

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



научный рецензируемый журнал

•ВЕСТНИК СИБАДИ•

The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

“Vestnik SibADI”

Том 22, № 5. 2025
Vol. 22, No. 5. 2025

наука
science

creation
творчество

образование

innovations

education

инновации

technology

технологии

tradition

традиции

ВЕСТНИК СИБАДИ

THE RUSSIAN AUTOMOBILE AND HIGHWAY INDUSTRY JOURNAL

DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-5

ТОМ 22, № 5. 2025

VOL. 22, No. 5. 2025



Учредитель и издатель:

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

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ

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

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

Founder and Publisher:

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

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

EDITORIAL POSTAL ADDRESS

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

Published since 2004
by 6 issues per year

Subscription index is 66000
in the Ural-Press catalog

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

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

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

2.5.11. – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки),

2.9.1. – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки),

2.9.4. – Управление процессами перевозок (технические науки),

2.9.5. – Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки),

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

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

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

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

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

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

Журнал индексируется и архивируется:

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ);

в международной базе Dimensions;

международной интерактивной справочно-библиографической системе EBSCO;

международной реферативной базе периодических печатных изданий Ulrichsweb Global Serials Directory;

международной базе открытых публикаций Google Академия;

международной электронно-библиотечной системе The European Library;

научном информационном пространстве «Соционет»;

электронном каталоге научно-технической литературы ВИНИТИ РАН;

научной электронной библиотеке «КиберЛенинка»;

Directory of Open Access Journals (DOAJ SEAL);

CNKI scholar.

Журнал является членом:

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), CrossRef

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Подписано в печать 31.10.2025. Дата выхода в свет 05.11.2025. Формат 60×84 ¼ Гарнитура Arial. Печать оперативная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 27,25 Тираж 500 экз. Заказ 500 экз. Свободная цена. Отпечатано в типографии Издательско-полиграфического комплекса ФГБОУ ВО «СибАДИ», Россия, г. Омск, проспект Мира, д. 5.

Контент доступен под лицензией CC BY.

Поступившие в редакцию материалы не возвращаются.

Гонорары не выплачиваются.

Все статьи публикуются бесплатно.

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

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

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

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

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

The journal is the periodical scientific edition registered as mass media. Certificate of registration media is PI NUMBER FS – 77-73591 dated on 31.08.2018 and is issued by the Federal Service of Supervision in the sphere of information technologies and mass communications (Roskomnadzor). The peer-reviewed scientific The Russian Automobile and Highway Industry Journal is included in the list of leading periodicals and recommended by the Higher Attestation Commission by a decision of the Presidium of the Higher Attestation Commission on 25.02.2011. In accordance with the order of The Ministry of Education and Science of Russia dated by December 28, 2018, No. 90 is included in the new list. Since 2017, all issues and articles of the journal have been assigned by Digital Object Identifiers (DOIs), the data of which are available in electronic version on the 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 31.10.2025. Publication date is 05.11.2025. Format is 60 × 84 ¼.

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

Content is available under license CC BY.

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

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

Транспортное, горное и строительное машиностроение

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

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

Транспорт

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

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

Строительство и архитектура

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Коротаев Дмитрий Николаевич, д-р техн. наук, доц., проф.
Российский государственный геологоразведочный
университет им. Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия.
Scopus Author ID 6506823308, **Researcher ID** 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

Scopus Author ID 0000-0001-8494-2852, **Scopus Author ID** 6506823308,
Researcher ID T-5750-2017

Леонович Сергей Николаевич, д-р техн. наук, проф.,
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

Scopus Author ID 5588773300, **Researcher ID** A-4757-2016,
ORCID ID 0000-0002-4026-820X

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL TEAM

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

Transport, mining and mechanical engineering

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

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

Transport

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

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

Construction and architecture

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

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Taalalibek I. Matkerimov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, KSTU named after I. Razzakova, Bishkek, Kyrgyz Republic
Researcher ID P-2811-2017, **ORCID ID** 0000-0001-5393-7700

Vitaliy A. Meshcheryakov, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 7006700218, **Researcher ID** H-2077-2016, **ORCID ID** 0000-0001-9913-2078

Sergey M. Mochalin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 65057433262, **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. Khrustanovich» of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia
Scopus Author ID 12759501600, **Researcher ID** M-8151-2017 **ORCID ID** 0000-0002-4281-4358

Alexandr N. Novikov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia
Scopus Author ID 57077906200, **Researcher ID** B-9082-2016, **ORCID ID** 0000-0001-5496-4997

Yana A. Peregood, Dr. of Sci. (Economics), Professor, Higher School of Economics in Warsaw, Warsaw, Poland
Scopus Author ID 26649146500, **Researcher ID** A-1858-2014, **ORCID ID** 0000-0003-1774-5220

Luca Placidi, Dr. of Sci. (Engineering), Associated Professor, International Telematic University (UNINETTUNO), Rome, Italy
Scopus Author ID 57199322424, **ORCID ID** 0000-0002-1461-3997

Vladimir P. Podshivalov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus
ORCID ID 0000-0002-2529-6018, **Researcher ID** E-4066-2018

Andrey B. Ponomarev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Construction Production and Geotechnics, Perm National Research Technical University, Perm, Russia
Scopus Author ID 6603146403, **Researcher ID** A-8668-2013, **ORCID ID** 0000-0001-6521-9423

Vladimir I. Rassokha, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor, Orenburg State University, Orenburg, Russia
Scopus Author ID 57193742928, **Researcher ID** M-3242-2017, **ORCID ID** 0000-0002-7836-2242

Sergey V. Saveliev, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Russia
Scopus Author ID 57159787800, **ORCID ID** 0000-0002-4034-2457, **Researcher ID** A-4081-2019

Václav Skala, Professor of the West Bohemia University, Plzen, Czech Republic
Scopus Author ID 7004643209, **Researcher ID** F-9141-2011, **ORCID ID** 0000-0001-8886-4281

Yuriy V. Trofimenco, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) Moscow, Russia
Scopus Author ID 56098551600, **Researcher ID** N-7846-2018, **ORCID ID** 0000-0002-3650-5022

Roman S. Fediuk, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Far Eastern Federal University FEFU, Vladivostok, Russia
Scopus Author ID 57199850188, **Researcher ID** N-6730-2017, **ORCID ID** 0000-0002-2279-1240

Leonid A. Khmara, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Pridneprovskaya State Academy of Construction and Architecture, Dnepropetrovsk, Ukraine
Scopus Author ID 6505880056

Vasiliy G. Khomchenko, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia
Scopus Author ID 6603880234, **Researcher ID** P-8539-2015, **ORCID ID** 0000-0003-3151-7937

Mikhail N. Chekardovskiy, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia
Scopus Author ID 57192297387, **Researcher ID** C-3414-2019, **ORCID ID** 0000-0002-7166-1936

Irina L. Chulkova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 12645632400, **ORCID ID** 0000-0003-4451-2297

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

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

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

Edwin Koźniewski, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Białystok, Poland
Scopus Author ID 9843546900, **Researcher ID** N-3447-2017, **ORCID ID** 0000-0001-7052-9602

Natalia V. Yakunina, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor, Orenburg State University, Orenburg, Russia
Scopus Author ID 55673113100, **Researcher ID** E-9038-2015, **ORCID ID** 0000-0002-8952-2694

Nikolai N. Yakunin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Orenburg State University, Orenburg, Russia
Scopus Author ID 6603541652, **Researcher ID** E-9035-2015, **ORCID ID** 0000-0001-6282-2331

Galina V. Moroz
Executive Journal Secretary
e-mail: vestnik_sibadi@sibadi.org

Elena V. Sadina
Director of the Publishing and Printing Complex
e-mail: sadina.elena@gmail.com

Liliya F. Rakhuba
Journal Interpreter
e-mail: lira_omsib@mail.ru

Elena V. Maksimyuk
Journal Interpreter
e-mail: grechko_ev@mail.ru

Oksana A. Soboleva
Journal Corrector
e-mail: riosibadi@gmail.com

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

Д.В. Фурманов, Л.М. Шамахов, Е.С. Буданова	
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОРОЖНЫХ ФРЕЗ НА ОСНОВЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИЗМЕЛЬЧЕННОГО МАТЕРИАЛА	710
И.С. Тюремнов, Д.А. Шорохов	
СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВЫХ ВИБРАЦИОННЫХ КАТКОВ РАЗЛИЧНЫХ ПОКОЛЕНИЙ.....	728
Б.П. Трофименко, А.В. Маркелов, А.С. Корытов, Ю.П. Осадчий	
СМАЗОЧНЫЕ КОМПОЗИЦИИ НА ВОДНО-СПИРТОВОЙ ОСНОВЕ ДЛЯ ЗАКРЫТЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН	750

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

И.Е. Агауреев, С.А. Бурага	
МЕТОДЫ ТЕОРИИ ТРАНСПОРТНЫХ МАКРОСИСТЕМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ДЛЯ АВТОСТРАХОВАНИЯ.....	760
Д.С. Курбатов, А.В. Старостенко	
ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ОРГАНИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ	772
Р.В. Филиппова, И.А. Феньков	
ЭВОЛЮЦИЯ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ НАЗЕМНОГО ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ Г. МОСКВЫ	786

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

А.Ф. Истомин, М.Ю. Ананьев	
РАСЧЕТ ЭСТАКАДЫ ПОД ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРУБОПРОВОДЫ НА ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ ОБРУШЕНИЕ ПРЯМЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ	804
В.И. Сологаев	
РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ПЕРЕДВИЖНЫХ УЧАСТКОВ СТРОИТЕЛЬНОГО ВОДООТЛИВА И ВОДОПОНИЖЕНИЯ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ, ТОННЕЛЕЙ И МЕТРОПОЛИТЕНОВ	822
Т.В. Боброва, В.А. Уткин	
НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КАРТ К РЕАЛЬНЫМ УСЛОВИЯМ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА ИНСТРУМЕНТАМИ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	832
М.А. Ступин, С.А. Макеев, А.А. Комлев	
УЧЁТ ЖЁСТКОСТИ ОПОРНЫХ УЗЛОВ В РАСЧЁТАХ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ СИММЕТРИЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ С КРУЧЕНИЕМ	844

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

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

**EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF ROAD MILLING TOOLS BASED
ON GRANULOMETRIC ANALYSIS OF THE GROUND MATERIAL..... 711**

Ivan S. Tyuremnov, Dmitry A. Shorohov

**STATISTICAL ANALYSIS OF TECHNICAL CHARACTERISTICS
OF SOIL VIBRATORY ROLLERS OF DIFFERENT GENERATIONS 729**

Bogdan P. Trofimenko, Aleksandr V. Markelov, Aleksey S. Korytov, Yuriy P. Osadchiy

**LUBRICANT COMPOSITIONS WITH WATER-ALCOHOL BASE
FOR CLOSED FRICTION UNITS OF ROAD CONSTRUCTION MACHINES 751**

PART II. TRANSPORT

Igor E. Agureev, Sergey A. Buraga

**METHODS OF THE THEORY OF TRANSPORT MACROSYSTEMS
FOR MASS SERVICE DYNAMICS AND AUTO INSURANCE..... 761**

Dmitriy S. Kurbatov, Andrey V. Starostenko

**INNOVATIVE APPROACHES TO TRAFFIC MANAGEMENT BASED
ON DIGITAL TWINS OF ROAD NETWORKS 773**

Rimma V. Filippova, Ivan A. Fen'kov

**DECARBONIZATION EVOLUTION OF GROUND URBAN PASSENGER TRANSPORT
IN MOSCOW 787**

PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Anton F. Istomin, Mikhail Yu. Ananin

**TECHNOLOGICAL PIPELINE STRUCTURAL DESIGN AGAINST PROGRESSIVE COLLAPSE
THROUGH DYNAMIC DIRECT ANALYSIS 805**

Valery I. Sologaev

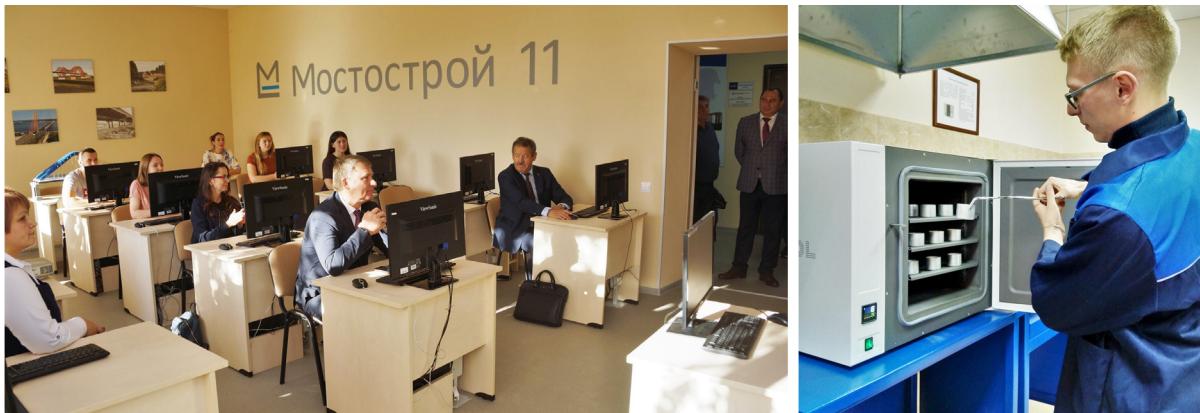
**DEVELOPMENT OF MOBILE SYSTEMS FOR CONSTRUCTION DRAINAGE
AND DEWATERING FOR PIPELINES, TUNNELS AND METROPOLITANS 823**

Tatyana V. Bobrova, Vladimir A. Utkin

**SETTING UP PROCESS CHARTS' PARAMETERS TO REAL ROAD CONSTRUCTION
CONDITIONS WITH THE USE OF INFORMATION MODELING TOOLS 833**

Mikhail A. Stupin, Sergey A. Makeev, Andrey A. Komlev

**BEARING JOINT RIGIDITY IN DESIGNING THIN-WALLED BEAMS WITH
TWO AXES OF SYMMETRY WHEN BENDING WITH TORSION 845**



РАЗДЕЛ I.
ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ
И СТРОИТЕЛЬНОЕ
МАШИНОСТРОЕНИЕ



PART I.
TRANSPORT,
MINING AND MECHANICAL
ENGINEERING

Научная статья

УДК 625.089.21

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-710-727>

EDN: RVMESZ



Check for updates

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОРОЖНЫХ ФРЕЗ НА ОСНОВЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИЗМЕЛЬЧЕННОГО МАТЕРИАЛА

Д.В. Фурманов¹, Л.М. Шамахов¹✉, Е.С. Буданова²¹Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия²Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
г. Москва, Россия✉ ответственный автор
leonid.shamakhov@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Энергия при фрезеровании асфальтобетонных покрытий затрачивается на разрушение каменной фракции, битумных связей, а также прочих факторов, которые в совокупности не влияют на появление новых поверхностей. Целью данной работы является поиск и предварительная оценка метода косвенного определения эффективности работы фрезерных рабочих органов на основе анализа энергозатрат.

Материалы и методы. В работе используются два набора асфальтобетонного гранулята марки Б типа 2, полученные при холодном фрезеровании покрытий. Для сравнения применялись идентичные фрезерные барабаны с разной схемой расположения режущих элементов. Применение технологии 3D-сканирования позволило получить полигональные модели частиц и количественно оценить изменение площади поверхности материала в процессе фрезерования. Для фракций, не подвергавшихся сканированию, параметры поверхности определялись через уравнения регрессии, построенные на основе экспериментальных данных. Основой исследования послужил энергетический подход, связывающий затраты энергии с образованием новых поверхностей при разрушении асфальтобетонного композита.

Результаты. Основная часть энергии (до 99%) при фрезеровании расходуется на разрушение битумных связей, а не каменной фракции. Сравнение двух фрезерных барабанов показало, что одна из двух конструкций на 19,25% энергоэффективнее за счет расположения режущих элементов. Разработанная методика 3D-сканирования и гранулометрического анализа подтвердила универсальность оценки процессов измельчения, а также выявила ключевые факторы энергопотребления: толщину стружки (прямая зависимость), температуру материала (обратная) и конструкцию оборудования. Вместе с тем уточнены зависимости для оценки удельных поверхностей каменных фракций и получены зависимости для определения удельных поверхностей асфальтобетонного гранулята.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты позволяют производить оценку затрачиваемой энергии при удалении изношенных слоев асфальтобетонных покрытий. Вместе с тем разработанный метод демонстрирует точность и эффективность по сравнению с расчетными методами. Это позволяет рекомендовать метод не только для оценки энергозатрат в процессе фрезерования асфальтобетонов, но и в процессе измельчения других твердых материалов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорожная фреза, асфальтобетон, процесс фрезерования, энергоэффективность, гранулометрический анализ, 3D-сканирование, экспериментальные исследования

Статья поступила в редакцию 14.08.2025; одобрена после рецензирования 17.09.2025; принята к публикации 21.10.2025.

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. Оценка эффективности дорожных фрез на основе гранулометрического анализа измельченного материала // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 5. С. 710-727. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-710-727>

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



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-710-727>

EDN RVMESZ

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF ROAD MILLING TOOLS BASED ON GRANULOMETRIC ANALYSIS OF THE GROUND MATERIAL

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

¹Yaroslavl State Technical University,
Yaroslavl, Russia

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

✉ corresponding author
leonid.shamakhov@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Milling asphalt concrete pavements, energy is spent on the destruction of the stone fraction, bituminous bonds, as well as other factors that, taken together, do not affect the emergence of new surfaces. The objective of the research is to develop and conduct a preliminary evaluation of a method for indirect determination of the efficiency of milling tools based on energy consumption analysis.

Materials and methods. Two sets of asphalt concrete granulate of type B grade 2, obtained by cold milling of coatings are used in this study. Identical milling drums with different schemes of arrangement of cutting elements were used for comparison. The use of 3D scanning technology allowed to obtain polygonal models of particles and to quantify the change in the surface area of the material during milling. For fractions not subjected to scanning, the surface parameters were determined through regression equations based on experimental data. The study was based on an energy approach that links energy consumption with the formation of new surfaces during the destruction of an asphalt concrete composite.

Results. The main part of the energy (up to 99%) during milling is spent on breaking the bitumen bonds, rather than the stone fraction. A comparison of two milling drums showed that one of the two designs is 19.25% more energy efficient due to the arrangement of the cutting elements. The developed 3D scanning and granulometric analysis methodology confirmed the versatility of assessing milling processes and also identified the key factors of energy consumption: the thickness of the shavings (direct relationship), material temperature (inverse relationship), and equipment design. At the same time, the dependences for estimating the specific surfaces of stone fractions were refined, and the dependences for determining the specific surfaces of asphalt concrete granulate were obtained.

Discussion and conclusions. The obtained results make it possible to conduct the estimation of the energy consumed when removing worn layers of asphalt concrete pavements. At the same time, the developed method demonstrates accuracy and efficiency in comparison with calculation methods. This allows us to recommend this method not only for evaluation energy consumption in the process of asphalt concrete milling, but also for the milling process of other solid materials.

KEYWORDS: road milling cutter, asphalt concrete, milling process, energy efficiency, granulometric analysis, 3D scanning, experimental studies

The article was submitted: August 14, 2025; approved after reviewing: September 17, 2025; accepted for publication: October 21, 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. Evaluation of the effectiveness of road milling tools based on granulometric analysis of the ground material. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (5): 710-727. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-710-727>

© Furmanov Denis V., Shamakhov Leonid M., Budanova Ekaterina. S., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Современный дорожный комплекс является ключевым элементом транспортной инфраструктуры и в первую очередь обеспечивает безопасность и эффективность грузовых и пассажирских перевозок. Тем не менее дорожные асфальтобетонные покрытия постепенно теряют свои функциональные характеристики под действием интенсивной эксплуатации, климатических факторов и естественного старения [1]. Этот факт требует проведения регулярных ремонтов и реконструкций дорожного полотна.

Одним из наиболее распространённых методов удаления изношенного асфальтобетонного покрытия является технология холодного фрезерования дорожно-фрезерными машинами. Данная технология не только обеспечивает качественную подготовку поверхности для укладки нового асфальтобетонного покрытия, но и позволяет повторно использовать полученный материал для строительства и реконструкции асфальтобетонных дорожных покрытий [2].

Фрезерные машины, в качестве рабочего органа оснащенные вращающимся барабаном с режущими элементами, преобразуют механическую энергию в образование новых поверхностей разрушенного материала. Энергоемкость этого процесса зависит от конструктивных параметров оборудования и характеристик измельчаемого материала. К конструктивным параметрам относится скорость вращения барабана, геометрия и износ режущего элемента, мощность энергетической установки. Так, при повышенном износе режущих элементов фрезерного барабана, энергоемкость процесса фрезерования возрастает в 2-3 раза по сравнению с новыми режущими элементами [3, 4]. Также совершенно естественно, что энергоемкость фрезерования асфальтобетона зависит от свойств обрабатываемого материала. Таким образом, проблема усугубляется тем, что непрерывно совершенствуются асфальтобетонные покрытия. Например, энергия, затрачиваемая на удаление новых типов асфальтобетонных

покрытий¹, возрастает практически в 1,5–2 раза [5] по сравнению с асфальтобетонами, изготовленными по устаревшим стандартам². В свою очередь, температура асфальтобетона значительно влияет на энергетические показатели процесса фрезерования. Так, нагрузки, действующие на режущие элементы при высокой температуре асфальтобетона, значительно ниже. Следовательно, энергоемкость процесса фрезерования в целом уменьшается при возрастании температуры асфальтобетона [6]. Вместе с тем при увеличении глубины фрезерования нагрузки, действующие на режущий элемент, будут возрастать нелинейно [7]. Задача уменьшения энергопотребления процесса фрезерования приобретает критическое значение, так как это напрямую влияет: на стоимость проведения работ по ремонту и реконструкции дорожной инфраструктуры; на выбор и обоснование мощности энергетической установки, служащей для привода рабочего органа; а также на экологическую обстановку в целом³.

Определение фактических затрат энергии является достаточно сложным процессом. Существующие подходы для оценки затрачиваемой энергии варьируются от прямых измерений мощности и крутящего момента [8] рабочего органа дорожно-фрезерной машины до математического моделирования и методов машинного обучения [9]. Такие методы обладают уникальными преимуществами и ограничениями, обусловленные точностью, сложностью реализации и адаптивностью к условиям работы.

Таким образом, целью данной работы является поиск и предварительная оценка метода косвенного определения эффективности работы фрезерных рабочих органов на основе энергетического подхода. Актуальность работы заключается в отсутствии необходимой информации о влиянии расположения режущих элементов по поверхности фрезерного барабана на затраты энергии в процессе фрезерования асфальтобетонных покрытий.

Холодное фрезерование, по сути, представляет собой процесс механического измельчения материала с образованием новых

¹ ГОСТ Р 58406.1–2020. Дороги автомобильные общего пользования. Смеси щебеночно-мастичные асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2020.

² ГОСТ 31015–2002. Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон щебеночно-мастичные. Технические условия. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003.

³ Сиваченко Л.А., Сиваченко Т.Л. Технологическое машиностроение – инновационный резерв мировой экономики: монография. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. 254 с.: ил.

