363/2312-8313-2021-8-2-200-215>
21. Андреева Е.В. Участие «Строительного института» ФГБОУ ВО «СИБАДИ» в реализации программы АСИ «Кадры будущего для регионов». *Техника и технологии строительства*. 2020. № 4 (24). С. 22–28. EDN: MWMNMJ
22. Akanbi T., Zhang J. (2021). Design information extraction from construction specifications to support cost estimation. *Automation in Construction*. Volume 131, November 2021, 103835. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103835>
23. Минина И.Д. Механизм взаимодействия предприятий строительной отрасли с образовательными организациями как способ привлечения кадров в отрасль // Экономика, предпринимательство и право. 2025. Т. 15, № 1. С. 347–362. DOI: <https://doi.org/10.18334/epp.15.1.122456>
24. Гольцова О.Б., Клековкин В.С., Гольцова Е.В. Математическая модель и информационные технологии поддержки принятия решений для управления подготовкой кадров для строительных предприятий // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18, № 4. С. 76–83. DOI: <https://doi.org/10.22213/2410-9304-2020-4-76-83>

REFERENCES

1. Moshood T.D., Rotimi J.O.B. and Shahzad W. Enhancing construction organizations' performance through strategic decision-making: unveiling the mediating role of quality of information. *International Journal of Organizational Analysis*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJOA-01-2024-4228>
2. Beskopylny A.N., Shcherban' E.M., Stel'makh S.A., Chernilnik A., Elshaeva D., Ananova O., Mailyan L.D., Muradyan V.A. Optimization of the properties of eco-concrete dispersedly reinforced with hemp and flax natural fibers. *Journal of Composites Science*. 2025; 9(2): 56. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs9020056>
3. Stel'makh S.A., Beskopylny A.N., Shcherban' E.M., Mavzolevskii D.V., Drukarenko S.P., Chernilnik A.A., Elshaeva D.M., Shilov A.A. Influence of Corn Cob Ash Additive on the Structure and Properties of Cement Concrete. *Construction Materials and Products*. 2024; 7 (3): 2. DOI: <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-3-2>
4. Elkhidir E., Patel T. and Rotimi J.O.B. Predictive Modelling for Residential Construction Demands Using ElasticNet Regression. *Buildings*. 2025. 15(10). 1649. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15101649>
5. Kushchenko I.V. Determination of the level of redundancy of the complex construction flow of the cluster-territory of the existing city development. *Real Estate: Economics, Management*. 2024; 4: 48-51. EDN: EJTXUJ
6. Abdullaev G.I. Features of assessing the reliability of construction flows. *Minerals and Mining Engineering*. 2010; 6: 24–26. EDN: ODXLVH (In Russ.)
7. Khudaiberdieva N.A., Orazgeldiev G., Seyitmedov Y. Features of assessing the reliability of construction flows. *Innovacionnaya nauka*. 2024; 9-2: 234–235. EDN: WKCZQR (In Russ.)