поверхностей. Это позволяет изучать этот процесс, используя общую методическую базу, используемую при дроблении горных пород, руды или других каменных материалов. Энергетические подходы, которые вошли в основу этих методов, могут позволить решить данную задачу. Например, классические теории разрушения Риттингера⁴, Кирпичёва–Кика⁵ и Бонда⁶ действительно связывают энергию, необходимую для разрушения материала, с образованием новой удельной поверхности. Теория Риттингера заключается в том, что энергия, затрачиваемая на разрушение материала, пропорциональна приросту новой поверхности. То есть работа разрушения зависит от площади вновь образованных поверхностей. Теория Кирпичёва – Кика основана на зависимости энергии разрушения от объёмной деформации материала и пропорциональна уменьшению его линейных размеров (объёма). Согласно этой теории, энергия тратится на деформацию материала до его разрушения, а не только на создание новой поверхности. В свою очередь, основная идея теории Бонда заключается в объединении теории Риттингера и Кирпичёва – Кика, предложив полуэмпирическую модель. Таким образом, энергия разрушения является промежуточной между теориями Риттингера и Кирпичёва – Кика и зависит от квадратного корня из отношения начального и конечного размеров частиц. Эти теории используются в расчётах энергозатрат при дроблении и измельчении в горном деле, металлургии, производстве строительных материалов и химической промышленности. Однако более современные исследования частично подтверждают и в то же время опровергают данные гипотезы.

Так, работа [10] посвящена исследованию центробежно-ударного способа дробления доломитового щебня, уделяя внимание энергоэффективности процесса дробления. Авторы приводят зависимости и экспериментальные данные, которые позволяют рассмотреть влияние различных параметров на процесс дробления. Также авторы работы указывают на то, что определение энергоемкости процесса дробления затруднено из-за отсутствия аналитических методов, позволяющих опре-

делить количество и размер фракций, на которые разделяется исходный кусок материала под действием сил. Вместе с тем авторы работы считают, что расчет энергозатрат процесса разрушения затруднен значительным влиянием дефектов структуры материала и хаотическим распределением материала между собой.

Работа Р.П. Заднепровского [11] посвящена анализу энергоемкости процессов измельчения материалов различной структуры (твердых, жидких, вязкопластичных). В работе рассматриваются механические способы измельчения, и отмечается, что из-за разнообразия возможных структур (зернистые, слоистые, волокнистые) материалов универсального способа дробления не существует. Вместе с тем автором предложена энергетическая модель измельчения материала, которая представлена в виде выражения

$$N = N_P + N_C + N_T + N_X + N_B, \quad (1)$$

где N_P, N_C, N_T, N_X, N_B – соответственно, затраты энергии (удельные мощности) на разрушение межчастичных связей до конечной стадии измельчения, сообщение кинетической энергии продуктам измельчения, трение, динамические потери в рабочем органе, процессы реагрегации.

Под реагрегацией понимается самопроизвольный процесс укрепления ультрамелких частиц, появляющихся при измельчении. Таким образом, автором предполагается, что непременно присутствуют мельчайшие фракции и их агрегаты с внутренним сцеплением (когезией), более значительным, чем межчастичные связи. Автор представляет характеристику прочности как энергию межчастичных связей в виде произведения удельной работы, затраченной на образование единицы поверхности ($\text{Нм}/\text{м}^2$) и площади удельной поверхности. Однако определение реальных значений удельной работы достаточно затруднено. Поэтому предложена более практическая зависимость для определения удельных затрат энергии на измельчение материалов, склонных к хрупкому разрушению в следующем виде:

⁴ Peter von Rittinger. Lehrbuch der Aufbereitungskunde: in ihrer neuesten Entwicklung und Ausbildung systematisch dargestellt. Berlin, Ernst & Korn, 1867. 595p.

⁵ Kick F. Das Gesetz der proportionalen Widerstände und seine Anwendungen: Nebst Versuchen über das Verhalten verschiedener Materialien bei gleichen Formänderungen sowohl unter der Presse als dem Schlagwerk. Felix, 1885.

⁶ Bond F. C. Crushing and grinding calculations. Allis-Chalmers: Allis-Chalmers press. 1961, p. 16.

$$N = \Pi k \sigma^2 d_1 / d_2 \gamma E, \quad (2)$$

где Π – измельчение единицы массы исходного сырья, кг/с; k – коэффициент, учитывающий соотношение пластичных и упругих разрушающих деформаций, σ – характеристика прочности, дж/кг; d_1 , d_2 – среднеинтегральные максимальный и минимальный размер частиц; γ – плотность породы, кг/м³; E – модуль упругости.

К сожалению, автор работы не приводят подробных экспериментальных результатов, которые подтверждают теоретические расчеты. Например, в работе не хватает конкретных измерений энергозатрат для разных типов материалов и методов измельчения. Однако работа все равно представляет значительный научный интерес, а результаты исследования применимы для реальных производственных процессов.

Исследование, описанное в работе [12], посвящено изучению взаимосвязи между удельной энергией удара и гранулометрическим составом продуктов дробления горной породы. По мнению автора, из-за сложности процесса разрушения горной породы возникают определенные трудности определения оптимальных значений энергетических затрат при требуемом качестве дробления. Из-за чего приходится каждый раз для конкретной горной породы и условий разрушения устанавливать зависимость гранулометрического состава кусков от расхода энергии. Также автором были проведены лабораторные исследования дробимости горных пород единичным ударом на вертикальном копре, исходя из полученных результатов, определялась удельная энергия удара. Для построения зависимостей были определены средние размеры фракций и степени дробления для обоснования качества измельчения материала. Это позволило установить нелинейную зависимость максимального размера каменного материала от удельной энергии удара, так как рост степени дробления замедляется с увеличением энергии удара. Автор отмечает, что результаты противоречат линейному закону П. Риттингера, который считал, что энергия дробления от начального размера до конечного пропорциональна вновь образованной поверхности. Это связано с диссипацией энергии (тепловые потери, разлет фрагментов, образование микродефектов) с ростом скорости нагружения. Однако исследо-

вание ограничено одним типом породы (доломит), поэтому отдельный интерес представляется проверка метода на других материалах.

Автор работы [13] провел исследование эксергии асфальтобетонной смеси для анализа ресурсосберегающего потенциала её производства. Автор рассматривает три составляющие эксергии: термомеханическую, реакционную и концентрационную. Наибольшее внимание автор уделяет концентрационной составляющей, которая, в свою очередь, зависит от адгезивного взаимодействия битума с минеральными материалами и их удельной поверхностью. Приведены экспериментальные данные по работе адгезии для различных битумов и минералов, а также методы расчета удельной поверхности фракций с применением эксергетического метода термодинамического анализа⁷. Тем не менее работа требует актуализации данных и дополнительных экспериментальных исследований для повышения точности. Результаты исследования с точки зрения методики несут особую ценность для термодинамического анализа производства асфальтобетонной смеси.

Работа Л.С. Читалова и В.В. Львова [14] посвящена сравнительной оценке методов определения рабочего индекса шарового измельчения Ф. Бонда (BW_i), одного из ключевых параметров для прогнозирования энергозатрат в процессе подготовки руды. Стандартный метод Ф. Бонда позволяет напрямую оценить удельное энергопотребление. Процесс определения индекса представляет собой периодичное измельчение в стандартизованных параметрах шаровой мельницы (фиксированная скорость вращения барабана, шаровой загрузке и крупности фракции). Для определения индекса BW_i (кВтч/т) используется выражение

$$BW_i = \frac{1.1023 \cdot 44.5}{A^{0.23} \cdot G_{bp}^{0.82} \cdot 10 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)}, \quad (3)$$

где A – размер ячейки контрольного сита, мкм; G_{bp} – параметр измельчаемости в последних трех циклах теста, г/об; F_{80} – теоретический размер ячейки сита, через которое проходит 80% массы исходной пробы, мкм; P_{80} – теоретический размер ячейки сита, через которое проходит 80% массы конечного продукта, мкм.

⁷Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. М: Энергоатомиздат, 1998. 288 с.

Тем не менее основным недостатком определения индекса является то, что требуется до 12 ч тестирования и 10 кг материала, из-за чего данный метод практически невозможно использовать в исследованиях с большим количеством повторяющихся опытов. Исследователи провели комплексный анализ методов определения BW_i с точки зрения точности, ресурсозатрат и применимости. В целом работа предлагает различные подходы для определения BW_i , выбор которых зависит от исходных данных и количества повторяющихся опытов.

Авторы работы [15] демонстрируют прикладную модель измельчения твердых частиц при ударе о жесткую поверхность. Работа направлена на преодоление ограничений в классических теориях измельчения путем учета динамических параметров процесса, таких как скорость удара, время контакта и физико-механические свойства материала. Таким образом, авторами предложена уточненная механико-математическая модель, основанная на теории распространения упругих волн. Вместе с тем авторы отмечают, что традиционные теории оценки энергии измельчения содержат коэффициенты пропорциональности, определение которых затруднено. Исходя из анализа работы, сложно сказать, учитывает ли полученная модель влияние формы частицы, так как в работе рассматривается только стержень. Уточненная модель, учитывающая волновые процессы и динамические параметры, позволяет более точно оценивать энергию разрушения и прогнозировать результаты измельчения. Но для широкого внедрения необходима экспериментальная валидация на разнообразных материалах.

Работа [16] описывает проблему низкой энергоэффективности процессов измельчения минералов. Автор определяет теоретический предел энергоэффективности измельчения при сжатии и сравнивает его с фактической эффективностью, рассчитанной через индекс Бонда. Для определения теоретического предела эффективности используется модель хрупкого разрушения частицы с центральной трещиной при сжатии. На основе уравнений механики разрушения и упругих свойств материала (модуль Юнга, коэффициент Пуассона) рассчитывается максимальная доля энергии, преобразуемой в создание новой поверхности трещин. Далее рассчитывается фактическая эффективность через соотношение энергии, затраченной на создание новой поверхности и работы, определенной по индексу Бонда. Относительная эффективность введена как

практический показатель, отражающий близость процесса к теоретическому пределу, и позволяет оценить потенциал конкретных разработок. Исследование демонстрирует, что современные процессы измельчения сильно отличаются от теоретического предела эффективности.

Исследование свойств горных пород при измельчении в механических мельницах представлено в работе [17]. Авторы работы рассматривают процесс дробления и измельчения с точки зрения снижения энергоемкости при сохранении эффективности. В статье представлены экспериментальные данные величин удельной энергии образования новых поверхностей ($\text{Дж}/\text{м}^2$), требуемой для разрушения различных горных пород. Более плотные и прочные породы (базальт, гранит) требуют больших энергозатрат, что согласуется с теорией разрушения хрупких материалов. Исходя из данных, полученных авторами, крупность частиц обратно пропорциональна энергоэффективности, а также минимизация энергопотребления достигается за счет коэффициента трения и гранулометрии материала.

Несмотря на широкое применение технологии холодного фрезерования, оценка энергозатрат этого процесса остается сложной задачей. В настоящее время существует множество подходов для определения энергетических затрат при дроблении каменных материалов. Однако эти подходы имеют ряд ограничений: большинство существующих методов фокусируются на оценке энергозатрат, связанных с разрушением каменной фракции, тогда как процесс разрушения битумных связей остается малоизученным. В то же время точная оценка энергозатрат требует учета площади вновь образованных поверхностей, однако существующие методы гранулометрического анализа не всегда позволяют получить достоверные данные из-за сложности формы частиц и их неоднородности. В рамках настоящего исследования используется энергетический подход, связывающий затраты энергии с образованием новых поверхностей. Этот метод требует экспериментального подтверждения и адаптации к условиям фрезерования асфальтобетона, что делает его актуальным для дальнейшего изучения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для определения энергетических параметров рабочего процесса фрезерования асфальтобетонов, при котором происходит разрушение не только битумных связей между частицами

заполнителя, но и самого заполнителя, требуется проанализировать фракционный состав асфальтобетонного гранулята. Одним из основных показателей, определяющих затраты энергии при разрушении асфальтобетонного покрытия, является образование новых поверхностей в процессе фрезерования. Исходя из этого, увеличение суммарной площади вновь образованных частиц асфальтобетонного гранулята будет сигнализировать об увеличении затраченной энергии на их формирование. Однако определение гранулометрического состава⁸ позволяет оценить только распределение частиц по фракциям и не дает представления об энергетических затратах. Чтобы выявить зависимость между возникающими энергозатратами при фрезеровании асфальтобетона и геометрией частиц асфальтобетонного гранулята, необходимо определить площадь поверхности фракций разрушенного материала. Для определения геометрических параметров частиц материала применяется технология трехмерного сканирования, которая обеспечивает де-

тиализированную модель гранул, образованных в процессе фрезерования.

В процессе ремонта одной из придорожной территории г. Ярославля с применением технологии холодного фрезерования было получено два набора асфальтобетонного гранулята из асфальтобетона марки Б⁹ типа 2. Первый и второй наборы асфальтобетонного гранулята получены с применением двух фрезерных барабанов, отличающихся только схемой расстановки режущих элементов (рисунок 1). Размеры фрезеруемой выемки, скорость подачи фрезерного оборудования и температура асфальтобетона не изменились. Комплекты режущих элементов на двух барабанах использовались одинаковой модели А6/20¹⁰. Расстановка режущих элементов основана на гипотезе о том, что нелинейная характеристика резания асфальтобетонного материала позволяет использовать новый тип расстановки режущих элементов с максимальной площадью сечения срезаемой стружки, снизив общие затраты энергии.

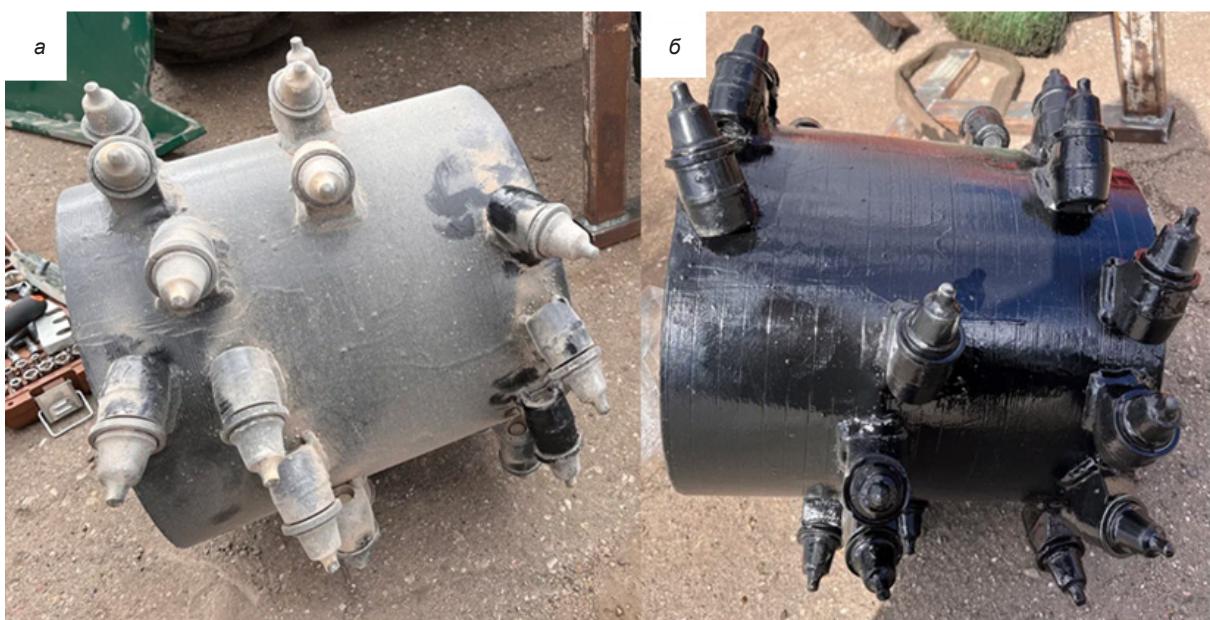


Рисунок 1 – Сменные фрезерные барабаны: а – фрезерный барабан № 1; б – фрезерный барабан № 2
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Replaceable milling drums. a – milling drum №1, b – milling drum №. 2
Source: compiled by the authors.

⁸ ГОСТ 33029–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Определение гранулометрического состава. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.

⁹ ГОСТ 9128–2013. Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 55 с.

¹⁰ ОАО «КЗТС». Оригинальная конструкция дорожных резцов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.kzts.ru/core/user_files/Road.pdf (дата обращения: 25.03.2023).

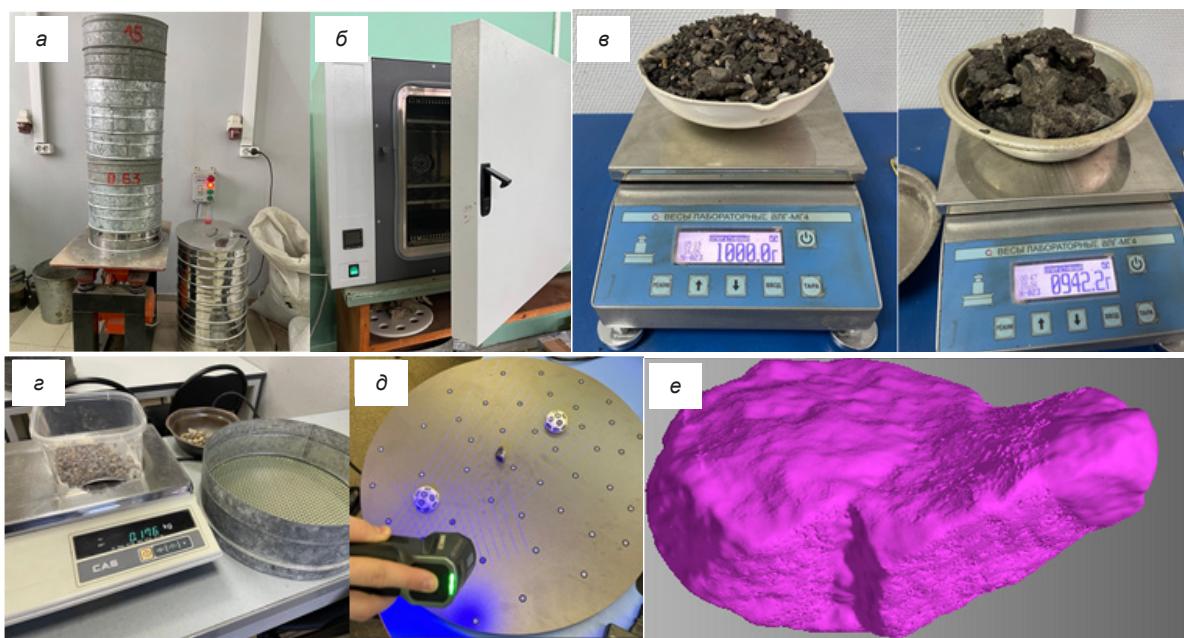


Рисунок 2 – Определение геометрических параметров щебня:
 а – просеивание асфальтового гранулята в ситах стандартного сечения;
 б – выжигание органического вяжущего в печи;
 в – рассеянные фракции асфальтобетонного гранулята и отдельных конгломератов асфальтобетона;
 г – определение массовой доли каждой фракции; д – процесс сканирования;
 е – образец полученной 3D-модели частицы щебня

Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Determination of the geometric parameters of crushed stone:
 a – sieving asphalt granulate in the sieves with the standard cross-section; b – burning out the organic binder in the furnace;
 c – dispersed fractions of asphalt granulate and separate asphalt concrete conglomerates;
 d – determination of the share mass of each fraction; e – scanning process;
 e – sample of the obtained 3D model of the crushed stone particle
 Source: compiled by the authors.

Полученный асфальтобетонный гранулят рассеивался в ситах с круглыми отверстиями¹¹ диаметром 20, 15, 10, 5, 3, 1,25, 0,63, 0,315, 0,16 мм на вибрационной установке (рисунок 2, а). Рассеянные фракции гранулята, а также отдельные конгломераты асфальтогранулята (рисунок 2, в) были подвергнуты термической обработке в муфельной печи (рисунок 2, б) при температуре 500 °С с целью выжигания органического вяжущего¹². После этого повторялась процедура рассева для полученного каменного материала в том же наборе сит с

дальнейшим взвешиванием каждой фракции на лабораторных весах¹³ (рисунок 2, г). Далее из фракций, оставшихся над ситами с отверстиями 15, 10 и 5 мм, были отобраны по три образца, которые в дальнейшем сканировались (рисунок 2, д). В рамках данной работы выбор трех фракций для трехмерного сканирования ограничен возможностями оборудования. По полученным полигональным моделям определяется площадь поверхности и объем каждого образца (рисунок 2, е).

¹¹ ГОСТ 51568–99. Сита лабораторные из металлической проволочной сетки. Технические условия. М.: Госстандарт России, 1999. 8 с.

¹² ГОСТ 58401.15–2019. Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон. Определение содержания битумного вяжущего методом выжигания. М.: Стандартинформ, 2019. 8 с.

¹³ ГОСТ 24104–2001. Весы лабораторные. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2007. 8 с.

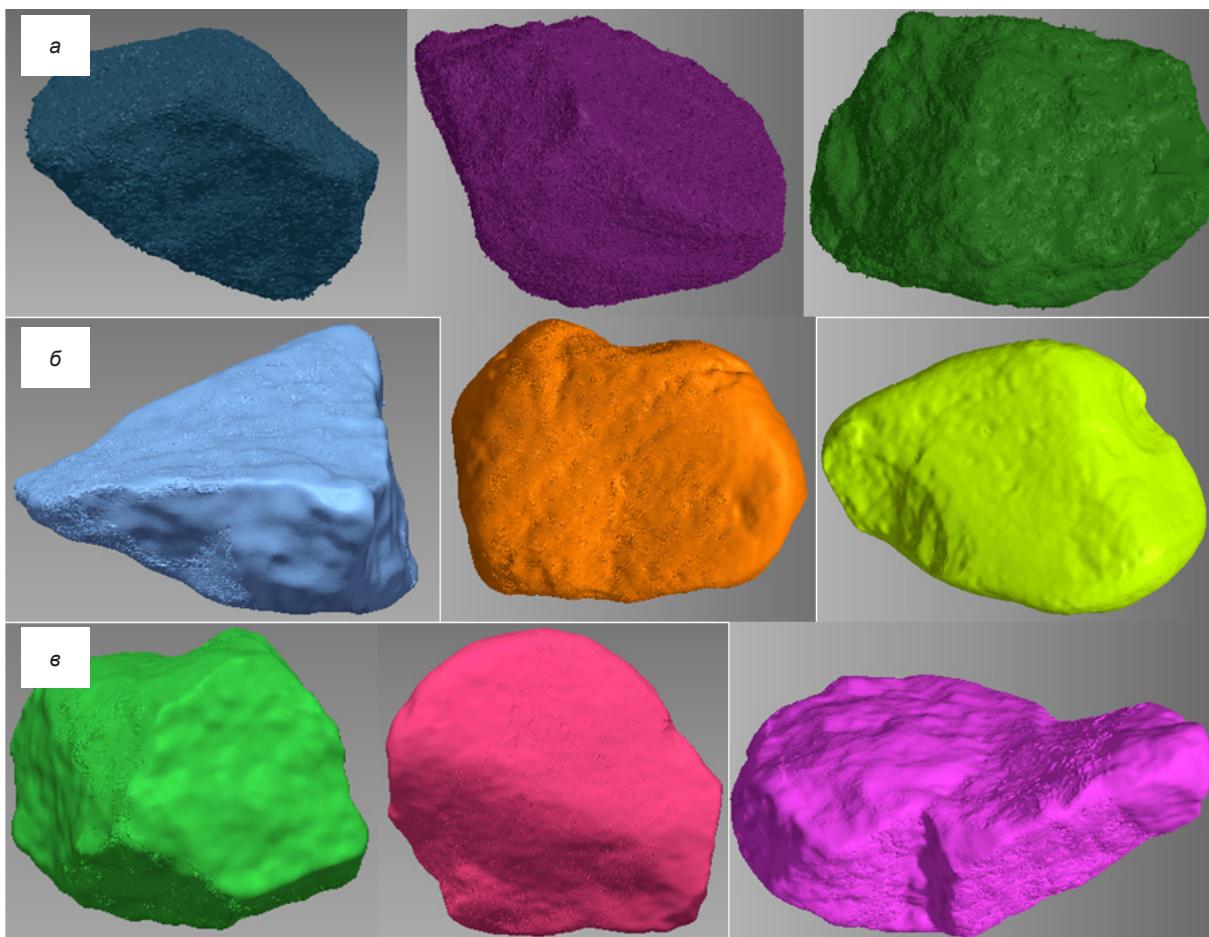


Рисунок 3 – Примеры полигональных моделей для:
 а – асфальтобетонного гранулята, оставшегося над ситами 5, 10, 15 мм соответственно;
 б – каменной фракции, оставшейся над ситами 5, 10, 15 мм соответственно и полученной
 в ходе выжигания органического связующего из асфальтобетонного гранулята;
 в – каменной фракции, оставшейся над ситами 5, 10, 15 мм соответственно, полученной в ходе выжигания
 органического связующего из отдельных конгломератов асфальтогранулята
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Examples of polygonal models for:
 a – asphalt-concrete granulate remaining above 5, 10, 15 mm sieves, respectively;
 b – stone fraction remaining above 5, 10, 15 mm sieves, respectively, and obtained during
 the burning out of organic binder from asphalt-concrete granulate;
 c - stone fraction remaining above 5, 10, 15 mm sieves, respectively,
 obtained during the burning out of organic binder from separate asphalt granulate conglomerates
 Source: compiled by the authors.

Исходя из методики, представленной в работе [18], возможно определить затраты энергии на образование новых поверхностей. Так, удельная работа, затрачиваемая непосредственно на разрушение материала, включает две составляющие:

$$A_{\text{изм}} = A_1 + A_2, \quad (4)$$

где A_1 – удельная работа, затрачиваемая на разрушение битумных связей, Дж/кг;

A_2 – удельная работа, затрачиваемая на дробление каменной фракции, Дж/кг.

Таким образом, определить затрачивающую энергию на разрушение битумных связей возможно по следующей формуле:

$$A_1 = k_1 \cdot (S_{\text{сум}} - (S_3 - S_2)), \quad (5)$$

где k_1 – удельная энергия разрушения битумных связей (из работы [18], $k_1 = 1279$ Дж/м²).

$S_{\text{сум}}$ – суммарная удельная площадь новых поверхностей всех фракций асфальтобетонного гранулята, $\text{м}^2/\text{кг}$.

$S_{3,2}$ – суммарная удельная площадь поверхностей каменной фракции до и после процесса фрезерования, $\text{мм}^2/\text{г}$.

В свою очередь, затрачиваемая энергия на дробление каменной фракции определяется по формуле

$$A_2 = k_2 \cdot (S_3 - S_2), \quad (6)$$

где k_2 – удельная энергия разрушения щебня (из работы [17], $k_2 = 140 \text{ Дж/м}^2$).

Для определения площадей поверхности асфальтобетонного гранулята, а также каменной фракции с выжженной органической

частью до и после процесса фрезерования используется технология трехмерного сканирования. Так, отбираются по 3 образца из фракций, оставшихся над ситами с диаметром отверстий 5, 10, 15 мм и сканируются с разрешением 0,05 $\text{мм}/\text{м}$. Примеры полученных в ходе сканирования полигональных моделей асфальтобетонного гранулята и каменных фракций из асфальтобетонного гранулята (после фрезерования), а также отдельных конгломератов асфальтогранулята (до фрезерования) приведены на рисунке 3. Значения полученных площадей образцов представлены в таблице 1, а их объемов в таблице 2. График зависимости площади поверхности и объема измеряемого материала представлен на рисунке 4.

Таблица 1
Результаты измерения площадей полигональных моделей
Источник: составлено авторами.

Table 1
Results of measuring the areas of polygonal models
Source: compiled by the authors.

Диаметр отверстия сита, мм	Усредненная площадь поверхности асфальтобетонного гранулята, мм^2	Усредненная площадь каменной фракции после фрезерования, мм^2	Усредненная площадь каменной фракции до фрезерования, мм^2
5	407.176	269.839	282.5536
10	893.42	615.0587	640.0195
15	1873.953	977.3034	991.18
Уравнение регрессии	$A_i = 43,578 \cdot d^{1.362}$	$A_i = 40,949 \cdot d^{1.1733}$	$A_i = 44,927 \cdot d^{1.1464}$
Значение достоверности аппроксимации, R^2	0,9824	0,987	0,995

Таблица 2
Результаты измерения объема полигональных моделей
Источник: составлено авторами.

Table 2
Results of measuring the volume of polygonal models
Source: compiled by the authors.

Диаметр отверстия сита, мм	Усредненный объем асфальтобетонного гранулята, мм^3	Усредненный объем каменной фракции после фрезерования, мм^3	Усредненный объем каменной фракции до фрезерования, мм^3
5	376.63	302.7273	316.9877
10	1442.07	1126.583	1172.303
15	4913.49	1887.726	1914.53
Уравнение регрессии	$V_i = 8.7687 \cdot d^{2.2947}$	$V_i = 20.696 \cdot d^{1.6908}$	$V_i = 22.707 \cdot d^{1.6639}$
Значение достоверности аппроксимации, R^2	0.9847	0.9907	0.9887

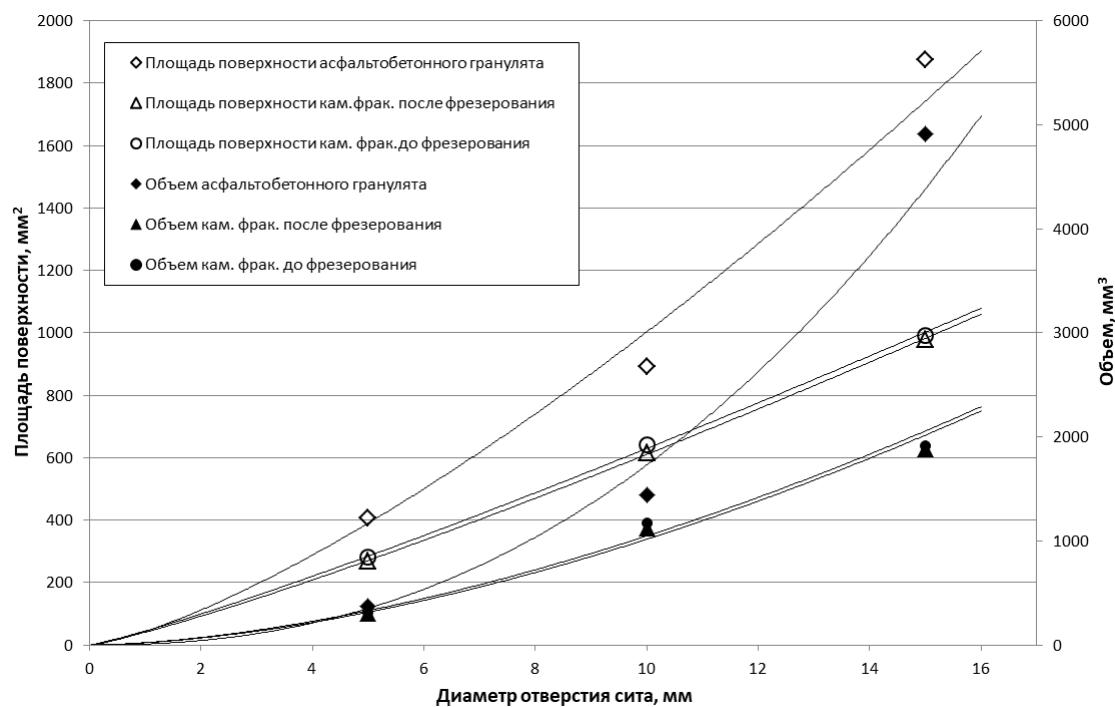


Рисунок 4 – Графики зависимости площади поверхности и объема асфальтобетонного гранулята и каменной фракции до и после фрезерования от размеров отверстия сита
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Graphs of the dependence of the surface area and volume of asphalt concrete granulate and stone fraction before and after milling on the sieve opening size
Source: compiled by the authors.

В свою очередь, суммарная удельная площадь поверхности всех фракций может быть определена исходя из зависимости

$$S_{y\delta} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i \cdot \delta_i}{\rho \cdot V_i}, \quad (7)$$

где A_i – средняя площадь поверхности, м^2 ;
 δ_i – массовая доля каждой фракции, %;
 V_i – средний объем частицы, м^3 ;
 ρ – плотность частицы, $\text{кг}/\text{м}^3$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По представленной методике производилась косвенная оценка количества расходуемой энергии на удаление асфальтобетонных

покрытий в процессе холодного фрезерования. Исходя из зависимости (7) и уравнений регрессии, представленных в таблицах 1 и 2, возможно определить суммарные площади для фракций асфальтобетонного гранулята (таблица 3) и минерального заполнителя до (таблица 4) и после фрезерования (таблица 5). Плотность асфальтобетонного гранулята определялась путем взвешивания тары фиксированного объема, наполненного материалом, затем полученное значение массы материала делится на объем тары. Таким образом, средняя плотность асфальтобетонного гранулята, полученного из асфальтобетона марки Б типа 2, составляет $1880 \text{ кг}/\text{м}^3$. Плотность каменного материала примем $2650 \text{ кг}/\text{м}^3$ [12].

Таблица 3
Удельная площадь фракций асфальтобетонного гранулята
Источник: составлено авторами.

Table 3
Specific area of asphalt concrete granulate fractions
Source: compiled by the authors.

Диаметр отверстия сита, мм	Массовая доля (фрез. барабан № 1), %	Массовая доля (фрез. барабан № 2), %	Усредненная площадь поверхности, м ²	Усредненный объем, м ³	Удельная площадь фракции (фрез. барабан № 1), м ² /кг	Удельная площадь фракции (фрез. барабан № 2), м ² /кг
15	16.1	18.8	$1873.953 \cdot 10^{-6}$	$4913.49 \cdot 10^{-9}$	0.03266	0.03814
10	14.1	22.2	$893.42 \cdot 10^{-6}$	$1442.07 \cdot 10^{-9}$	0.04645	0.07315
5	29.6	26.0	$407.176 \cdot 10^{-6}$	$376.63 \cdot 10^{-9}$	0.17022	0.1495
3	13.1	11.5	$194.5837 \cdot 10^{-6}$	$109.09 \cdot 10^{-9}$	0.12429	0.1091
1.25	11.0	9.6	$59.055 \cdot 10^{-6}$	$14.63 \cdot 10^{-9}$	0.23614	0.2061
0.63	7.9	6.3	$23.226 \cdot 10^{-6}$	$3.037 \cdot 10^{-9}$	0.32133	0.25625
0.315	5.6	3.8	$9.036 \cdot 10^{-6}$	$0.62 \cdot 10^{-9}$	0.43479	0.295
0.16	1.7	1.1	$3.6 \cdot 10^{-6}$	$0.13 \cdot 10^{-9}$	0.24828	0.16065
Поддон	0.9	0.7	-	-	0.01466	0.009
Суммарная удельная площадь:					1.62885	1.297

Таблица 4
Удельная площадь фракций минерального заполнителя до процесса фрезерования
Источник: составлено авторами.

Table 4
Specific area of mineral aggregate fractions before the milling process
Source: compiled by the authors.

Диаметр отверстия сита, мм	Массовая доля (обр. № 1), %	Массовая доля (обр. № 2), %	Усредненная площадь поверхности, м ²	Усредненный объем, м ³	Удельная площадь фракции (обр. № 1), м ² /кг	Удельная площадь фракции (обр. № 2), м ² /кг
15	11.6	8.1	$991.18 \cdot 10^{-6}$	$1914.53 \cdot 10^{-9}$	0.02266	0.01582
10	9.5	11.8	$640.0195 \cdot 10^{-6}$	$1172.303 \cdot 10^{-9}$	0.019572	0.02431
5	16.3	16.5	$282.5536 \cdot 10^{-6}$	$316.9877 \cdot 10^{-9}$	0.054827	0.0555
3	7.5	7.9	$158.3 \cdot 10^{-6}$	$141.2674 \cdot 10^{-9}$	0.031714	0.0334
1.25	9.8	10.3	$58.024 \cdot 10^{-6}$	$32.9161 \cdot 10^{-9}$	0.065189	0.0685
0.63	11.1	11.1	$26.45 \cdot 10^{-6}$	$10.526 \cdot 10^{-9}$	0.10526	0.1053
0.315	14.2	14.1	$11.95 \cdot 10^{-6}$	$3.322 \cdot 10^{-9}$	0.19276	0.1914
0.16	9.3	8.6	$5.496 \cdot 10^{-6}$	$1.076 \cdot 10^{-9}$	0.17924	0.16575
Поддон	10.7	11.6	-	-	0.08043	0.0866
Суммарная удельная площадь:					0.751659	0.7466

Таблица 5
Удельная площадь фракций минерального заполнителя после процесса фрезерования
Источник: составлено авторами.

Table 5
Specific area of mineral aggregate fractions after the milling process
Source: compiled by the authors.

Диаметр сита, мм	Массовая доля (фрез. барабан № 1), %	Массовая доля (фрез. барабан № 2), %	Усредненная площадь поверхности, м ²	Усредненный объем, м ³	Удельная площадь фракции (фрез. барабан № 1), м ² /кг	Удельная площадь фракции (фрез. барабан № 2), м ² /кг
15	7.1	9.8	$977.3 \cdot 10^{-6}$	$1887.726 \cdot 10^{-9}$	0.01387	0.01915
10	10.1	12.2	$615.06 \cdot 10^{-6}$	$1126.583 \cdot 10^{-9}$	0.0208	0.02513
5	18.8	17.9	$269.84 \cdot 10^{-6}$	$302.73 \cdot 10^{-9}$	0.0632	0.060201
3	8.4	8.4	$148.61 \cdot 10^{-6}$	$132.62 \cdot 10^{-9}$	0.03552	0.03552
1.25	9.1	9.1	$53.2 \cdot 10^{-6}$	$30.182 \cdot 10^{-9}$	0.0605	0.06053
0.63	11.1	13.7	$23.8 \cdot 10^{-6}$	$9.475 \cdot 10^{-9}$	0.10526	0.12992
0.315	15.8	18.1	$10.56 \cdot 10^{-6}$	$2.935 \cdot 10^{-9}$	0.2145	0.24571
0.16	10	7.9	$4.77 \cdot 10^{-6}$	$0.934 \cdot 10^{-9}$	0.1927	0.15227
Поддон	9.6	2.9	-	-	0.075	0.02175
Суммарная удельная площадь:					0.7814	0.75019

Исходя из результатов, представленных в таблицах 3,4,5, возможно определить удельную энергию, затрачиваемую на разрушение битумных связей и минерального заполнителя по формулам (5) и (6) соответственно. Таким образом, удельная работа, затрачиваемая на разрушения битумных связей фрезерным барабаном № 1, равна 2045.157 Дж/кг, когда у фрезерного барабана № 2 1654.288 Дж/кг. В свою очередь, удельная работа, расходуемая на разрушение каменной фракции фрезерным барабаном № 1 составляет 4.175 Дж/кг, в то же время энергия, расходуемая на разрушение минеральной составляющей асфальтобетона в процессе работы фрезерного барабана № 2 всего 0.506 Дж/кг.

Полученный результат в первую очередь указывает на то, что в процессе фрезерования практически вся энергия уходит на разрушение битумных связей, что подтверждает результаты работы [18]. Суммарная удельная работа измельчения, затраченная в процессе фрезерования, исходя из формулы (4) для фрезерного барабана № 1 будет равна 2049.332 Дж/кг и для фрезерного барабана № 2 1654.764 Дж/кг. Таким образом, расстановка режущих эле-

ментов по поверхности фрезерного барабана № 2 является эффективнее с точки зрения затрачиваемой энергии более чем на 19.25%.

Вероятно, фракционный состав асфальтобетонного гранулята зависит от расположения режущих элементов, что может позволить регулировать его с заданной точностью. Так, обратив внимание на рисунок 5, легко заметить, что в процессе работы фрезерного барабана № 2 крупной фракции образуется больше и в то же время меньше мелкой фракции в сравнение с фрезерным барабаном № 1.

Для определения полных затрат энергии на разрушение битумных связей при фрезеровании воспользуемся зависимостью затрачиваемой удельной энергии на разрушение каждой фракции асфальтобетонного гранулята, полученного при фрезеровании разными фрезерными барабанами (рисунок 6). Если затраты энергии пропорциональны площади поверхности частиц, то для оценки затрат энергии достаточно определить площади под графиками. В упрощенном виде уравнение (8) можно представить как сумму произведений удельных поверхностей всех фракций на удельную энергию разрушения битумных связей.

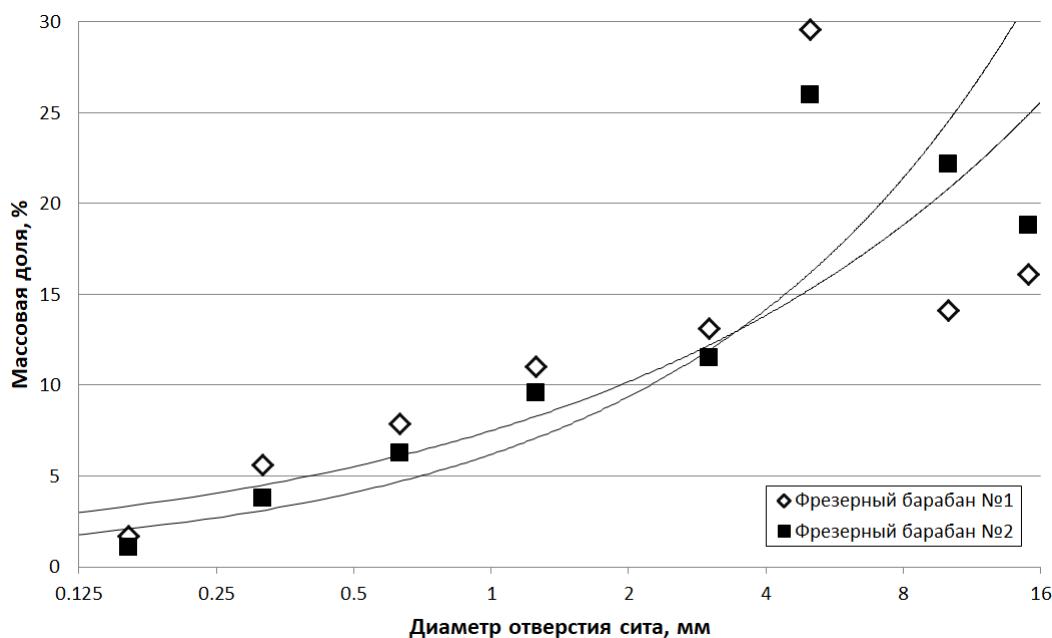


Рисунок 5 – График зависимости массовой доли асфальтобетонного гранулята от его размеров
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Graph of the dependence of the asphalt concrete granulate mass share on its size
Source: compiled by the authors.

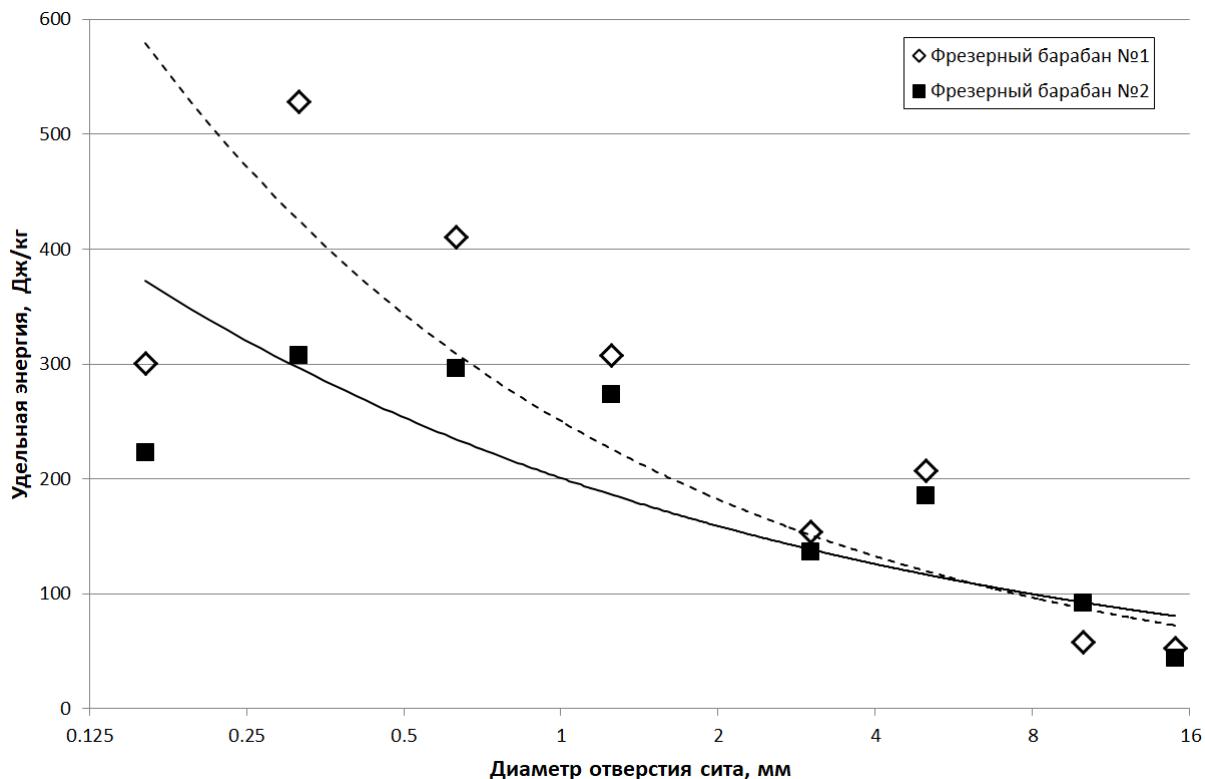


Рисунок 6 – График зависимости удельных энергий каждой фракции от размеров асфальтобетонного гранулята
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Graph of the dependence of the specific energies of each fraction on the size of the asphalt concrete granulate.
Source: compiled by the authors.

$$A_i = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} a \cdot d^n dx \approx \sum_{i=1}^n S_{y\vartheta,i} \cdot k_1, \quad (8)$$

где A_i – энергия, затрачиваемая на разрушение битумных связей, Дж/кг;

a – эмпирический коэффициент;

n – показатель степени, зависящий от свойств материала;

$S_{y\vartheta,i}$ – удельная площадь поверхности каждой фракции, $\text{м}^2/\text{кг}$;

k_1 – удельная энергия разрушения битумных связей (из работы [18], $k_1 = 1279 \text{ Дж/м}^2$).