8. Matsnev M.V., Skripnikov A.V., Toropsev V.V., Tveritnev O.N., Bryukhovetsky A.N., Zelikov V.A., Kazachek M.N. Theoretical substantiation of the optimal amount of backlogs on the elements of the road structure of timber haul roads. *Construction and road machinery*. 2021; 5: 25–31. EDN: LPFGUQ (In Russ.)
9. Gorshkov A.A., Morozenko A.A. Improving the efficiency of labor organization based on rational movement of personnel during the construction of complex engineering facilities. *Science and Business: Ways of Development*. 2021; 10 (124): 12–17. EDN: TPYHUM (In Russ.)
10. Moshood T.D., Rotimi J.O.B. and Shahzad W. Impact of information quality on strategic decision-making in construction organization: unravelling complexity and contingencies. *Management Research Review*. 2025; Vol. 48 No. 4: 578–603. DOI: <https://doi.org/10.1108/MRR-06-2024-0422>
11. Serat J. 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. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-124-135>. EDN: AWCVGH
12. Ishchenko A.V., Danilochkin M.N., Tarasenko I.S. Planning of labor resources in the formation of production programs of construction organizations. *Engineering journal of Don*. 2022; 3. URL: https://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_22_3_Ishchenko.pdf_91c91935c2.pdf (accessed: 28.04.2025). EDN: VXLNHA (In Russ.)
13. Kuzmich N.P., Burchik V.V. The influence of labor provision on the organizational and technological reliability of construction organizations. *RISK: Resursy, Informaciya, Snabzhenie, Konkurenciya*. 2021; 1: 63–66. EDN: BSYDMG (In Russ.)
14. Ermolina L.V., Pronina N.N., Melnikova D.A. Development of the Russian construction industry under conditions of shortage of personnel. *Expert: theory and practice*. 2023; 4 (23): 148–153. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.51608/26867818_2023_4_148
15. Chen Y., Qiu W. and Xiao M. Influence mechanisms of digital construction organizations' capabilities on performance: evidence from SEM and fsQCA. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1108/ECAM-03-2024-0373>
16. Adereth M. For labor to build upon. *British Journal of Industrial Relations*. 2023; 61. no 1: 216–218. DOI: <https://doi.org/10.1111/bjir.12706>
17. Jurgaitis A.Yu., Nikishkin M.V. Analysis of the influence of specific factors on the productivity of labor during monolithic works. *Construction production*. 2021; 1: 22–28. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.5495/026585340_2021_1_22
18. Sizova Yu.V., Vasilyeva L.A., Mironova T.I., Tarakanov D.A. Analysis of working conditions of workers at construction sites. *Competitiveness in a global world: economics, science, technology*. 2024; 10: 155–159. EDN: QPEYNV (In Russ.)
19. Uchaeva T.V. Application of effective personnel policy as a method of increasing labor productivity of a construction enterprise. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka*. 2021; 2 (265): 15–21. EDN: TMPDLC (In Russ.)
20. Baskoro B.D. Work value, knowledge sharing, and creative performance among construction employees in Jakarta. *RUDN Journal of Public Administration*. 2021; V. 8. no 2: 200–215. DOI: <https://doi.org/10.22363/2312-8313-2021-8-2-200-215>
21. Andreeva E.V. Participation of the "Construction Institute" SIBADI in the implementation of the ASI program "Personnel of the Future for the Regions". *Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva*. 2020; 4 (24): 22–28. EDN: MWMNMJ (In Russ.)
22. Akanbi T., Zhang J. Design information extraction from construction specifications to support cost estimation. *Automation in Construction*. 2021; Volume 131: 103835. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103835>
23. Minina I.D. Mechanism of interaction between construction companies and educational institutions as a way of recruiting personnel for the industry. *Journal of Economics, Entrepreneurship and Law*. 2025; 15(1): 347–362. DOI: <https://doi.org/10.18334/eppl.15.1.122456>
24. Goltsova O.B., Klekovkin V.S., Goltsova E.V. Mathematical model and information technologies for decision support on personnel training management for construction companies. *Intelligent Systems in Manufacturing*. 2020; T. 18. no 4: 76–83. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22213/2410-9304-2020-4-76-83>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Маилян 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. Обработка полученных данных и представление их в виде таблиц и диаграмм. Подготовка текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

L.D. Mailyan Formulating the concept, purpose and objectives of the research. Analysis of the topic development. Management of the research process. Selection of the research methods. Summarizing the research and identifying its results. Editing the manuscript.

N.O. Sizen Gathering materials and applying research methods. Processing the obtained data and presenting it in the form of tables and diagrams. Writing the text of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Маилян 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 D. Mailyan – Cand. of Sci. (Economic), Associate Professor, Head of the Department «Organization of Construction» Don State Technical University (Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1, 344000).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2600-5554>,

SPIN code: 3286-4625,

e-mail: liya_mailyan@mail.ru

Nikolay O. Sizen – post-graduate 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

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 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом употреблении должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подписью, и отдельными файлами с расширением (JPEG, GIF, BMP). Должны быть пронумерованы (Таблица 1 – Заголовок, Рисунок 1 – Наименование), озаглавлены (таблицы должны иметь заглавие, выравнивание по левому краю, а иллюстрации – подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы 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.