Энергия, затрачиваемая на разрушения битумных связей при работе фрезерного барабана № 1, составляет 2083,3 Дж/кг, для фрезерного барабана № 2 всего 1658,9 Дж/кг. Сравнение ранее полученных значений с данными из зависимости (8) демонстрируют расхождение результатов с погрешностью не более 2%. Это позволяет определять затраты энергии на разрушение битумных связей, не прибегая к определению площади поверхности каменной фракции до и после фрезерования.

Исходя из полученных результатов, сделаны следующие выводы:

1. До фрезерования и после фрезерования закономерности развития удельных поверхностей каменной фракции (см. рисунок 4) асфальтобетона практически не отличаются и можно использовать следующие обобщенные уравнения регрессии для определения площади (9) и объема (10).

$$A_i = 42.918 \cdot d^{1.1596}; \quad (9)$$

$$V_i = 21.692 \cdot d^{1.6771}. \quad (10)$$

2. Для определения битумоемкости при рециклинге или вторичном использовании асфальтобетонного гранулята получены зависимости для определения площади поверхности (11) и объема (12). Они позволяют более точно определять удельно площадь поверхности гранул асфальтобетона, а значит и наиболее качественно производить подбор необходимого количества битума и минеральных добавок.

$$A_i = 43.578 \cdot d^{1.362}; \quad (11)$$

$$V_i = 8.7687 \cdot d^{2.2947}. \quad (12)$$

3. Как видно из рисунка 5, фрезерный барабан № 2 образовывает крупной фракции больше и существенно меньше мелкой фракции в сравнении с барабаном № 1. Это демонстрирует, что фрезерный барабан № 1 тратит больше энергии на образование новых поверхностей.

4. Основная часть энергии при фрезеровании асфальтобетонных покрытий расходуется на разрушение битумных связей, тогда как на дробление каменной фракции затрачивается значительно меньше энергии. Это указывает важность дальнейшего изучения процессов, связанных с разрушением битумных связей, для снижения энергопотребления.

5. Полученные результаты наглядно демонстрируют влияние расположения режущих элементов на фрезерном барабане. Это указывает на возможность оптимизации конструкции фрезерного барабана с точки зрения потребляемой энергии в процессе фрезерования.

6. Методика, предложенная в работе, может быть рекомендована не только для оценки энергозатрат при фрезеровании асфальтобетона, но и для других процессов измельчения твердых материалов и дисперсионнаполненных композитов.

7. Энергозатраты зависят от таких факторов, как толщина срезаемой стружки, температура асфальтобетона и конструктивные параметры оборудования. Например, увеличение толщины стружки и снижение температуры материала приводят к росту энергопотребления. Эти факторы нужно учитывать при проектировании и эксплуатации фрезерного оборудования.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследование вносит важный вклад в совершенствование методов оценки энергопотребления при фрезеровании и предлагает эффективный подход для снижения энергетических затрат в дорожной отрасли. Разработанная методика позволяет точнее определять расход энергии и может быть использована для повышения экономической и экологической эффективности ремонтных работ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Юсуфов А.С., Магомедалиев Г.Г., Дагиров А.Р., Хиясов М.А. Анализ износостойкости асфальтобетона // *E-Scio*. 2019. № 7(34). С. 77–85. EDN BGTSGW.
2. Алексиков С.В., Лескин А.И., Гофман Д.И. и др. Применение асфальтогранулята при ремонте дорог Волгограда // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. № 1(94). С. 43–52. DOI: 10.35211/18154360_2024_1_43. EDN ROVZPT.
3. Фурманов Д.В., Шамахов Л.М., Лысаков Н.Э. Влияние износа режущего элемента дорожной фрезы на силу сопротивления резанию асфальтобетона // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 2 (90). С. 204–216. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-204-216>
4. Шамахов Л.М., Фурманов Д.В. Влияние износа режущих элементов на эффективность работы дорожной фрезы // Тракторы и сельхозмашини. 2025. Т. 92, № 2. С. 204–212. DOI: 10.17816/0321-4443-634723 EDN: XTCICV
5. Фурманов Д.В., Шамахов Л.М., Лысов Н.Э. Сравнительный анализ энергоёмкости фрезерования новых марок асфальтобетонов // Строительные и дорожные машины. 2023. № 1. С. 24–28. EDN TILVYQ.
6. Furmanov D.V., Lysakov N. E., Shamakov L. M. Effect of asphalt concrete strength properties on energy intensity of milling // Journal of Physics: Conference Series: 5, Omsk, 16–17 марта 2021 года. Omsk, 2021. Р. 012086. DOI 10.1088/1742-6596/1901/1/012086. EDN ARQQDE.
7. Furmanov D. V., Lysakov N. E., Shamakov L. M. Study of Asphalt Milling Workflow Dynamics // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2022. Р. 442–450. DOI 10.1007/978-3-030-85233-7_54. EDN ULFPPK.
8. Бордюг А.С. Применение оптоволоконной оптической системы для контроля крутящего момента вала // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2021. № 3. С. 101–106. DOI 10.24143/2073-1574-2021-3-101-106. EDN VMWLZW.
9. Сахапов Р.Л., Махмутов М.М. Влияние исследуемых факторов на мощность фрезерования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17, № 2-4. С. 896–899. EDN UMEJOP.
10. Бусел А.В., Буко А.Н. Получение доломитового щебня в центробежноударной дробилке // Наука и техника. 2013. № 1. С. 53–56. EDN STBDFX.
11. Заднепровский Р.П. Энергетика измельчения материалов различного физического состояния // Технологии бетонов. 2014. № 7(96). С. 11–15. EDN TAQKEP.
12. Симонов П.С. Экспериментальное исследование дробления горной породы единичным ударом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 1. С. 71–79. DOI 10.25018/0236-1493-2020-1-0-71-79. EDN VIEZDF.
13. Романюк В.Н. Эксергия асфальтобетонной смеси // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2003. № 4. С. 69–76. EDN GDOLBM.
14. Читалов Л.С., Львов В.В. Сравнительная оценка методов определения рабочего индекса шарового измельчения бонда // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 1. С. 130–145. DOI 10.25018/0236-1493-2021-1-0-130-145. EDN BDVFJD.
15. Гурьянов Г.А., Абдеев Б.М., Клименко Е.А. Прикладная модель измельчения твердой частицы простой формы ударом о жесткую поверхность // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2018. № 1. С. 110–120. DOI 10.15593/perm.mech/2018.1.10. EDN YUPFAN.
16. Tromans D. Mineral comminution: Energy efficiency considerations // Minerals Engineering. 2008. Vol. 21. P. 613–620.
17. 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 10.21440/2307-2091-2021-2-81-87. EDN VZGVFP.
18. Фурманов Д.В., Буданова Е.С. Оценка эффективности процесса фрезерования на основе гранулометрического анализа щебеночно-масличного асфальтобетонного гранулята // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 852–866. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-852-866>

REFERENCES

1. Yusufov A.S., Magomedaliev G.G., Dagirov A.R., Hiyasov M.A. Analysis of the wear resistance of asphalt concrete. *E-Scio*. 2019; 7(34): 77-85. (In Russ.). EDN BGTSGW.
2. Alexikov S.V., Leskin A.I., Hoffman D.I. et al. The use of asphalt granulate in the repair of roads in Volgograd. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*. 2024; 1(94): 43-52. (In Russ.). DOI 10.35211/18154360_2024_1_43. EDN ROVZPT
3. Furmanov D.V., Shamakov 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.). <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-204-216>. EDN: KLHYLT
4. Shamakov L.M., Furmanov D.V. The effect of wear of cutting elements on the efficiency of a road milling cutter. *Tractors and agricultural machinery*. 2025; 92(2): 204-212. (In Russ.). DOI: 10.17816/0321-4443-634723. EDN: XTCICV
5. Furmanov D.V., Shamakov L.M., Lysakov N.E. Comparative analysis of the energy intensity of milling new grades of asphalt concrete. *Construction and road machinery*. 2023; 1:24-28. (In Russ.). EDN TILVYQ.

6. Furmanov D.V., Shamakov L.M., Lysakov N.E. Effect of asphalt concrete strength properties on energy intensity of milling. *Journal of Physics: Conference Series*: 5, Omsk, 2021; p. 012086. DOI 10.1088/1742-6596/1901/1/012086. EDN AR-QQDE.
7. Furmanov D.V., Lysakov N.E., Shamakov L.M. Study of Asphalt Milling Workflow Dynamics. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2022; P. 442-450. DOI 10.1007/978-3-030-85233-7_54. EDN ULFPPK.
8. Bordyug A.S. Application of a fiber-optic optical system for controlling shaft torque. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and Technology*. 2021; 3: 101-106. (In Russ.). DOI 10.24143/2073-1574-2021-3-101-106. EDN VMWLZW.
9. Sakhapov R.L., Makhmutov M.M. The influence of the studied factors on milling power. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2015; 17, 2(4): 896-899. (In Russ.). EDN UMEJOP.
10. Busel A.V., Buko A.N. Obtaining dolomite crushed stone in a centrifugal impact crusher. *Science and Technology*. 2013; 1: 53-56. (In Russ.). EDN STB-DXF.
11. Zadneprovsky R.P. The power engineering of grinding materials of various physical conditions. *Technologies of concrete*. 2014; № 7(96): 11-15. (In Russ.). EDN TAQKEP.
12. Simonov P.S. Experimental study of rock crushing by a single impact. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2020; 1: 71-79. (In Russ.). DOI 10.25018/0236-1493-2020-1-0-71-79. EDN VIEZDF.
13. Romanyuk V.N. Exergy of asphalt concrete mix. *Energy. Proceedings of higher educational institutions and energy associations of the CIS*. 2003; 4: 69-76. (In Russ.). EDN GDOLBM.
14. Chitalov L.S., Lviv V. Comparative evaluation of methods for determining the working index of bond ball grinding. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2021; 1: 130-145. (In Russ.). DOI 10.25018/0236-1493-2021-1-0-130-145. EDN BDVFJD.
15. Guryanov G.A., Abdeev B.M., Klimenko E.A. An applied model of crushing a simple solid particle by impact on a hard surface. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*. 2018; 1: 110-120. (In Russ.). DOI 10.15593/perm.mech/2018.1.10. EDN YUPFAN.
16. Tromans D. Mineral comminution: Energy efficiency considerations. *Minerals Engineering*. 2008; 21: 613-620.
17. Golik V.I., Kojiev H.H., Golodov M.A., Armeiskov V.N. Investigation of the properties of rocks during crushing and grinding in mechanical mills. *Proceedings of the Ural State Mining University*. 2021; 2(62): 81-87. (In Russ.). DOI 10.21440/2307-2091-2021-2-81-87. EDN VZGVFP.
18. Furmanov D.V., Budanova E.S. Efficiency evaluation of the milling process based on the granu-

lometric analysis of crushed stone-mastic asphalt concrete granulate. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): 852-866. (In Russ.). <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-852-866>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД СОАВТОРОВ

Фурманов Д.В. Организация работы авторского коллектива, формирование направления и формулирование проблемы исследования, постановка задач и методики проведения исследования, корректирование 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

Furmanov. Denis V. *Organization of the author's team work, formulating the research problem and direction, setting the objectives and methodology for the research conducting, correction of the article material*.

Shamakov Leonid M. *Review of the previous studies, preparing and conducting experimental studies, processing of the obtained data, collecting of the article material*.

Ekaterina S. Budanova. *Arranging and conducting experimental studies, processing the obtained results, working out individual materials for the article*.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

SPIN-код: 6237-2284,

e-mail: denis_furmanov@mail.ru

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

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

SPIN-код: 9115-7950,

e-mail: leonid.shamakov@yandex.ru

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

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

SPIN-code: 7600-9464,

e-mail: Cat156026@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Furmanov Denis V. – Cand. of Technical Sciences, Associate Professor, Construction and Road Machinery Department, Yaroslavl State Technical University (88, Moskovskiy Prospect, Yaroslavl, 150023)

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

SPIN-code: 6237-2284,

e-mail: denis_furmanov@mail.ru

Shamakhov Leonid M. – Postgraduate Student, Assistant, Construction and Road Machinery Department, Yaroslavl State Technical University (88, Moskovskiy Prospect, Yaroslavl, 150023).

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

SPIN-code: 9115-7950,

e-mail: leonid.shamakhov@yandex.ru

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

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

SPIN-code: 7600-9464.

e-mail: Cat156026@yandex.ru

Научная статья

УДК 624.138.22

DOI:<https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-728-749>

EDN: GDECFC



Check for updates

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВЫХ ВИБРАЦИОННЫХ КАТКОВ РАЗЛИЧНЫХ ПОКОЛЕНИЙ

И.С. Тюремнов Д.А. Шорохов

Ярославский государственный технический университет (ЯГТУ),
г. Ярославль, Россия ответственный автор
tyuremnovis@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Грунтовые вибрационные катки являются наиболее распространенным типом спецтехники для уплотнения грунтов благодаря своей универсальности и высокой производительности. На эффективность уплотнения грунтов вибрационными катками оказывают влияние большое количество параметров, которые оценивают статические (общая масса и распределение массы между тяговым и уплотняющим модулем), динамические (частота и вынуждающая сила колебаний) и общие (мощность двигателя, транспортная и рабочая скорости движения, диаметр и ширина вальца) характеристики. Статистическая обработка технических характеристик является эффективным инструментом для изучения взаимосвязи между параметрами и выявления тенденций развития, в том числе для грунтовых вибрационных катков различных поколений.

Материалы и методы. В исследовании анализировались технические характеристики грунтовых вибрационных катков различных поколений. Статистическая обработка проводилась в программе Microsoft Excel. Общее количество рассмотренных грунтовых вибрационных катков составило 432 модели, из них 252 машины 3-го и 4-го поколений и 180 машин 5-го поколения.

Результаты. Показаны графические представления взаимосвязей различных технических характеристик грунтовых вибрационных катков разных поколений в зависимости от массы вибровальцового модуля. Также получены уравнения регрессии и соответствующие значения коэффициентов детерминации. Предложен параметр «линейная относительная вынуждающая сила», характеризующий совместное влияние относительной вынуждающей силы и ширины вальца грунтового катка.

Обсуждение и заключение. В результате исследования определены диапазоны изменения основных технических характеристик вибрационных катков различных поколений, выпускавшихся в течение последних 20...30 лет, и выявлены некоторые тенденции изменения этих параметров при переходе к различным поколениям грунтовых катков. Сравнительно большой разброс значений технических характеристик, отвечающих за динамические возможности грунтовых вибрационных катков, свидетельствует об отсутствии у производителей и исследователей единого мнения по обоснованию численных значений данных параметров.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грунт, уплотнение, каток вибрационный, технические характеристики, масса, вынуждающая сила, частота колебаний, анализ статистический

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность редактору и рецензентам данной статьи.

Статья поступила в редакцию 12.11.2024; одобрена после рецензирования 03.03.2025; принята к публикации 21.10.2025.

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: Тюремнов И.С., Шорохов Д.А. Статистический анализ технических характеристик грунтовых вибрационных катков различных поколений // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 5 С. 728-749. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-728-749>

© Тюремнов И.С., Шорохов Д.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
 DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-728-749>
 EDN: GDECFC

STATISTICAL ANALYSIS OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF SOIL VIBRATORY ROLLERS OF DIFFERENT GENERATIONS

Ivan S. Tyuremnov , Dmitry A. Shorohov
 Yaroslavl State Technical University,
 Yaroslavl, Russia
 corresponding author
 tyuremnovis@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Soil vibratory rollers are the most prevalent type of specialized machinery for soil compaction, owing to their versatility and high productivity. The effectiveness of soil compaction using vibratory rollers is influenced by a multitude of parameters, categorized into static characteristics (total mass and mass distribution between the traction and compaction modules), dynamic characteristics (vibration frequency and excitation force), and general characteristics (engine power, transport and operating travel speeds, drum diameter and width). Statistical analysis of technical specifications serves as an effective tool for investigating the interrelationships among these parameters and identifying developmental trends, including those observed in soil vibratory rollers across different generations.

Materials and methods. The study analyzes the technical characteristics of soil vibratory rollers of different generations. Statistical processing was carried out using Microsoft Excel software. 432 models of vibratory rollers, including 252 vibratory rollers of 3rd and 4th generation and 180 vibratory rollers of 5th generation, were scrutinized.

Results. Graphs of various technical characteristics of soil vibratory rollers of different generations vs mass of the vibratory drum modules were plotted. Regression equations and corresponding determination coefficients were derived. The parameter "linear relative excitation force" has been proposed to characterize the combined influence of the relative excitation force and the drum width of a soil vibratory roller.

Discussion and conclusion. The study presents the changes of the main technical characteristics of vibratory rollers of different generations produced over the past 20-30 years as well as certain trends in these changes during the transition between generations of soil rollers. The relatively large variation in the technical characteristics responsible for dynamic capabilities of soil vibratory rollers indicates a lack of consensus among manufacturers and researchers regarding the numerical values of these parameters.

KEYWORDS: soil, compaction, vibratory roller, technical characteristics, mass, compaction force, frequency of oscillations, statistical analysis

ACKNOWLEDGEMENTS: the authors express their gratitude to the editor and reviewers of this article.

The article was submitted 12.11.2024; approved after reviewing 03.03.2025; accepted for publication 21.10.2025.

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. Tyuremnov I.S., Shorohov D.A. Statistical analysis of technical characteristics of soil vibratory rollers of different generations. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (5): 728-749. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-728-749>

© Tyuremnov Ivan S., Shorohov Dmitrii A., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Уплотнение грунтов осуществляется для увеличения их несущей способности и устойчивости к воздействию погодно-климатических факторов. Грунтовые вибрационные катки используются для уплотнения различных дорожно-строительных материалов при строительстве дорог, взлетно-посадочных полос, в промышленном, гражданском, гидротехническом строительстве и др. Грунтовые катки могут уплотнять грунты статической и вибрационной составляющей воздействия^{1,2,3,4}.

Катки статического действия уплотняют грунт только за счёт своей собственной массы. Гладковальцовочные статические катки в настоящее время для уплотнения грунтов практически не применяются. В то же время статические пневмоколесные катки (преимущественно, прицепные) продолжают использоваться.

Вибрационные грунтовые катки получили наибольшее распространение за счёт более высокой уплотняющей способности, особенно при работе на несвязных грунтах^{4,5,6} [1].

Основные технические характеристики грунтовых вибрационных катков, определяющие их технологические возможности, можно разделить на статические, динамические и общие.

К характеристикам, определяющим статическое воздействие, можно отнести общую массу машины, а также распределение массы между вибрационным и тяговым модулем.

На динамическое воздействие влияет частота колебаний и вынуждающая сила вибровозбудителя.

Диаметр вальца влияет^{7,8} на размеры площадки контакта вальца с грунтом и глубину уплотнения значения амплитудных контактных напряжений при статическом и динамическом режиме воздействия, а также на проходимость машины.

На преодоление продольных уклонов, устойчивость к опрокидыванию и производительность катка влияют: мощность двигателя, транспортная и рабочая скорости движения, размеры вальца (ширина и диаметр).

Таким образом, на функциональные возможности, такие как проходимость, управляемость и производительность вибрационных грунтовых катков оказывает влияние большое количество различных факторов со сложным характером взаимосвязей⁹.

Эффективное уплотнение грунтов достигается за счёт правильного подбора массы катка, вынуждающей силы, частоты колебаний и рабочей скорости катка на каждом проходе с учетом вида уплотняемого грунта, толщины слоя, требуемого коэффициента уплотнения и влажности уплотняемого грунта [2, 3, 4].

В настоящее время на рынке представлен широкий спектр моделей катков различных производителей и поколений. Вопрос отнесения катков к тому или иному поколению не до конца проработан. Информация о существовании различных поколений вибрационных катков получена из материалов производителей. Однако не удалось обнаружить критерии отнесения катков к тому или иному поколению, за исключением годов выпуска, при том

¹ Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М: Транспорт, 1975. 285 с.

² Костельев М.П. Возможность и эффективность уплотнения виброкатками грунтов различного типа и состояния // Дорожная техника. Каталог-справочник. 2004. С. 72–82.

³ Костельев М.П. «Умные виброкатки» для дорожников (обзор с оценкой новинок последнего времени) // Каталог-справочник «Дорожная техника». 2006. С. 30–32.

⁴ Костельев М.П. Опять о качестве и эффективности уплотнения различных грунтов современными виброкатками // Дорожная техника. Каталог-справочник. 2008. С. 40–47.

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

⁶ Уплотняющие машины. Пособие по выбору оборудования для уплотнения грунтов и асфальтобетонных смесей (на примере машин, выпускаемых ЗАО «РАСКАТ», г. Рыбинск / В.П. Ложечко, А.А. Шестопалов, В.И. Окунев, Р.Д. Окулов, Рыбинск: Рыбинский дом печати, 2004. 79 с.

⁷ Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М: Транспорт, 1975. 285 с.

⁸ Хархута Н.Я. Машины для уплотнения грунтов. Л.: Машиностроение, 1973. 176 с.

⁹ Тюремнов И.С. Обоснование подходов для разработки методики прогнозирования технологических возможностей мобильных грунтоуплотняющих машин виброударного действия // Интерстроймех–2021 [Электронный ресурс] : сборник докладов XXV Международной научно-технической конференции (г. Москва, 5–7 октября 2021 г.). М.: Издательство МИСИ – МГСУ, 2021. С. 94–102. Режим доступа: <https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/otkro-dostupa/46043/> (дата обращения: 16.04.2024)

что у некоторых производителей, например, DYNAPAC, для катков различных поколений применяют различную цветовую схему окраски^{10, 11}.

Предполагается, что грунтовые катки 3-го поколения в основном характеризовались наличием 1...2 режимов колебаний, которые реализовывались преимущественно за счет регулирования частоты вращения вибровозбудителя и угла разведения (статического момента) дебалансов при изменении направления вращения вала. Отличительной чертой катков 4-го поколения является возможность реализации от 2 до 5 режимов колебаний. Постепенно внедрялись бортовые системы автоматизированного управления подсистемами катка, регистрации параметров, контроля качества уплотнения^{12, 13, 14} [5, 6]. Особое внимание в 4-м поколении катков уделяется эргономике рабочего места оператора и обеспечению экологических норм^{15, 16, 17}. Поскольку дискуссия о критериях отнесения катков к 3-му или 4-му поколению не завершена, в статье катки данных поколений рассматриваются совместно. Принадлежность катков к 5-му поколению указывается самими производителями, поэтому они рассматриваются отдельно.

Ведущие производители грунтовых вибрационных катков, начиная с 2020 г., перешли к выпуску машин 5-го поколения. Данные катки продолжают тенденцию прошлых поколений по улучшению эргономических и экологиче-

ских показателей, внедрению систем автоматизации, мониторинга параметров катков и результатов уплотнения. Стоит отметить, что производители уделяют много внимания не только эргономике рабочего места и комфорту оператора, но и внешнему виду спецтехники. Все вышеперечисленные усовершенствования привели к значительному повышению эффективности уплотнения и производительности современных вибрационных катков. Ведущие производители грунтовых вибрационных катков продолжают все также активно инвестировать в исследования взаимодействия катка с уплотняемым материалом и прочие разработки, ориентируясь на следующие направления:

- расширение функциональных возможностей¹⁴;
- оптимизация характеристик вибрационных катков (сочетания массы и её распределения по осям с частотой и вынуждающей силой колебаний, размеров вальца и мощности двигателя) для повышения их уплотняющей способности;
- совершенствование конструкций вибровозбудителей, расширение возможностей по регулированию характера, частоты и вынуждающей силы колебаний¹⁸ [7, 8];
- дальнейшее повышение эффективности уплотнения, в т.ч. за счёт автоматизации управления режимами уплотнения, внедрения систем непрерывного контроля уплотнения

¹⁰ Уплотнение и укладка. Теория и практика (издание Dynapac Compaction Equipment AB), «Рекламное агентство А.М.Г.», 2008, 90 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://goo.su/H3R9I> (дата обращения: 20.04.2024).

¹¹ Грунтовые катки Dynapac [Электронный ресурс]. URL: <https://dynapac.com/ru/products/compaction?tab=products> (дата обращения: 20.04.2024).

¹² Mooney M. et al. Intelligent Soil Compaction Systems. NCHRP Report 676. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2010. 178.

¹³ Mooney M., Adam D. Vibratory Roller Integrated Measurement of Earthwork Compaction: An Overview // FMGM 2007 Seventh Int. Symp. F. Meas. Geomech. Boston, Massachusetts, Sept. 24-27. 2007. 1–12.

¹⁴ Тюремнов И.С. Современное состояние и конструктивные особенности вибрационных катков // Мир дорог. 2009. № 42. С. 64–69.

¹⁵ Грунтовые катки «PACKAT» [Электронный ресурс]. URL: <https://oao-raskat.ru/wp-content/uploads/Gruntovue-RV.pdf> (дата обращения: 20.04.2024).

¹⁶ Amman тяжёлая уплотнительная техника. Линейка грунтовых катков. [Электронный ресурс]. URL: <http://sdmmachinery.ru/assets/images/pdf> (дата обращения: 20.04.2024).

¹⁷ Машины для дорожного строительства САТ. Руководство по уплотнению грунта. QRBQ 1705 Caterpillar., 2013. 132 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/CM20200908-95d72-75196> (дата обращения: 20.04.2024).

¹⁸ Михеев В.В. Об энергоэффективных конструкциях дорожных катков и технологиях уплотнения грунтовых сред в дорожном строительстве // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО «СибАДИ», Омск, 3–4 декабря 2020 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2021. С. 30–37.

([9, 10] и др.), машинного обучения ([11, 12] и др.);

- повышение комфорта оператора, снижение уровня шума, энергопотребления и выбросов;
- разработка «интеллектуальных» катков, способных в автоматическом режиме регулировать режимы вибрации и скорость движения с учетом изменяющихся свойств грунта для обеспечения максимальной эффективности и качества уплотнения¹² [13, 14, 15];
- повышение надежности катков, снижение трудоемкости обслуживания¹⁹.

Трудности, связанные с исследованием физико-механических свойств различных грунтов и процессов, происходящих при уплотнении грунта вибрационными катками, привели к тому, что научные сообщества и производители данной спецтехники не имеют общепринятое представления о технических параметрах машин [16, 17].

Поэтому, несмотря на большой опыт исследований и применения вибрационных грунтовых катков, большое количество влияющих факторов, многообразие и недостаточная изученность свойств уплотняемых грунтов не позволяют определить рациональные соотношения между различными характеристиками вибрационных грунтовых катков. Вследствие чего производители продолжают опытным путем определять параметры машин, эффективные для различных условий производства работ, что выражается в изменении технических характеристик выпускаемых вибрационных катков по мере появления нового опыта исследований и применения катков.

Цель данного исследования заключается в выявлении закономерностей развития и тенденций изменения основных параметров грунтовых вибрационных катков 3...5-го поколений путем анализа и сравнительной оценки их технических характеристик.

Данное исследование представляет научную новизну с точки зрения обобщения информации о технических характеристиках грунтовых вибрационных катков, выпускавшихся с конца 1990-х годов и по настоящее время, и выделения некоторых тенденций развития данной спецтехники в течение последних 20...25 лет.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для анализа технических характеристик грунтовых вибрационных катков использовались модели различных отечественных и зарубежных производителей: АМКОДОР, ЗАВОД ДОРОЖНЫХ МАШИН, РАСКАТ, АММАНН, ATLAS WEYCOR, BOMAG, CATERPILLAR, DYNAPAC, HAMM, HYUNDAI, JCB, VOLVO, MITSUBER, GUANGXI LIUGONG MACHINERY, SHANDONG CHANGLIN, SAKAI, SHANDONG CHANGLIN, XCMG, YTO INTERNATIONAL, XIAMEN XGMA, ZOOLION, SEM, SDLG, SHANTUI, LINGONG, CASE. Общее количество моделей грунтовых вибрационных катков составило 432, в том числе 252 модели катков 3-го и 4-го поколений и 180 моделей катков 5-го поколения. Обработка результатов выполнялась в программе Microsoft Excel: строились графические распределения характеристик вибрационных грунтовых катков различных поколений, по которым получались уравнения регрессии и коэффициенты детерминации с использованием инструмента «Линия тренда».

В качестве основных технических характеристик вибрационных катков, определяющих их уплотняющую способность и производительность, рассматривались: M – эксплуатационная масса вибрационного катка, кг; M_b – масса, приходящаяся на вибровальцовый модуль, кг; N – мощность двигателя, кВт; f – частота колебаний (f_1 – для режима «максимальная вибрация», т.е. максимальной вынуждающей силы, f_2 – для режима «минимальная вибрация», т.е. минимальной вынуждающей силы), Гц; P – вынуждающая сила (P_1 – для режима «максимальная вибрация», P_2 – для режима «минимальная вибрация»), кН; $q_{лсн}$ – линейная статическая нагрузка, кг/см; B – ширина вальца, мм; D – диаметр вальца, мм.

Кроме абсолютного значения вынуждающей силы (центробежной силы вибровозбудителя) P , необходимо рассматривать относительную вынуждающую силу, которая определяется отношением вынуждающей силы вибровозбудителя P к весу машины P/Q или к весу, приходящемуся на вибрационный модуль катка P/Q_b (для режимов максимальной вибрации и минимальной вибрации, соответственно, P_1/Q_b и P_2/Q_b).

¹⁹ Берман А.Ю., Воскресенский Г.Г. Современные тенденции развития вибрационных катков // Фундаментальная и прикладная наука: состояние и тенденция развития: сборник статей III Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 5 марта 2020 года. Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская Ирина Игоревна), 2020. С. 75–81.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные результаты статистической обработки технических характеристик грунтовых вибрационных катков различных поколений сведены в общую таблицу (таблица 1).

Анализ полученных данных (см. таблицу 1)

показывает наличие достаточно тесной взаимосвязи между массой вибровальцового модуля M_v и эксплуатационной массой катка M (рисунок 1), а также между массой вибровальцового модуля M_v и мощностью двигателя N (рисунок 2).

Таблица 1
Результаты статистической обработки технических характеристик грунтовых вибрационных катков различных поколений
Источник: составлено авторами.

Table 1
Results of the statistical analysis of technical characteristics of soil vibratory rollers of various generations
Source: compiled by the authors.

Функция	Поколение	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации R^2
$M = f(M_v)$	3-е и 4-е	$M = 0,132 M_v^{1,154}$	0,912
	5-е	$M = 0,183 M_v^{1,121}$	0,912
	Сводный	$M = 0,164 M_v^{1,132}$	0,911
$N = f(M_v)$	3-е и 4-е	$N = 0,485 M_v^{0,601}$	0,786
	5-е	$N = 0,431 M_v^{0,615}$	0,808
	Сводный	$N = 0,453 M_v^{0,610}$	0,801
$D = f(M_v)$	3-е и 4-е	$D = 329,38 \ln(M_v) - 1462,5$	0,767
	5-е	$D = 266,83 \ln(M_v) - 889,11$	0,641
	Сводный	$D = 308,4 \ln(M_v) - 1270,4$	0,723
$B = f(M_v)$	3-е и 4-е	$B = 454,34 \ln(M_v) - 2012,5$	0,714
	5-е	$B = 315,45 \ln(M_v) - 779,31$	0,623
	Сводный	$B = 399,36 \ln(M_v) - 1528,6$	0,674
$f_1 = f(M_v)$	3-е и 4-е	$f_1 = 72,635 M_v^{-0,101}$	0,251
	5-е	$f_1 = 72,515 M_v^{-0,101}$	0,362
	Сводный	$f_1 = 72,494 M_v^{-0,101}$	0,290
$f_2 = f(M_v)$	3-е и 4-е	$f_2 = 72,635 M_v^{-0,101}$	0,251
	5-е	$f_2 = 76,588 M_v^{-0,094}$	0,319
	Сводный	$f_2 = 78,268 M_v^{-0,094}$	0,238
$P_1 = f(M_v)$	3-е и 4-е	$P_1 = 156,98 \ln(M_v) - 1134$	0,751
	5-е	$P_1 = 155,51 \ln(M_v) - 1110,1$	0,808
	Сводный	$P_1 = 156,47 \ln(M_v) - 1125,4$	0,776
$P_2 = f(M_v)$	3-е и 4-е	$P_2 = 0,296 M_v^{0,714}$	0,607
	5-е	$P_2 = 0,128 M_v^{0,805}$	0,556
	Сводный	$P_2 = 0,217 M_v^{0,748}$	0,588
$P_1/Q_v = f(M_v)$	3-е и 4-е	$P_1/Q_v = -0,656 \ln(M_v) + 9,287$	0,194
	5-е	$P_1/Q_v = -1,01 \ln(M_v) + 12,574$	0,454
	Сводный	$P_1/Q_v = -0,784 \ln(M_v) + 10,476$	0,282
$P_2/Q_v = f(M_v)$	3-е и 4-е	$P_2/Q_v = -0,658 \ln(M_v) + 8,309$	0,238
	5-е	$P_2/Q_v = -0,424 \ln(M_v) + 6,174$	0,102
	Сводный	$P_2/Q_v = -0,568 \ln(M_v) + 7,49$	0,182
$q_{\text{псн}} = f(M_v)$	3-е и 4-е	$q_{\text{псн}} = 0,0042 M_v + 4,064$	0,961
	5-е	$q_{\text{псн}} = 0,0043 M_v + 4,962$	0,927
	Сводный	$q_{\text{псн}} = 0,0044 M_v + 4,173$	0,925
$(P_1/Q_v)/B = f(M_v)$	3-е и 4-е	$(P_1/Q_v)/B = 98,114 (M_v)^{-0,458}$	0,648
	5-е	$(P_1/Q_v)/B = 125,44 (M_v)^{-0,481}$	0,818
	Сводный	$(P_1/Q_v)/B = 103,45 (M_v)^{-0,462}$	0,706
$(P_2/Q_v)/B = f(M_v)$	3-е и 4-е	$(P_2/Q_v)/B = 120,68 (M_v)^{-0,521}$	0,626
	5-е	$(P_2/Q_v)/B = 31,53 (M_v)^{-0,374}$	0,411
	Сводный	$(P_2/Q_v)/B = 72,482 (M_v)^{-0,464}$	0,552

Синий цвет – грунтовые катки 3-го и 4-го поколения; красный цвет – грунтовые катки 5-го поколения; зелёный цвет – сводная зависимость по всем поколениям

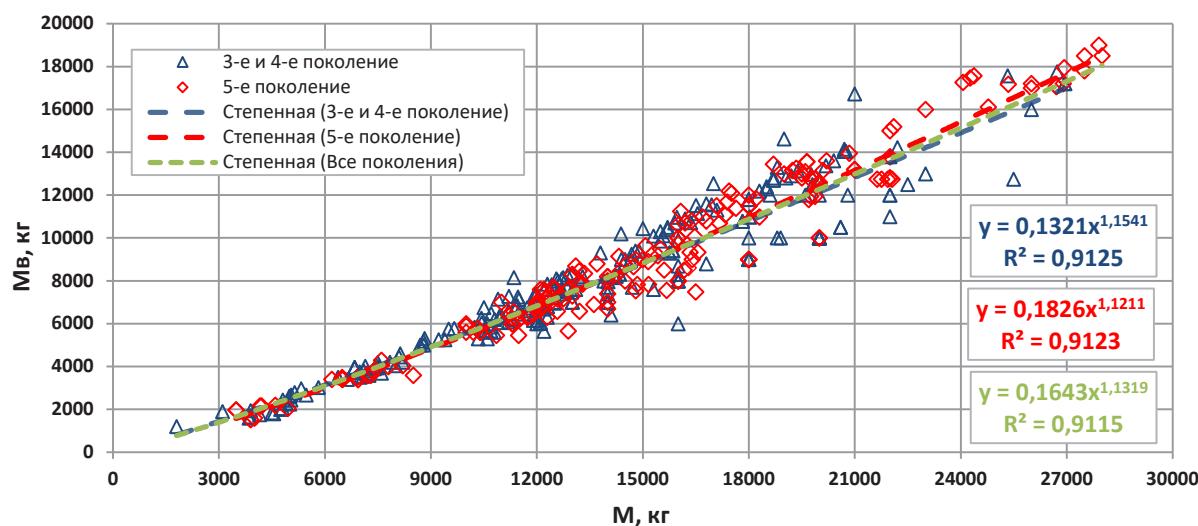


Рисунок 1 – Графическое представление взаимосвязи массы вибровальцового модуля M_e и эксплуатационной массы катка M
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Graphical representation of the relationship between the mass of the vibratory drum module M_e and the operational mass of the roller M
Source: compiled by the authors.

При сравнении различных поколений грунтовых вибрационных катков наблюдается тенденция увеличения массы (смещение диапазона массы вправо) для машин 5-го поколения (см. рисунок 1).

Для грунтовых вибрационных катков ключевым фактором является обеспечение тяговых свойств в процессе уплотнения. Чаще всего рабочим органом катка является гладкий вальц, имеющий низкий коэффициент сцепления с уплотняемым грунтом^{20,21}. При движении катка в подъём сцепная сила тяги T_{cu} , формируемая вальцом, будет определяться произведением нормальной к поверхности уплотняемого материала реакции N на коэффициент сцепления ϕ_{cu} ($T_{cu} = \phi_{cu} \cdot N$). Поскольку при движении в подъём нормальная реакция N рассчитывается как вес, приходящийся на вибрационный модуль Q_b , умноженный на

косинус угла подъема α ($N = Q_b \cdot \cos\alpha$), то сила тяги, формируемая вальцом также будет уменьшаться:

$$T_{cu} = \phi_{cu} \cdot Q_b \cdot \cos\alpha < \phi_{cu} \cdot Q_b.$$

Как следствие, снижается тяговое усилие на вальце. К тому же в процессе уплотнения грунта с вибрацией, когда вынуждающая сила превышает вес вибровальцового модуля, может происходить периодический отрыв вибровальца от поверхности грунта^{22,23} [18, 19, 20]. В результате разгона вращения вальца гидромотором привода хода в процессе отрыва вальца от грунта, при восстановлении контакта вальца с грунтом вибровальц может начать проскальзывать. Поэтому для обеспечения движения машины в гору, в том числе с преодолением дополнительного продольного

²⁰ Характеристики катка: виды и назначение. Журнал: спецтехника [Электронный ресурс]. URL: <https://centr-teh.ru/blog/specialty-harakteristiki-katka> (дата обращения: 02.05.2024).

²¹ Определение параметров и режимов уплотнения дорожных катков: учеб. пособие / Г.В. Кустарев [и др.]; под общ. ред. Г.В. Кустарева. М.: МАДИ, 2022. 142 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://lib.madi.ru/fel/fel22E610.pdf> (дата обращения: 02.05.2024).

²² Adam D., Pistrol J. Dynamic roller compaction for earthworks and roller-integrated continuous compaction control: State of the art overview and recent developments // Conf. di Geotec. di Torino, XXIV Ciclio. 2016. С 1–41.

²³ Erdmann P., Adam D. Numerical Simulation of Dynamic Soil Compaction with Vibratory Compaction Equipment // XV Danube - Eur. Conf. Geotech. Eng. 2014. № 119. 243–248.

уклона, возникающего в процессе уплотнения грунта и образования «волны» перед вальцом, необходимо правильно распределять вес машины по осям между тяговым (тракторным) и вибровальцовыми (уплотняющим) модулем. Исходя из полученных данных (см. рисунок 1) для легких и средних катков (общей массой M менее 9000...15000 кг) на заднюю ось (тяговый модуль) приходится приблизительно 45% массы, тогда как на переднюю ось (вибровальцовый модуль) – около 55% массы. Для тяжелых катков (общей массой $M = 15000...21000$ кг) на заднюю ось (тяговый модуль) приходится около 40% массы, а на переднюю ось (вибровальцовый модуль) – около 60%. Масса тягового модуля сверхтяжелых катков (общей массой $M > 21000$ кг) составляет около 35%, а масса вибровальцового модуля – около 65% общей массы вибрационного катка. Предположительно это связано с тем, что главная функция катка – уплотнение грунта. Именно для повышения эффективности уплотнения служит увеличение массы машины и её уплотняющего (вибровальцового) модуля. С другой стороны, использование в составе катка унифицированных узлов и агрегатов (гидрооборудования, кабины, мостов, двигателя и т.д.) приводит к тому, что с увеличением общей массы машины масса, например, кабины или двигателя возрастет незначительно, что позволяет в большей степени увеличить массу

вибровальцового модуля при условии обеспечения проходимости машины, определяемой массой тягового модуля. Современные двигатели устроены таким образом, что на одном и том же двигателе можно увеличить мощность за счет некоторых конструктивных изменений и изменения алгоритмов управления рабочими процессами силового агрегата.

Хорошая взаимосвязь между массой вибровальцового модуля M_e и эксплуатационной массой катка M (см. рисунок 1) может объясняться еще и тем, что практически все производители в процессе многолетнего опыта производства грунтовых вибрационных катков подобрали рациональные соотношения масс, приходящихся на вибровальцовый и тяговый модуль катка. Вероятно, производители исходили из принципа максимального увеличения массы вибровальцового модуля при сохранении тягово-цепных свойств машины (в том числе при работе на крутых уклонах).

Линии регрессии $M_e(M)$ для вибрационных катков различных поколений практически совпадают, что свидетельствует о существовании единого для всех производителей мнения по данному вопросу. Причем у катков 5-го поколения наблюдается некоторое уменьшение разброса значений M_e для катков сопоставимой массы M , что также свидетельствует о том, что по данному вопросу у производителей разногласия практически отсутствуют.

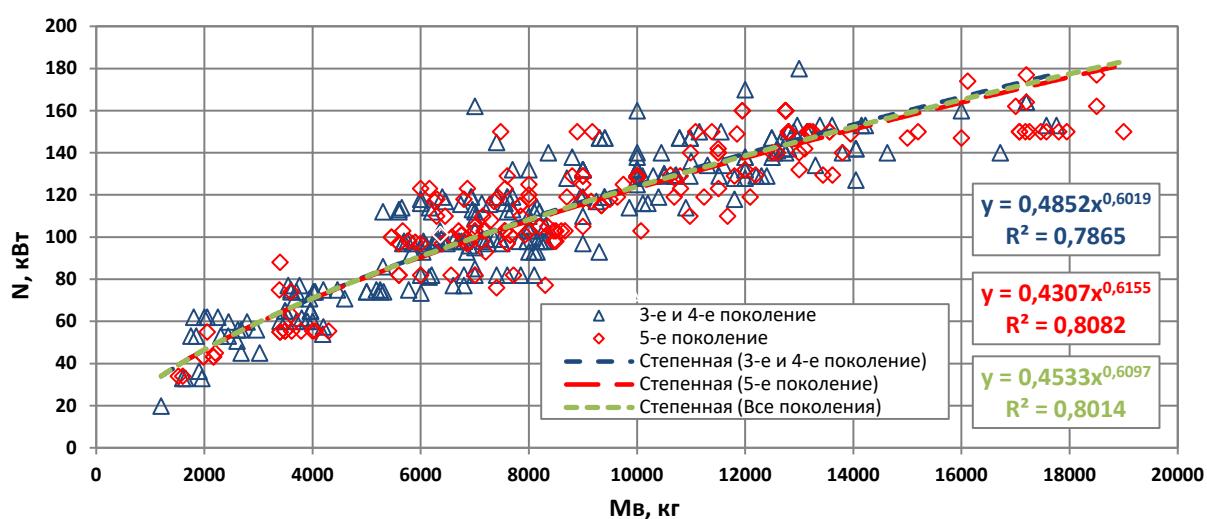


Рисунок 2 – Графическое представление взаимосвязи мощности двигателя N и массы вибровальцового модуля M_e
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Graphical representation of the relationship between engine power N and the mass of the M_e vibratory drum module
Source: compiled by the authors.

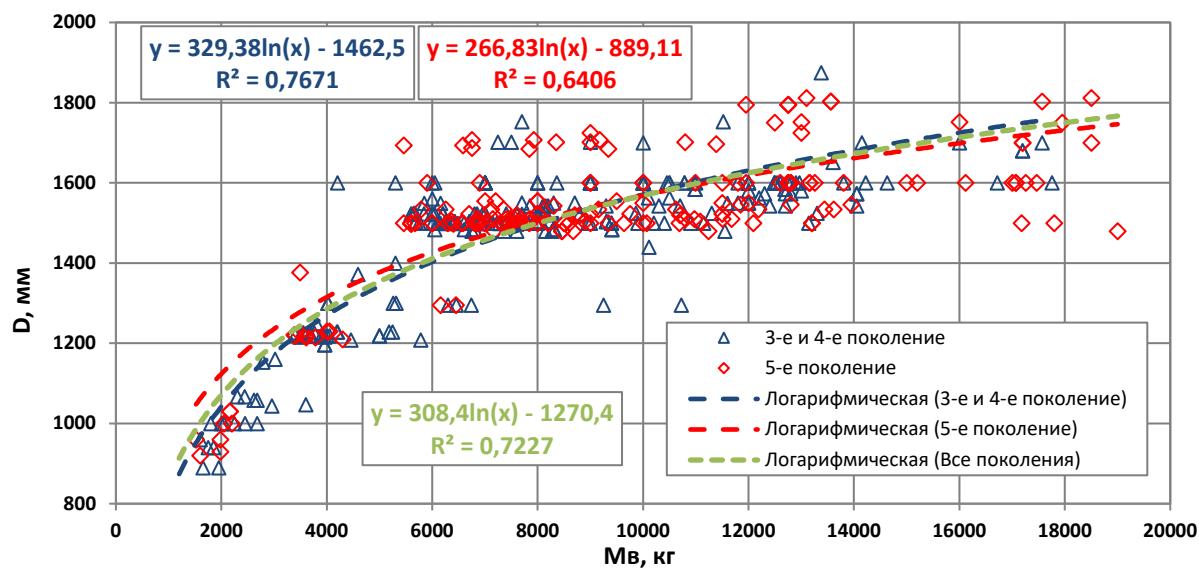


Рисунок 3 – Графическое представление взаимосвязи диаметра вальца D и массы вибрационного модуля M_v
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Graphical representation of the relationship between the diameter of the roller D and the mass of the vibration module M_v
Source: compiled by the authors.

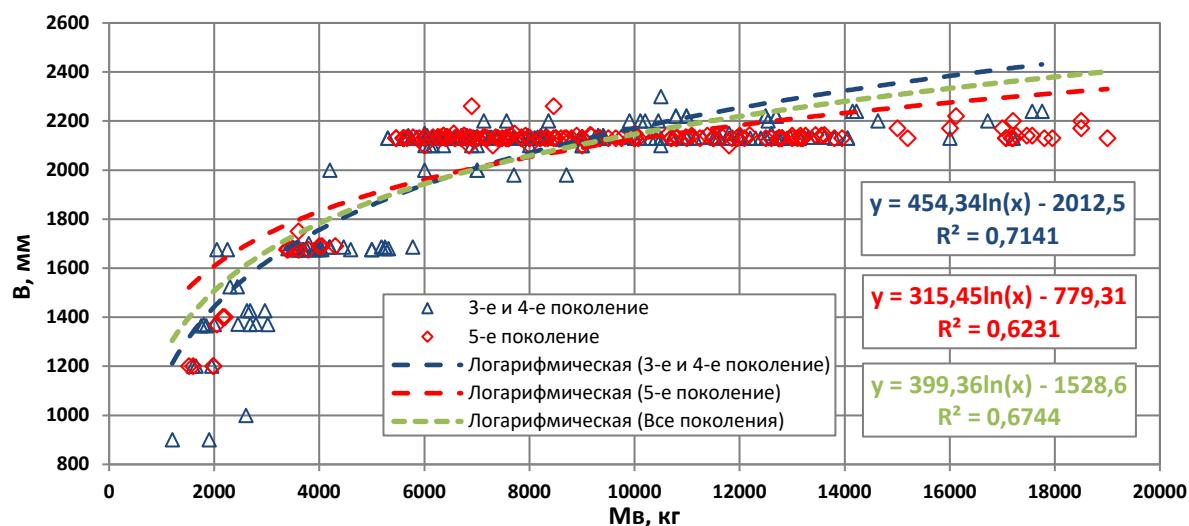


Рисунок 4 – Графическое представление взаимосвязи ширины вальца B и массы вибрационного модуля M_v
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Graphical representation of the relationship between the width of the roller B and the mass of the vibration module M_v
Source: compiled by the authors.

При увеличении массы катка M (массы вибровальцового модуля M_e) мощность двигателя N растёт медленнее. Данная особенность может быть связана с тем, что с увеличением массы машины затраты мощности на работу подсистем катка (кондиционирование воздуха, освещение, работу электрооборудования и т.д.) остаются практически постоянными. Поэтому мощность двигателя используется более эффективно, что выражается в выполнении кривой мощности двигателя от массы катка M или его вибровальцового модуля M_e (см. рисунок 2). При этом наблюдается незначительное снижение мощности двигателя для вибрационных катков 5-го поколения, по сравнению с мощностью двигателя катков 3...4-го поколений сопоставимой массы.

Независимо от поколения катков практически не изменяются взаимосвязи между размерами вальца (шириной B и диаметром D) и массой вибровальцового модуля M_e (рисунки 3 и 4).

Обращает внимание то, что на графиках (см. рисунки 3 и 4) характер изменения не монотонный, а ступенчатый. Для диапазона масс вибрационного модуля $M_e = 0...3000$ кг диаметр вальца составляет $D = 900...1000$ мм, а ширина $B = 1200...1400$ мм. Для $M_e = 3000...5000$ кг, диаметр вальца $D = 1200...1400$ мм, а ширина $B = 1650...1750$ мм. При $M_e > 5000$ кг, диаметр вальца находится в диапазоне $D = 1500...1800$ мм, а ширина $B = 2000...2260$ мм. Это согласуется с существующим распределением вибрационных катков по массе²⁴: легкие ($M < 9000$ кг или $M_e = 0...5000$ кг), средние ($M = 9000...15000$ кг или $M_e = 5000...10000$ кг), тяжелые ($M = 15000...21000$ кг или $M_e = 10000...14000$ кг) и сверхтяжелые ($M > 21000$ кг или $M_e > 15000$ кг). Причем в группе легких вибрационных катков следует выделять подгруппу малогабаритных катков, имеющих общую массу до 5000 кг (массу вибровальцового модуля $M_e < 3000$ кг). С учетом наблюдаемого ступенчатого характера зависимостей $B(M_e)$ и $D(M_e)$ (см. рисунки 3 и 4) к полученным уравнениям регрессии диаметра и ширины вальца от массы вибровальцового

модуля следует относиться критически, так как они не отражают реальную взаимосвязь между данными параметрами, хотя при этом характеризуются сравнительно высоким значением коэффициента детерминации.

Представляется, что с течением времени производители сформировали рациональные соотношения между диаметром, а также шириной вальца в зависимости от массы вибровальцового модуля M_e (или массы машины M), с учетом необходимости на слабых грунтах, поперечной устойчивости, обеспечения видимости и управляемости, технологических возможностей, требований унификации производства, а также транспортного габарита для перевозки данного вида спецтехники. Так, например, максимальный допустимый диаметр вальца ограничивается обзорностью оператора вибрационного грунтового катка (в РФ – в соответствии с п.10.2 ГОСТ Р ИСО 5006–2010²⁵) и массой вибровальцового модуля M_e .

Наличие установившихся рациональных соотношений между шириной вальца, массой машины M и массой вибровальцового модуля M_e отражаются в высоких значениях коэффициента детерминации для линейной статической нагрузки ($q_{\text{нсх}}$) вибрационных грунтовых катков различных поколений (рисунок 5, см. таблицу 1, а также²⁶).

Большинство грунтовых катков являются вибрационными. Это позволяет повысить эффективность уплотнения наиболее распространенных в строительстве несвязных и малосвязанных грунтов [1, 2].

Уплотняющие возможности вибрационных катков во многом определяются их динамическими характеристиками, к которым относятся вынуждающая сила и частота колебаний.

Традиционно у большинства моделей вибрационных катков предусмотрено два режима колебаний. Режиму максимальной вибрации соответствует высокая вынуждающая сила P_1 при пониженной частоте колебаний f_1 , а режиму минимальной вибрации – пониженная вынуждающая сила P_2 при более высокой частоте колебаний f_2 .

²⁴ ГОСТ 31548–2012 Катки дорожные самоходные. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2013. 16 с.

²⁵ ГОСТ Р ИСО 5006–2010 Машины землеройные. Поле обзора оператора. Метод испытания и критерии функционирования. М.: Стандартинформ, 2011. 20 с.

²⁶ Шорохов Д.А. Анализ параметров оценки динамического воздействия вибрационных катков // Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, приуроченной к празднованию 300-летия Российской академии наук, Омск, 25–26 апреля 2024 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2024. С. 44–49.

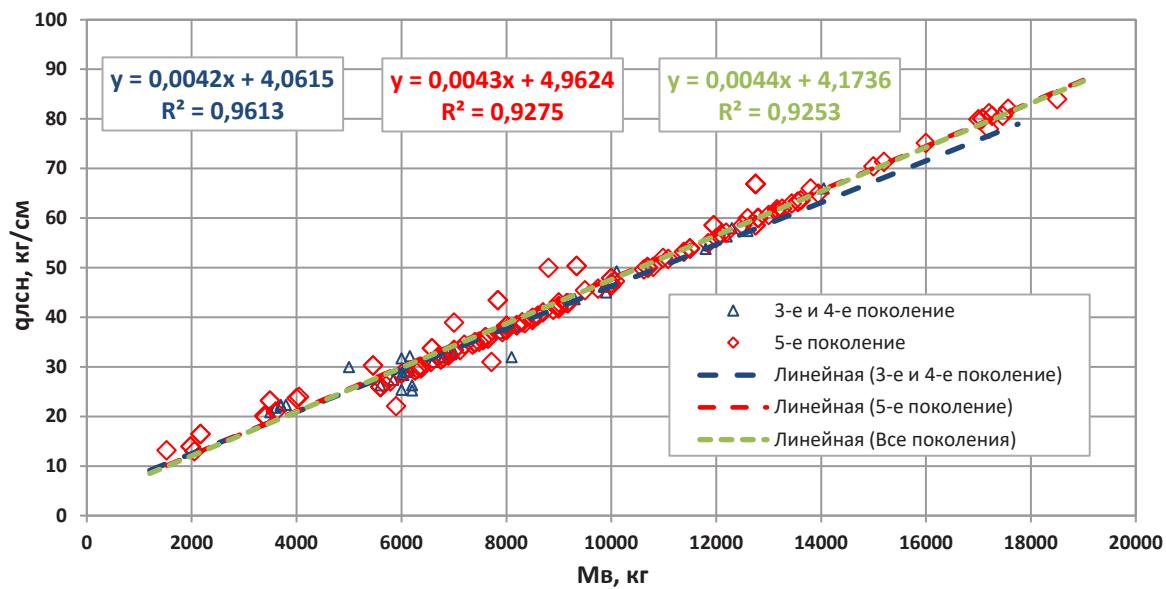


Рисунок 5 – Графическое представление взаимосвязи массы вибрационного модуля M_v и линейной статической нагрузки q_{lscn}
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Graphical representation of the relationship between the mass of the vibratory module M_v and the linear static load q_{lscn}
Source: compiled by the authors.

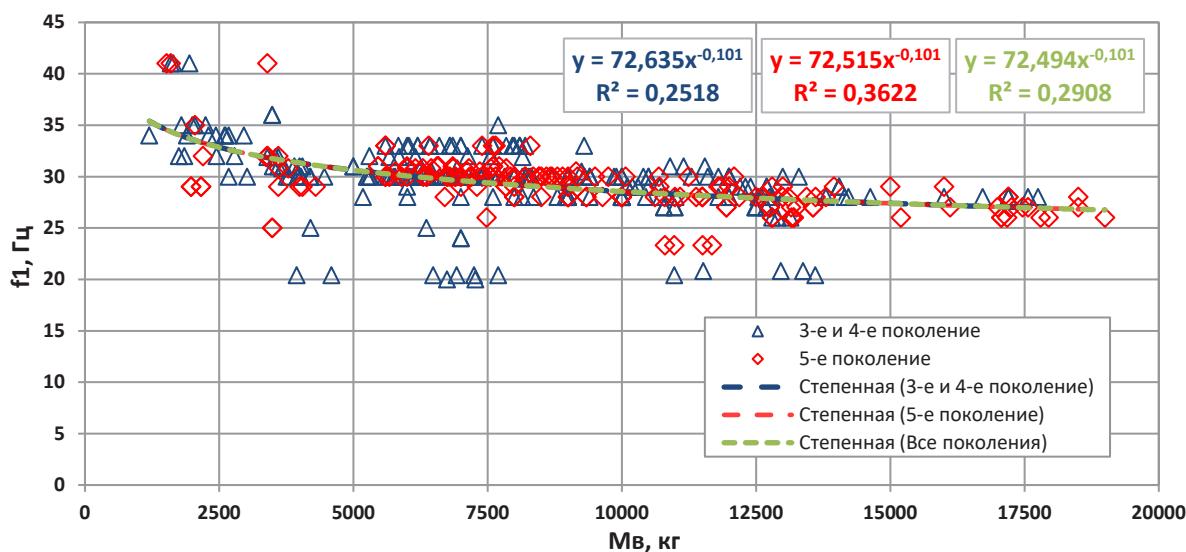


Рисунок 6 – Графическое представление взаимосвязи массы вибрационного модуля M_v и частоты колебаний f_1 для режима максимальной вибрации
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Graphical representation of the relationship between the mass of the vibratory module M_v and the oscillation frequency f_1 in the «maximum vibration» mode
Source: compiled by the authors.

На некоторых моделях вибрационных катков DYNAPAC и BOMAG имеется возможность реализации нескольких значений вынуждающей силы (как правило до 6) при фиксированной частоте колебаний^{27,28}. В «интеллектуальных» катках AMMANN от прохода к проходу изменяются значения частоты колебаний и вынуждающей силы вибровозбудителя^{29,30}.

Поэтому для анализа было принято решение рассматривать значения вынуждающей силы и частоты колебаний для двух режимов: максимальной вибрации (рисунки 6 и 8) и минимальной вибрации (рисунки 7 и 9).

Для режима «максимальная вибрация» при массе вибровальцевого модуля от $M_e = 5000 \dots 15000$ кг частота колебаний находится преимущественно в диапазоне $f_1 = 20 \dots 35$ Гц (см. рисунок 6). При этом для 5-го поколения грунтовых катков нижняя граница

частиоты колебаний в режиме «максимальная вибрация» увеличилась с 20 до 23...26 Гц и уменьшился разброс значений частоты колебаний по сравнению с вибрационными катками 3-го и 4-го поколений (см. рисунок 6). Отмечается большое количество моделей катков всех поколений с частотами колебаний 28 и 30 Гц.

Для режима «минимальная вибрация» (см. рисунок 7) большинство значений частоты колебаний находится в диапазоне $f_2 = 28 \dots 39$ Гц. При этом отмечается большое количество моделей с частотами колебаний 33; 34; 35 и 36 Гц для катков всех поколений. Для катков 3-го и 4-го поколений частота колебаний f_2 находится в диапазоне значений 28...43 Гц (см. рисунок 7), а для катков 5-го поколения этот диапазон незначительно сужается и смещается вниз до 26...41 Гц (см. рисунок 7).

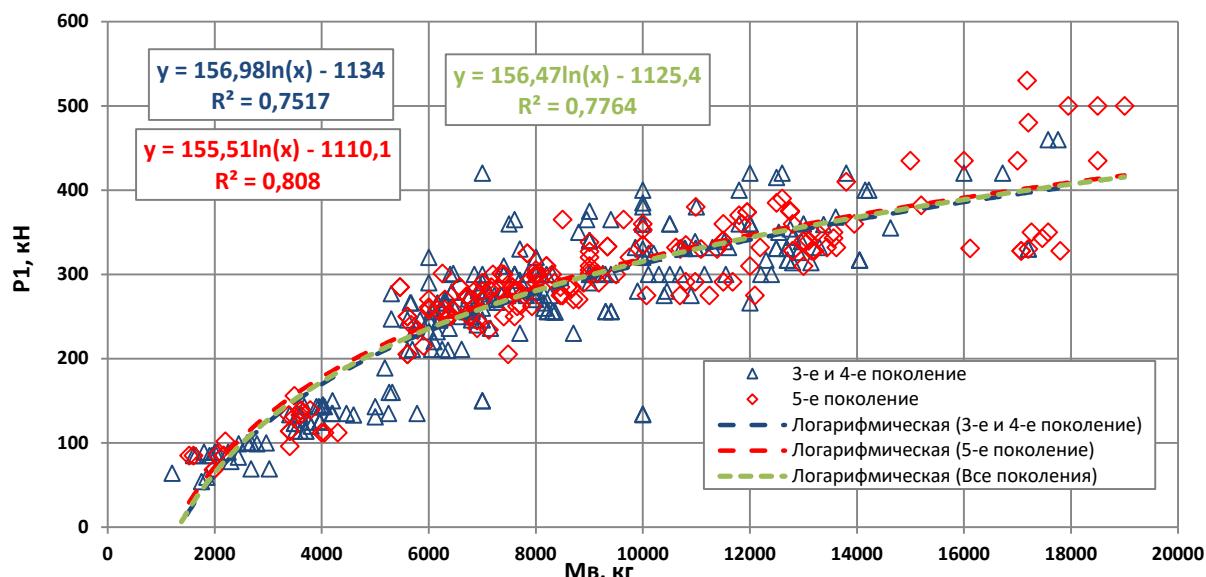


Рисунок 8 – Графическое представление взаимосвязи массы вибрационного модуля M_e и вынуждающей силы P_1 ,
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Graphical representation of the relationship between the mass of the vibration module M_e and the forcing force P_1 ,
Source: compiled by the authors.

²⁷ Equipment for Soil Compactors. Dynapac Compaction Optimizer. 3492 0024 01 // Dynapac Compaction Equipment AB. 4 р.

²⁸ VARIOCONTROL. Cost reduction through innovation 11/08 PRE 104 006 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.bomag.com/mobile/varioccontrol/pdf/PRE104006_0811.pdf (дата обращения: 04.10.2024).

²⁹ White D.J., Vennapusa P.K. A review of roller-integrated compaction monitoring technologies for earthworks: Final Report ER10-04 // Final Report ER10-04. Earthworks Engineering Research Center (EERC), Department of Civil Construction and Environmental Engineering, Iowa State University, 2010. 36.

³⁰ Anderegg R., Von Felten D.A., Kaufmann K. Compaction monitoring using intelligent soil compactors // GeoCongress 2006 Geotech. Eng. Inf. Technol. Age. Atlanta, 2006. Vol. 2006, № Jönsson. 41.

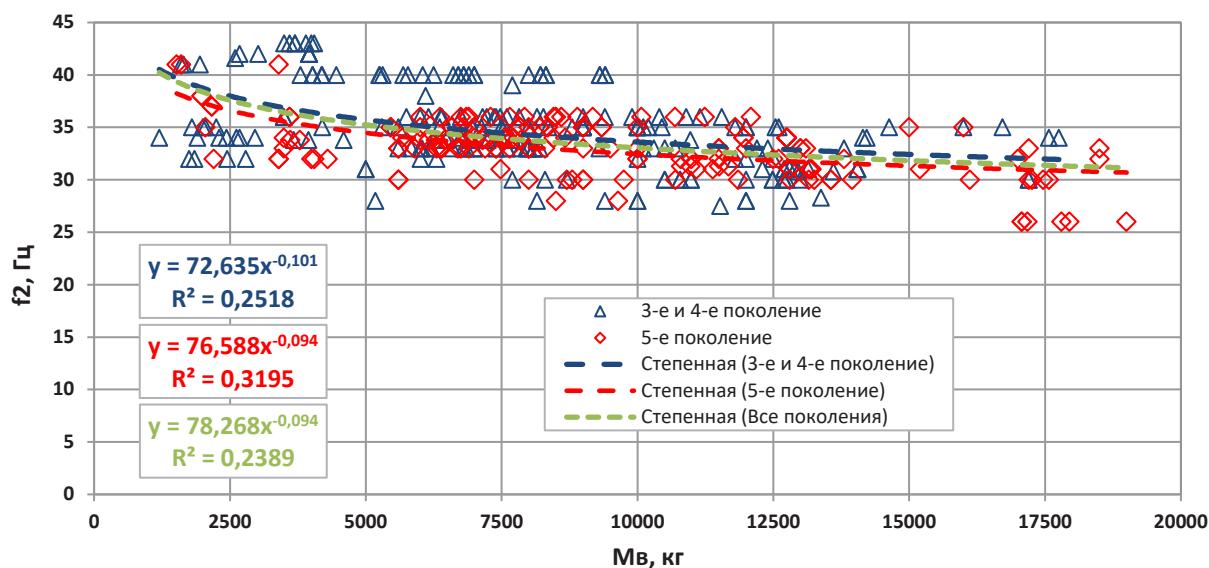


Рисунок 7 – Графическое представление взаимосвязи массы вибрационного модуля M_e и частоты колебаний f_2 для режима минимальной вибрации
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Graphical representation of the relationship between the mass of the vibratory module M_e and the oscillation frequency f_2 in the «minimum vibration» mode
Source: compiled by the authors.

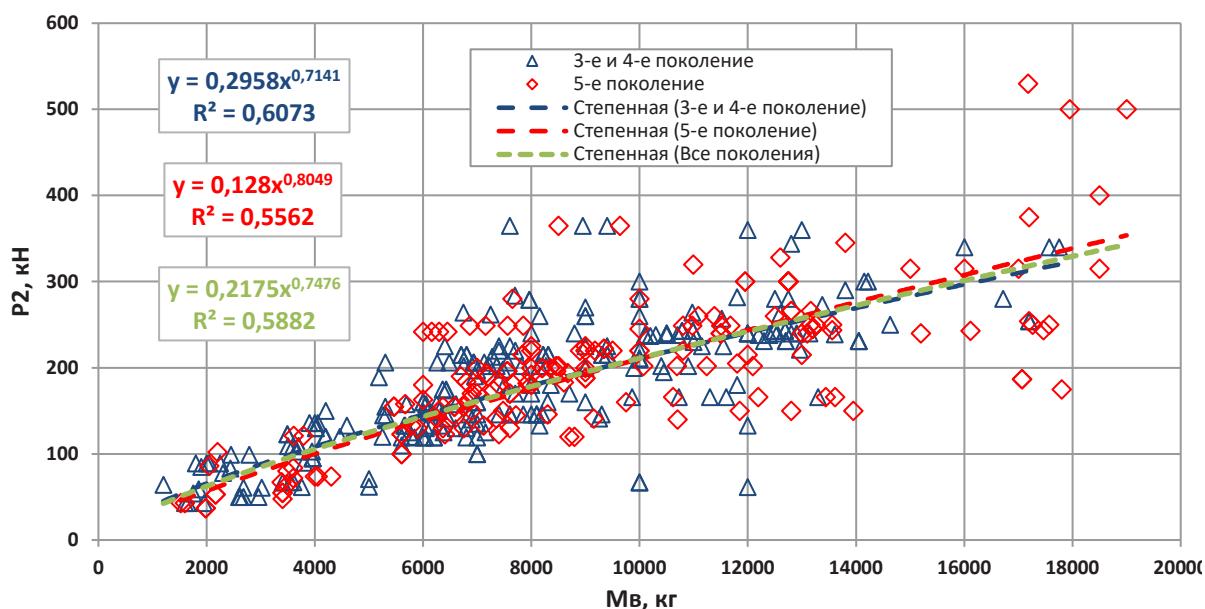


Рисунок 9 – Графическое представление взаимосвязи массы вибрационного модуля M_e и вынуждающей силы P_2
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Graphical representation of the relationship between the mass of the vibration module M_e and the forcing force P_2
Source: compiled by the authors.

Вынуждающая сила P_1 для режима максимальной вибрации машин 3-го и 4-го поколения находится в диапазоне 50...460 кН, а для машин 5-го поколения 80...500 кН. При этом наблюдается несколько диапазонов изменения значения вынуждающей силы (см. рисунок 8):

- для диапазонов масс малогабаритных машин ($M_e < 3000$ кг) вынуждающая сила равна 50...100 кН;
- для лёгких катков ($M_e = 3000...5000$ кг) вынуждающая сила составляет 100...150 кН;
- для самой многочисленной группы катков средней массы ($M_e = 5000 ...10000$ кг) вынуждающая сила находится в диапазоне 160...360 кН;
- для тяжёлых ($M_e = 10000 ...14000$ кг) и сверхтяжёлых ($M_e > 15000$ кг) катков вынуждающая сила составляет 330...520 кН.

Здесь прослеживается аналогия со ступенчатым характером изменения значений ширины и диаметра вальца при соответствующих диапазонах масс машин (см. рисунки 3 и 4).

Также стоит отметить (см. рисунки 8 и 9), что значения, выбивающиеся из общего ряда точек (при значениях $M_e = 10000$ и 12000 кг), принадлежат некоторым устаревшим моделям отечественных и китайских машин.

Для режима «минимальная вибрация» графическая зависимость $P_2(M_e)$ имеет более монотонный характер без наличия «ступеней» (см. рисунок 9). Диапазоны изменения значений вынуждающей силы P_2 для вибрационных катков 3–4-го и 5-го поколений практически совпадают при соответствующих массах машин. При этом разброс значений вынуждающей силы для режима «максимальная вибрация» составляет примерно 2,7 раза, что меньше, чем разброс значений для режима «минимальная вибрация» (примерно в 4,5 раза).

Относительная вынуждающая сила позволяет оценить влияние на характер колебаний вибрационного вальца свойств грунта вынуждающей силы колебаний и массы вибрационного модуля катка. В зависимости от сочетания параметров вибрационных машин, колебания (вибрационного вальца) могут носить харак-

тер с отрывом или без отрыва от грунта [18, 19]. Исследованиями Н.Я. Хархуты³¹ установлены критические значения относительной вынуждающей силы для различных частот колебаний вибровозбудителей грунтоуплотняющих машин, при которых начинает наблюдаться периодический отрыв рабочего органа от поверхности грунта. Грунтоуплотняющие машины, имеющие значения P/Q (P/Q_e) менее критического относятся к «вибрационным», а при значениях P/Q (P/Q_e) больше критического – к «вибротрамбующим» (виброударным)³².

В настоящее время исследователями и производителями вибрационных катков выделяются следующие режимы колебаний вибровальца: безотрывные колебания (режим «постоянный контакт» или continuous contact), колебания с периодическим отрывом от грунта («частичный отрыв» или partial uplift), режим «двойного прыжка» (double jump), режимы «раскачивания» (rocking motion) и «хаотических колебаний» (chaotic motion) [19]. Наиболее эффективно уплотнение грунтов в режиме «частичный отрыв»³³. Этот режим является основным в современных вибрационных катках. Режимы двойного прыжка, раскачивания и хаотических колебаний являются нежелательными и даже опасными, поэтому в процессе уплотнения их необходимо избегать³⁴ [19].

На рисунках 10 и 11 представлена взаимосвязь значений относительной вынуждающей силы (P_1/Q_b и P_2/Q_b) с массой вибровальцового модуля M_b для различных поколений вибрационных катков.

Анализ зависимости относительной вынуждающей силы для режимов «максимальная вибрация» (P_1/Q_e) и «минимальная вибрация» (P_2/Q_e) от массы вибровальцового модуля M_e показывает, что:

- 1) для всех моделей вибрационных катков 3-го, 4-го и 5-го поколений значения P_1/Q_e и P_2/Q_e превышают критические, следовательно все вибрационные катки реализуют ударно-вибрационные режимы колебаний с периодическим отрывом рабочего органа (вальца) от грунта;

³¹ Дорожные машины: Теория, конструкция и расчет: учебник для вузов / Н.Я Хархута, М.И. Капустин, В.П. Семенов, И.М. Эвентов ; под общ. ред. Н.Я. Хархуты. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1976. 471 с.

³² Там же.

³³ Adam D., Pistol J. Dynamic roller compaction for earthworks and roller-integrated continuous compaction control : State of the art overview and recent developments // Conf. di Geotec. di Torino, XXIV Ciclio. 2016. С 1–41.

³⁴ Уплотнение асфальтобетона и грунта. HAMM AG 03.2011 212 4832 / изд. 2-е. 2011. 142 с.

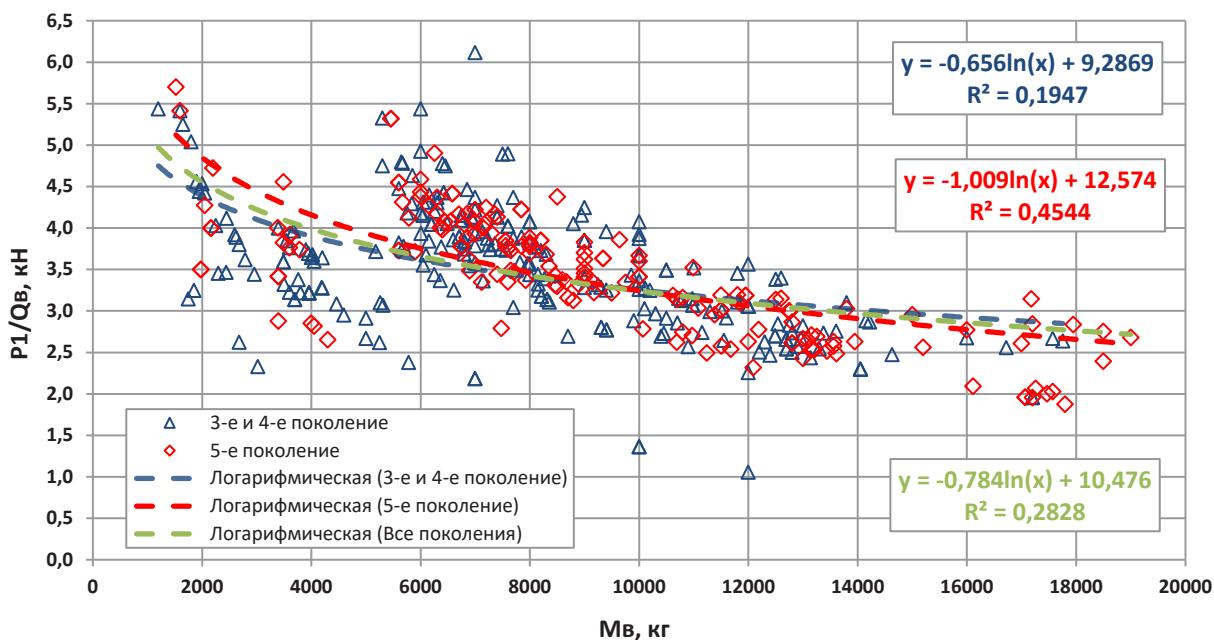


Рисунок 10 – Графическое представление взаимосвязи относительной вынуждающей силы P_1/Q_e и массы вибровальцовочного модуля M_v
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Graphical representation of the relationship between the relative forcing force P_1/Q_e and the mass of the vibrating roller module M_v
Source: compiled by the authors.

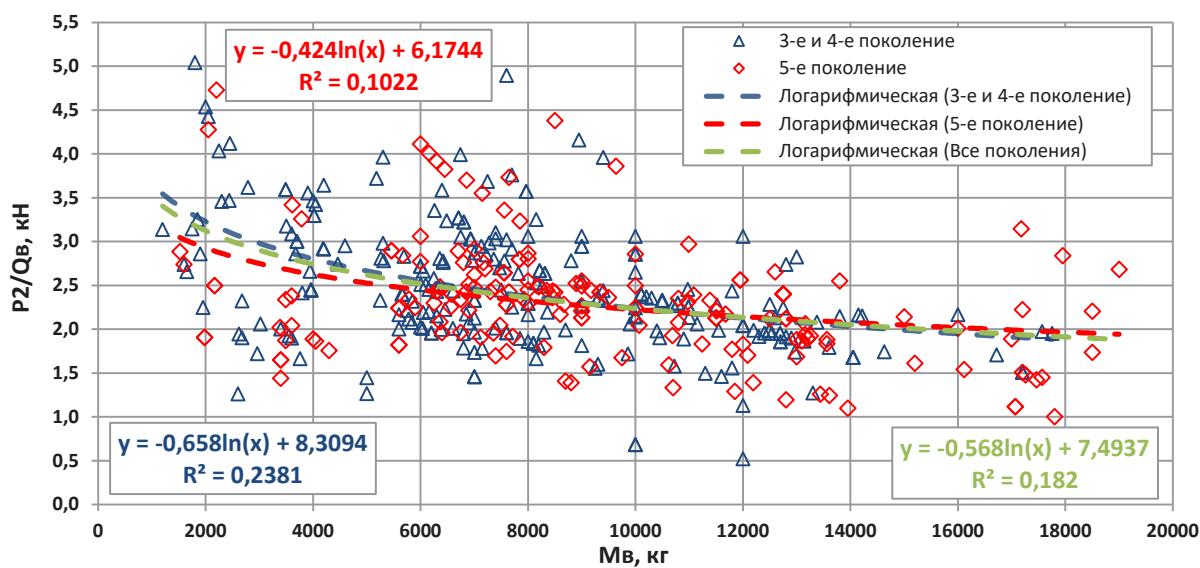


Рисунок 11 – Графическое представление взаимосвязи относительной вынуждающей силы P_2/Q_e и массы вибровальцовочного модуля M_v
Источник: составлено авторами.

Figure 11 – Graphical representation of the relationship between the relative exciting force P_2/Q_e and the mass of the vibratory drum module M_v
Source: compiled by the authors.

2) для режима «максимальная вибрация» характер изменения значений P_1/Q_e имеет разрывный (не монотонный) характер: выделяются два диапазона масс ($M_e < 5000$ кг и $M_e > 5000$ кг), в каждом из которых наблюдается гиперболическая зависимость $P_1/Q_e(M_e)$ с сопоставимыми диапазонами изменения значений P_1/Q_e ;

3) для всех моделей вибрационных катков 3-го, 4-го и 5-го поколений с увеличением массы вибровальцового модуля M_b уменьшаются значения относительной вынуждающей силы P_1/Q_e и P_2/Q_e ;

4) для разных поколений катков при сопоставимой массе вибровальцового модуля M_e разброс значений P_1/Q_e для машин 3-го и 4-го поколения достигает 3 раз. Для машин 5-го поколения разброс значений P_1/Q_e существенно меньше – до 1,5 раз;

5) разброс значений P_2/Q_e для катков 3-го и 4-го поколения сопоставимой массы вибровальцового модуля M_b может достигать 4 и более раз, а для катков 5-го поколения несколько меньше – до 3 раз;

6) разброс значений P_2/Q_e для катков различных поколений примерно в 1,3...2 раза превышает разброс значений P_1/Q_e .

На основании анализа взаимосвязи относительной вынуждающей силы от массы вибровальцового модуля M_b для режимов максимальной вибрации (P_1/Q_e) и минимальной вибрации (P_2/Q_e) можно сделать вывод, что вопрос обоснования численных значений вынуждающей силы изучен недостаточно, следствием чего является существенный разброс значений P_1 и P_2 для катков с сопоставимыми значениями M_e (в т.ч. различных поколений).

В режиме «максимальная вибрация» с увеличением вынуждающей силы катка возрастает энергия, передаваемая в грунт для его деформирования. Но с увеличением вынуждающей силы P_1 (и, соответственно P_1/Q_e) возрастает и сила реакции грунта. Предположитель-

но, максимальные значения P_1/Q_e в режиме «максимальная вибрация» ограничены переходом колебаний вибрационного вальца в нежелательные режимы (двойной прыжок и др.).

В режиме «минимальная вибрация» предположительно максимальные значения вынуждающей силы P_2 (и, соответственно, P_2/Q_e) определяются задачами уплотнения материалов малой прочности (гравий, известняковый щебень и т.д.), а также снижением воздействия вибрации на близлежащие здания и сооружения.

Обращает на себя внимание, что ступенчатый (не монотонный) характер изменения характеристик катков наблюдается и в зависимостях ширины и диаметра вальца в функции массы вибрационного модуля (см. рисунки 3 и 4), причем диапазоны M_e некоторых участков ступенчатой зависимости $P_1/Q_e(M_e)$ и $B(M_e)$, $D(M_e)$ при этом совпадают ($M_e < 5000$ кг и $M_e > 5000$ кг).

Для устранения разрыва на зависимости $P_1/Q_e(M_e)$ было предложено рассматривать значения P_1/Q_e , приведенные к ширине вальца, т.е. ввести новый параметр, который можно назвать «линейная относительная вынуждающая сила» $(P_1/Q_e)/B$, являющийся некоторым аналогом параметра «статическая линейная нагрузка», но учитывающем динамическое воздействие вибрационного вальца³⁵ (рисунки 12 и 13).

Это позволило не только устранить разрывный характер изменения зависимостей $P_1/Q_e(M_e)$ и $P_2/Q_e(M_e)$ (см. рисунки 10 и 11), но и уменьшить разброс значений относительно средних при соответствующих массах M_b . Для значений P_1/Q_e разброс относительно среднего составило 4 раза, а для $(P_1/Q_e)/B$ всего лишь около 2 раз. Зависимости линейной относительной вынуждающей силы (см. рисунки 2 и 13) также характеризуются более высокими значениями коэффициента детерминации уравнений регрессии для $(P_1/Q_e)/B$ и $(P_2/Q_e)/B$.

³⁵ Шорохов Д.А. Анализ параметров оценки динамического воздействия вибрационных катков // Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, приуроченной к празднованию 300-летия Российской академии наук, Омск, 25–26 апреля 2024 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2024. С. 44–49. https://elibrary.ru/download/elibrary_67951441_35651376.pdf

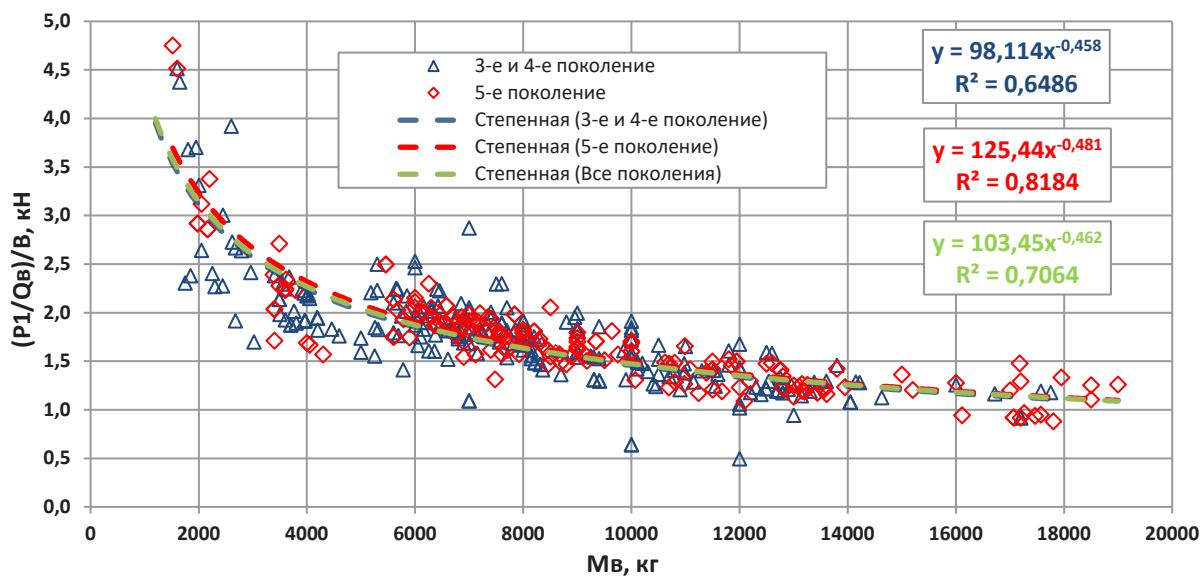


Рисунок 12 – Графическое представление взаимосвязи линейной относительной вынуждающей силы $(P_1/Q_v)/B$ и массы вибровальцовочного модуля M_v (режим максимальной вибрации)
Источник: составлено авторами.

Figure 12 – Graphical representation of the relationship between linear relative forcing force $(P_1/Q_v)/B$ and the mass of the vibrating roller module M_v (maximum vibration mode)
Source: compiled by the authors.

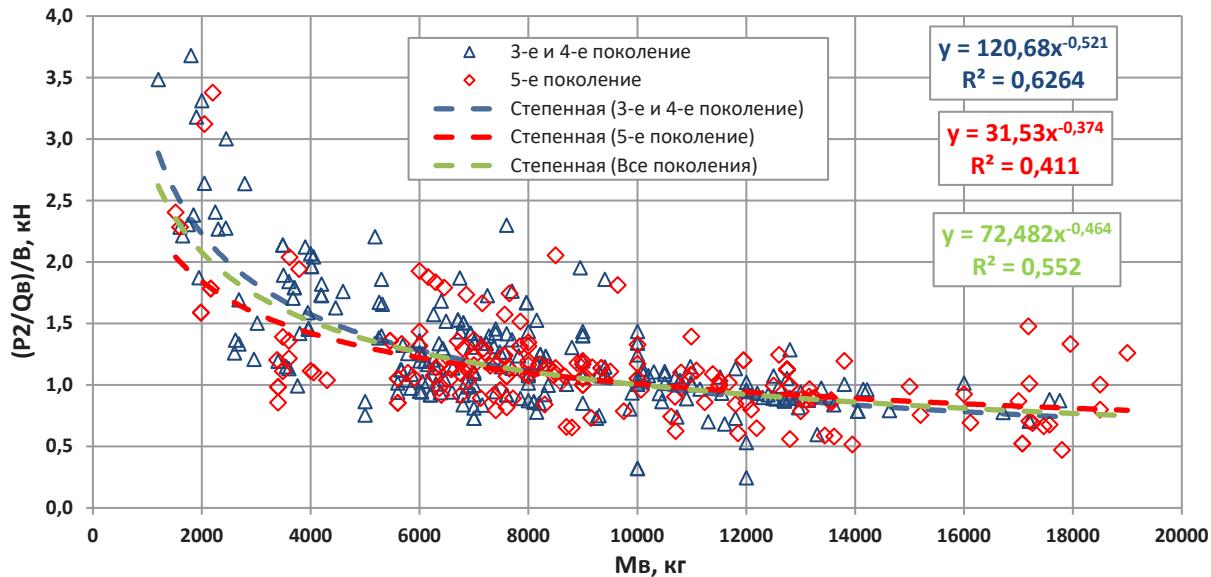


Рисунок 13 – Графическое представление взаимосвязи линейной относительной вынуждающей силы $(P_2/Q_v)/B$ и массы вибровальцовочного модуля M_v (режим максимальной вибрации)
Источник: составлено авторами.

Figure 13 – Graphical representation of the relationship between linear relative forcing force $(P_2/Q_v)/B$ and the mass of the vibrating roller module M_v (maximum vibration mode)
Source: compiled by the authors.

ОБСУЖДЕНИЕ

Разбиение вибрационных катков на группы по массе обусловлено не только их технологическим назначением, но и общностью основных технических характеристик (ширины и диаметра вальца, вынуждающей силы колебаний).

С уменьшением массы вибровальцового модуля увеличивается частота и относительная вынуждающая сила колебаний, что характерно не только для вибрационных катков, но и для всех ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин [21]. Это обусловлено тем, что при уменьшении статической составляющей передаваемых в грунт напряжений необходима их компенсация за счет возрастания динамической составляющей, что приводит к необходимости увеличения относительной вынуждающей силы колебаний. Но для предотвращения перехода колебаний в нежелательные режимы, увеличение относительной вынуждающей силы необходимо сопровождать увеличением частоты колебаний [22], что подтверждается результатами, представленными в данной статье, а также согласуется с принципами регулирования частоты и вынуждающей силы колебаний вибрационных катков некоторых ведущих мировых производителей (например, AMMANN/CASE [18]), оснащенных системами интеллектуального уплотнения. При этом большое значение имеют и другие характеристики катка, такие как количество и характеристики амортизаторов, соотношение масс вальца и рамы и др. Следовательно, для анализа функционирования вибрационного катка и повышения эффективности его использования при уплотнении грунта необходимо совместно анализировать влияние относительной вынуждающей силы, частоты колебаний, соотношение массы вальца и его рамы [23, 24], характеристик амортизаторов и свойств грунта, что недостаточно исследовалось в известных работах (например, [25, 26, 27, 28, 29] и др.).

Продолжающиеся теоретические и экспериментальные исследования уплотнения вибрационными катками каменных материалов показывают целесообразность применения для уплотнения данных крупнозернистых материалов пониженных частот колебаний 15...18 Гц [30, 31]. Ожидаемое при этом снижение потребляемой мощности и расхода топлива, увеличение ресурса вибровозбудителя, а также повышение эффективности уплотнения данных материалов может привести к рас-

ширению диапазона частот колебаний вибрационных катков, а именно понижению нижней границы частотного диапазона до 15...18 Гц для более эффективного уплотнения каменных материалов. Однако при этом может снижаться устойчивость колебаний (вследствие приближения частоты колебаний вальца к собственной частоте колебаний уплотняемого материала) и повышается опасность перехода колебаний в нежелательные режимы [22], [32].

Накопление опыта в области исследований, производства и применения вибрационных грунтовых катков приводит к уменьшению разброса значений основных характеристик вибрационных катков при смене поколений. Это относится к таким параметрам, как вынуждающая сила, частота колебаний, относительная вынуждающая сила. При этом диапазоны изменения значений данных параметров несколько смещаются.

По таким параметрам, как мощность двигателя, отвечающая за ходовые качества, проходимость и преодолеваемый уклон, диаметр и ширина обечайки вальца, соотношение эксплуатационной массы катка к массе вибрационного модуля у производителей сложилось единое мнение, практически не изменяющееся для различных поколений машин, что также отражается в виде довольно высоких значений коэффициента детерминации (см. таблицу 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье на основании статистического анализа технических характеристик вибрационных грунтовых катков 3–5-го поколений, выпускавшихся с конца 1990-х годов и по настоящее время, выявлены и проанализированы некоторые закономерности развития данного вида техники.

Определены диапазоны изменения основных технических характеристик вибрационных катков различных поколений в зависимости от массы машины (вибрационного модуля) и выявлены тенденции изменения этих параметров при переходе к различным поколениям грунтовых катков.

Установлена тенденция увеличения массы грунтовых вибрационных катков и увеличения количества тяжёлых ($M = 15000...21000$ кг или $M_e = 10000...14000$ кг) и сверхтяжёлых ($M > 21000$ кг или $M_e > 15000$ кг) моделей при одновременном уменьшении количества моделей малогабаритных ($M < 5000$ кг, $M_e < 3000$ кг) и легких ($M = 5000...9000$ кг, $M_e = 3000...5000$ кг) катков. Предполагается, что малогабаритные

катки (с $M_e < 3000$ кг) замещаются тяжелыми самоходными виброплитами, имеющими более высокую глубину уплотнения за счет большей площади контактной поверхности с грунтом при существенно меньшей массе и стоимости³⁶.

Анализ зависимости $P_1/Q_e(M_e)$ (см. рисунок 10) показывает наличие не одной общей, а двух различных гиперболических зависимостей и существенный разброс данных, что отражается в низком значении коэффициента детерминации R^2 . Для уменьшения разброса было предложено рассматривать значения P_1/Q_e , приведенные к ширине вальца B , т.е. ввести новый параметр «линейная относительная вынуждающая сила» $(P_1/Q_e)/B$, который целесообразно использовать совместно с параметром «относительная вынуждающая сила». Это позволило устраниТЬ ступенчатый характер зависимости $P_1/Q_e(M_e)$ и уменьшить разброс значений P_1/Q_e и P_2/Q_e (см. рисунки 12 и 13). Однако при анализе не относительных, а абсолютных значений вынуждающей силы использование вместо P_1 и P_2 значений P_1/B и P_2/B показало не улучшение, а ухудшение значения коэффициента детерминации R^2 . Данный вопрос представляет научный интерес и требует более глубокого изучения.

На эффективность уплотнения вибрационными катками различных материалов, кроме параметров, указывающихся в технических характеристиках вибрационных катков, большое влияние оказывают количество и характеристики амортизаторов вальца, а также соотношение масс вальца и его рамы³⁷. К сожалению, производители не указывают данную информацию в технических характеристиках вибрационных катков.

Данное исследование охватывает широкий диапазон моделей вибрационных катков различных отечественных и зарубежных производителей, выпускавшихся в течение последних 20...30 лет, расширяет и дополняет результаты [17]. Это позволяет производителям вибрационных катков, а также исследователям уплотнения грунтов вибрационными машинами уточнять диапазоны изменения различных характеристик вибрационных катков при моделировании их функционирования, выявлять некоторые тенденции развития данного вида машин, обосновывать технические характеристики вибрационных катков при проектировании и модернизации. Результаты анализа показывают, что в настоящее время среди производителей и исследователей нет единого мнения о методике обоснования основных технических характеристик грунтовых вибрационных катков, что выражается в достаточно большом разбросе значений параметров, определяющих динамическое воздействия вибрационных катков на уплотняемый материал (частоты колебаний и относительной вынуждающей силы).

ристики вибрационных катков при проектировании и модернизации. Результаты анализа показывают, что в настоящее время среди производителей и исследователей нет единого мнения о методике обоснования основных технических характеристик грунтовых вибрационных катков, что выражается в достаточно большом разбросе значений параметров, определяющих динамическое воздействия вибрационных катков на уплотняемый материал (частоты колебаний и относительной вынуждающей силы).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тимофеев Д.М. Основные факторы и их зависимости, определяющие оптимальные режимы работы вибрационных катков при уплотнении песчаных грунтов // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1(52). С. 138. http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_78_Timofeev_1.pdf_4021ab4e6b.pdf
2. Тюремнов И.С., Игнатьев А.А. Уплотнение грунтов вибрационными катками: монография. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2012. 140 с.
3. Пермяков В.Б., Захаренко А.В., Савельев С.В. Обоснование выбора параметров вибрационных катков // Известия вузов. Строительство. 2003. № 2. С. 100–103.
4. Тимофеев Д.М. Оценка эффективности применения грунтоуплотняющих машин и механизмов // Инженерный вестник Дона. 2018. № 1(48). С. 74. http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_133_Timofeev.pdf_8efc46a15c.pdf
5. Adam D. Roller Integrated Continuous Compaction Control (CCC) Technical Contractual Provisions & Recommendations // Des. Constr. Pavements Rail Tracks Geotech. Asp. Process. Mater. / ed. Correia A.G. et al. Taylor & Francis Group, London, UK, 2007. P. 111–138.
6. Pistrol J. et al. An advanced ICMV for vibratory roller compaction // Acta Geotech. 2024. doi. org/10.1007/s11440-024-02342-8
7. Попов Ю.Г., Малов Г.С., Красников А.С. Моделирование и оптимизация двухамплитудного дебаланса с подвижной внутренней массой // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 6(759). С. 30–38. doi: 10.18698/0536-1044-2023-6-30-38
8. Вибрационные устройства с асимметричными колебаниями: Часть 1 / М. Д. Герасимов, С.Н. Глаголев, Н.С. Любимый, С.С. Латышев. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2023. – 144 с.
9. Shi M. et al. Effective compaction power index for real-time compaction quality assessment of coarse-

³⁶ Марышев Б.С. Большие возможности при малой цене. Реверсивные виброплиты // Строительная техника и технологии. 2002. № 1. С. 46–48.

³⁷ Костельев М.П. Уплотнению асфальтобетона требуется обновленное поколение дорожных катков // Каталог-справочник «Дорожная техника и технологии». 2003. С. 12–22.

- grained geomaterials: Proposal and comparative study // *Constr. Build. Mater.* 2022. Vol. 321. P. 126375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126375>
10. Fathi A. et al. Assessing depth of influence of intelligent compaction rollers by integrating laboratory testing and field measurements // *Transp. Geotech.* 2021. Vol. 28. P. 100509. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100509>
11. Xu G. et al. The pioneer of intelligent construction—An overview of the development of intelligent compaction // *J. Road Eng.* 2022. Vol. 2, № 4. P. 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.12.001>
12. Chen C. et al. Intelligent compaction quality evaluation based on multi-domain analysis and artificial neural network // *Constr. Build. Mater.* 2022. Vol. 341. P. 127583. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127583>
13. Briaud J.L., Seo J. Intelligent compaction: Overview and Research Needs // Texas A&M Univ. 2003. P. 1–84.
14. Тюремнов И.С. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 3. Особенности функционирования и “интеллектуальное уплотнение” // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 2(41). С. 115–122. <http://pnu.edu.ru/vestnik/pub/articles/2226/>
15. «Интеллектуальное уплотнение»: дерзкий замысел или объективная реальность? // Строительные и дорожные машины. 2007. № 8. С. 8–13.
16. Тюремнов И.С., Филатов И.С., Игнатьев А.А. Обзор рекомендаций производителей по использованию вибрационных катков для уплотнения грунта // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2014. № 2(33). С. 155–162. <http://pnu.edu.ru/vestnik/pub/articles/1961/>
17. 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. <https://vestnik.pnu.edu.ru/vestnik/pub/articles/1987/>
18. Anderegg R., Kaufmann K. Intelligent Compaction with Vibratory Rollers // *Transp. Res.* 2004. Vol. 1868. P. 124–134.
19. Adam D., Kopf F. Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device) // *Proc. Int. Semin. Geotech. Pavement Railw. Des. Constr. Athens, Greece.* 2004. P. 97–106.
20. Тюремнов И.С., Шорохов Д.А. Моделирование взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом // Вестник СибАДИ. 2024. Vol. 21, № 2. С. 202–216. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216>
21. Тюремнов И.С. Анализ технических характеристик различных типов ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин // Вестник СибАДИ. 2023. Vol. 20, № 6(94). С. 706–716. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>
22. Тюремнов И.С. Исследование влияния динамических характеристик вибрационного катка на особенности взаимодействия элементов системы «рама-валец-грунт». Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ». 2025;22(3):396–416. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-396-416>
23. Yoo T.-S., Selig E.T. Dynamics of Vibratory-Roller Compaction // *J. Geotech. Eng. Div. ASCE.* 1979. № 105 (GT10). P. 1211–1231.
24. Тарасов В.Н., Бояркина И.В., Серебренников В.С. Влияние массы вертикального пригруза на амплитуду колебаний вибровальца и виброзащиту рамы дорожного катка // Строительные и дорожные машины. 2019. № 9. С. 30–36.
25. Шабанова Г.И., Савельев С.В., Бурый Г.Г. Математическое описание колебательной системы “вибрационный рабочий орган - грунт” // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2013. № 3(31). С. 102–107. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_19032661_60709817.pdf
26. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Обоснование способа регулирования контактного усилия вибрационного вальца с уплотняемым материалом // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 1(53). С. 36–42. DOI: 10.18324/2077-5415-2022-1-36-42
27. Teramoto S., Ito S., Kobayashi T. Deep learning-based soil compaction monitoring: A proof-of-concept study // *J. Terramechanics.* 2024. Vol. 111. P. 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.10.001>
28. Bratu P., Tonciu O., Nițu M.C. Modeling the Vibratory Compaction Process for Roads // *Buildings.* 2023. Vol. 13, № 11. <https://doi.org/10.3390/buildings13112837>
29. Lu Y. et al. Research on vibratory & oscillatory coexistence nonlinear dynamics based on drum-subgrade coupling model // *Int. J. Non. Linear. Mech.* 2023. Vol. 157. P. 104536. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2023.104536>
30. Wersäll C., Nordfelt I., Larsson S. Soil compaction by vibratory roller with variable frequency // *Géotechnique.* ICE Publishing, 2016. Vol. 67, № 3. P. 272–278. DOI: 10.1680/jgeot.16.P.051
31. Wu K. et al. Discrete Element Modeling of Vibration Compaction Effect of the Vibratory Roller in Roundtrips on Gravels // *J. Test. Eval.* 2021. Vol. 49. P. 20190910. <https://doi.org/10.1520/JTE20190910>
32. Тюремнов И.С. Исследование влияния динамических характеристик вибрационного катка на особенности взаимодействия элементов системы «рама-валец-грунт». Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ». 2025;22(3):396–416. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-396-416>

REFERENCES

1. Timofeev D.M. Key Factors and Dependencies Determining Optimal Operating Modes of Vibratory Rollers for Sand Compaction. *Engineering Bulletin of Don.* 2019; 1(52): 138. (in Russ.) http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_78_Timofeev_1.pdf_4021ab4e6b.pdf
2. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A. Uplotnenie gruntov vibratsionnymi katkami : monografiya. YAoslavl: Izd-vo YAGTU, 2012. 140 p. (in Russ.)

3. Permyakov V.B., Zakharenko A.V., Savel'ev S.V. Obosnovanie vybora parametrov vibratsionnykh katkov. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2003; 2: 100–103. (in Russ.)
4. Timofeev D.M. Otsenka effektivnosti prime-neniya gruntuoplotnyayushchikh mashin i mekhanizmov. *Inzhenernyy vestnik Doma*. 2018; № 1(48): 74. (in Russ.) http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_133_Timofeev.pdf_8efc46a15c.pdf
5. Adam D. Roller Integrated Continuous Compaction Control (CCC) Technical Contractual Provisions & Recommendations. *Des. Constr. Pavements Rail Tracks Geotech. Asp. Process. Mater.* / ed. Correia A.G. et al. Taylor & Francis Group, London, UK, 2007: 111–138.
6. Pistor J. et al. An Advanced ICMV for Vibratory Roller Compaction. *Acta Geotechnica*. 2024. doi: [10.1007/s11440-024-02342-8](https://doi.org/10.1007/s11440-024-02342-8)
7. Popov YU.G., Malov G.S., Krasnikov A.S. Modelirovaniye i optimizatsiya dvukhAMPLITUDNOGO de-balansa s podvizhnou vnutrenney massoy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*. 2023; 6(759): 30–38. (in Russ.) doi: [10.18698/0536-1044-2023-6-30-38](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-6-30-38)
8. Vibratsionnye ustroystva s asimmetrichnymi kolebaniyami: Chast' 1 / M. D. Gerasimov, S.N. Glagolev, N.S. Lyubimyy, S.S. Latyshev. – Belgorod : Belgorodskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiy universitet im. V. G. SHukhova, 2023. – 144 p. (in Russ.)
9. Shi M. et al. Effective Compaction Power Index for Real-Time Quality Assessment of Coarse-Grained Geomaterials: Proposal and Comparative Study. *Construction and Building Materials*. 2022; 321: 126375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126375>
10. Fathi A. et al. Assessing Depth of Influence of Intelligent Compaction Rollers by Integrating Laboratory Testing and Field Measurements. *Transportation Geotechnics*. 2021; 28: 100509. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100509>
11. Xu G. et al. The Pioneer of Intelligent Construction-An Overview of the Development of Intelligent Compaction. *Journal of Road Engineering*. 2022; 2(4): 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.12.001>
12. Chen C. et al. Intelligent Compaction Quality Evaluation Based on Multi-Domain Analysis and Artificial Neural Network. *Construction and Building Materials*. 2022; 341: 127583. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127583>
13. Briaud J.L., Seo J. Intelligent Compaction: Overview and Research Needs. *Texas A&M University*. 2003: 1–84.
14. Tyuremnov I.S. Obzor sistem nepreryvnogo kontrolya uplotneniya grunta dlya vibratsionnykh katkov. Chast' 3. Osobennosti funktsionirovaniya i "intellektual'noe uplotnenie". *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016; 2(41): 115–122. (in Russ.) <http://pnu.edu.ru/vestnik/pub/articles/2226/>
15. «Intellektual'noe uplotnenie»: derzhkiy zamsel ili ob“ektivnaya real'nost'? *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2007; 8: 8–13. (in Russ.)
16. Tyuremnov I.S., Filatov I.S., Ignat'ev A.A. Obzor rekomendatsiy proizvoditeley po ispol'zovaniyu vibratsionnykh katkov dlya uplotneniya grunta. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014; 2(33):155–162. (in Russ.) <http://pnu.edu.ru/vestnik/pub/articles/1961/>
17. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A., Filatov I.S. Statisticheskiy analiz tekhnicheskikh kharakteristik gruntovykh vibratsionnykh katkov. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014; 3(34): 81–88. (in Russ.) <https://vestnik.pnu.edu.ru/vestnik/pub/articles/1987/>
18. Anderegg R., Kaufmann K. Intelligent Compaction with Vibratory Rollers. *Transportation Research*. 2004; 1868: 124–134.
19. 25. Adam D., Kopf F. Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device). *Proc. Int. Semin. Geotech. Pavement Railway Design and Construction*. Athens, Greece. 2004: 97–106.
20. 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.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216>
21. Tyuremnov I.S. Technical parameters analyses of different types of impact-vibration soil compacting machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(6): 706–716. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>
22. Tyuremnov I.S. Investigation into the influence of vibratory roller dynamic characteristics on interaction features of Frame-Drum-Soil system elements. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22(3): 396–416. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-396-416>
23. Yoo T.-S., Selig E.T. Dynamics of Vibratory-Roller Compaction. *Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE*. 1979; 105(GT10): 1211–1231.
24. Tarasov V.N., Boyarkina I.V., Serebrennikov V.S. Vliyanie massy vertikal'nogo priguza na amplitudu kolebaniy vibroval'tsa i vibrozashchituyu dorozhnogo katka. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2019; 9: 30–36. (in Russ.)
25. Shabanova G.I., Savel'ev S.V., Buryy G.G. Matematicheskoe opisanie kolebatel'noy sistemy "vibratsionnyy rabochiy organ - grunt". *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-dorozhnoy akademii*. 2013; 3(31):102–107. (in Russ.) https://www.elibrary.ru/download/elibrary_19032661_60709817.pdf
26. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Obosnovanie sposoba regulirovaniya kontaktogo usiliya vibratsionnogo val'tsa s uplotnyayushchim materialom. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2022; 1(53): 36–42. (in Russ.) DOI 10.18324/2077-5415-2022-1-36-42
27. Teramoto S., Ito S., Kobayashi T. Deep Learning-Based Soil Compaction Monitoring: A Proof-of-Concept Study. *Journal of Terramechanics*. 2024; 111: 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.10.001>

28. Bratu P., Tonciu O., Nițu M.C. Modeling the Vibratory Compaction Process for Roads. *Buildings*. 2023; 13(11). <https://doi.org/10.3390/buildings13112837>
29. Lu Y. et al. Research on Vibratory & Oscillatory Coexistence Nonlinear Dynamics Based on Drum-Subgrade Coupling Model. *International Journal of Nonlinear Mechanics*. 2023; 157: 104536. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2023.104536>
30. Wersäll C., Nordfelt I., Larsson S. Soil Compaction by Vibratory Roller with Variable Frequency. *Géotechnique. ICE Publishing*, 2016; 67(3): 272–278. DOI: 10.1680/jgeot.16.P.051
31. Wu K. et al. Discrete Element Modeling of Vibration Compaction Effect of the Vibratory Roller in Roundtrips on Gravels. *Journal of Testing and Evaluation*. 2021; 49: 20190910. <https://doi.org/10.1520/JTE20190910>
32. Tyuremnov I.S. Investigation into the influence of vibratory roller dynamic characteristics on interaction features of Frame-Drum-Soil system elements. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025;22(3):396-416. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-396-416>.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

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

Шорохов Д.А. Сбор информации о технических характеристиках грунтовых вибрационных катков, статистическая обработка данных, подготовка текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Tyuremnov Ivan S. General workflow organization, manuscript preparation.

Shorohov Dmitrii A. Data collection on the technical specifications of ground vibratory rollers, statistical data processing, manuscript preparation.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

SPIN-код: 9976-0728,

e-mail: tyuremnovis@yandex.ru

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

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1825-0676>,

SPIN-код: 6483-6955,

e-mail: shorohovda@ystu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tyuremnov Ivan S. – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Head of the Construction and Road Machines Department, (88, Moskovsky Prospekt, Yaroslavl, 150023).

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

SPIN-код: 9976-0728,

e-mail: tyuremnovis@yandex.ru

Shorohov Dmitrii A. – Post-graduate student of the Construction and Road Machines Department, Yaroslavl State Technical University, (88, Moskovsky Prospekt, Yaroslavl, 150023).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1825-0676>,

SPIN-код: 6483-6955,

e-mail: shorohovda@ystu.ru

Научная статья

УДК: 621.89.012.2

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-750-758>

EDN: UFRJLB



Check for updates

СМАЗОЧНЫЕ КОМПОЗИЦИИ НА ВОДНО-СПИРТОВОЙ ОСНОВЕ ДЛЯ ЗАКРЫТЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Б.П. Трофименко¹ A.B. Маркелов¹²³, А.С. Корытов¹, Ю.П. Осадчий²

¹ Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия

² Ивановский государственный политехнический университет,
г. Иваново, Россия

³ Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН
г. Москва, Россия

ответственный автор
bog6741@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Предварительные проведенные исследования показали, что смазочные композиции на водно-спиртовой основе обладают высоким индексом вязкости (более 150 ед.), низким коррозионным воздействием и низкой температурой застывания (ниже 56 °C), что является преимуществом по сравнению с традиционными трансмиссионными маслами. Это особенно важно для закрытых узлов трения дорожно-строительных машин, которые требуют надежной и долговременной смазки для предотвращения износа и продления службы оборудования. Также эти композиции состоят из экологически чистых компонентов, что делает их пригодными в условиях эксплуатации с высокими требованиями по экологии.

Материалы и методы. Найдена область оптимальных концентраций в воде предельных одноатомных спиртов. При максимуме антифрикционных и противоизносных свойств с эффектом максимальной стабилизации структуры воды. Предложен возможный механизм смазочного действия водно-спиртовых растворов с образованием на поверхности трения модифицированных пленок, обладающих противозадирными свойствами.

Результаты. Экспериментальным путем найден предельный одноатомный спирт, раствор которого при определенном соотношении с водой обладает высокими смазочными свойствами. Рассмотрен механизм смазочного действия двойных и тройных систем и определен эффект максимальной стабилизации структуры воды, который вызывает изменение объемных и поверхностно-активных свойств композиции.

Заключение. Исследование является научной работой, посвященной актуальной проблеме замены минеральных масел синтетическими жидкостями путем разработки новых составов смазочных водосодержащих композиций с улучшенными антифрикционными и противоизносными свойствами, в результате чего решение этой проблемы имеет важное значение в деле повышения износостойкости узлов трения коробок передач, червячных редукторов, входящих в состав трансмиссии строительно-дорожных машин, автотранспорта и других транспортно-технологических комплексов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: трение, износ, смазочные жидкости, одноатомные спирты, противоизносные свойства, антифрикционные свойства, строительные и дорожные машины

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность канд. техн. наук, ведущему специалисту ПАО «Автодизель» Бойкову Дмитрию Викторовичу за проявленную поддержку по организации проведения исследований физико-химических и трибологических свойств новых смазочных материалов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: экспериментальные исследования проводились с использованием средств гранта «УМНИК» по договору №18366ГУ/2023 от 09.08.2023.

Статья поступила в редакцию 30.08.2025; одобрена после рецензирования 11.09.2025; принята к публикации 21.10.2025.

© Трофименко Б.П., Маркелов А.В., Корытов А.С., Осадчий Ю.П., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

*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: Трофименко Б.П., Маркелов А.В., Корытов А.С., Осадчий Ю.П. Смазочные композиции на водно-спиртовой основе для закрытых узлов трения дорожно-строительных машин // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, №. С. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-750-758>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-750-758>

EDN: UFRJLB

LUBRICANT COMPOSITIONS WITH WATER-ALCOHOL BASE FOR CLOSED FRICTION UNITS OF ROAD CONSTRUCTION MACHINES

Bogdan P. Trofimenko¹✉, Aleksandr V. Markelov¹²³, Aleksey S. Korytov¹, Yuriy P. Osadchiy²

¹ Yaroslavl State Technical University,
Yaroslavl, Russia

² Ivanovo State Polytechnic University,
Ivanovo, Russia

³ A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, RAS
Moscow, Russia

✉ corresponding author
bog6741@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Preliminary conducted studies have shown that water-alcohol based lubricants have a high viscosity index (more than 150 units), low corrosion influence and low pour point (below 56 °C), which is an advantage over traditional transmission oils. This is especially important for enclosed friction units of road construction machines, which require reliable and long-term lubrication to prevent wear and prolong the service life of the equipment. These compositions also consist of environmentally friendly components, that makes them suitable for use in operating conditions with strict environmental requirements.

Materials and methods. The optimal concentration range of saturated monatomic alcohols in water has been found. This range provides maximum antifriction and anti-wear properties with the effect of maximum stabilization of the water structure. A possible way of lubricating action of water-alcohol solutions with the formation of modified layers with extreme pressure properties on the friction surface has been proposed.

Results. The saturated monatomic alcohol has been found experimentally, the solution of which, at a certain ratio with water, has high lubricating properties. The algorithm of the lubricating action of double and triple systems has been considered, and the effect of maximum stabilization of the water structure has been determined, which causes a change in the volumetric and surface-active properties of the composition.

Conclusion. The study refers to the scientific research devoted to the urgent problem of replacing mineral oils with synthetic fluids by developing new compositions of water-containing lubricants with improved antifriction and anti-wear properties, the problem solution is important as it results in increasing the wear resistance of friction units in gearboxes, worm drives, which are part of the transmission of construction and road machines, motor vehicles and other transport and technological complexes.

KEYWORDS: friction, wear, lubricants, monatomic alcohols, anti-wear properties, antifriction properties, construction and road machines

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors express their gratitude to Dmitriy Viktorovich Boykov, PhD, a leading specialist at "Avtodiesel", Public Joint Stock Company, for his support in organizing the research of physicochemical and tribological properties of new lubricants.

FINANCING: The experimental studies were conducted using the funds of the "UMNIK" grant under contract No. 18366GU/2023 dated September 8, 2023.

© Trofimenko Bogdan P., Markelov Aleksandr V., Korytov Aleksey S., Osadchiy Yuriy P., 2025



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

The article was submitted: August 30, 2025; approved after reviewing: September 11, 2025; accepted for publication: October 21, 2025.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Trofimenko B. P., Markelov A. V., Korytov A. S., Osadchiy Yu. P. Lubricant compositions with water-alcohol base for closed friction units of road construction machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2025; 22 (5): 750-758. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-750-758>

ВВЕДЕНИЕ

Современные строительные-дорожные машины (СДМ) работают в условиях повышенных нагрузок и агрессивных внешних факторов [1], что требует от смазочных материалов высоких эксплуатационных характеристик. Результаты анализа эксплуатируемых СДМ показывают, что в качестве основной причины отказов является преждевременный износ трущихся поверхностей [2]. Общая задача повышения долговечности СДМ в большинстве случаев сводится к увеличению износостойкости отдельных деталей, лимитирующих надежность узлов, систем и всего агрегата в целом.

Известно, что интенсивно используемые зубчатые механизмы подвержены негативным воздействиям ряда факторов. Это и неустановившийся режим работы, и реверс, и вибрации, и возможность попадания абразивных частиц в зону контакта трущихся поверхностей, и разнообразие внешних условий эксплуатации, вызванное как переменными нагрузками, так и изменениями в окружающей среде, – все это приводит к существенному повышению интенсивности изнашивания трущихся поверхностей деталей машин. Наиболее действенным и эффективным методом борьбы с износом является использование в узлах трения качественных смазочных материалов [3, 4].

В последние годы наблюдается рост интереса к экологически чистым смазочным композициям на водно-спиртовой основе, которые могут предложить ряд преимуществ, таких как улучшенные смазывающие свойства, хорошая теплопроводность и безопасность для окружающей среды [5, 6].

На основании особенностей структуры молекул воды были рассмотрены и предложены различные составы смазочных жидкостей, содержащих предельный одноатомный спирт ряда метанола. Исследования проводились при сравнении смазочных и других эксплуатационных свойств широко применяемых в промышленности минеральных масел, а также известных композиций на водной основе и разработанных жидкостей [7, 8].

Обращается особое внимание на смазочные жидкости на водной основе в связи с тем,

что с наличием у них таких важнейших преимуществ, как хорошие вязкостные свойства, возможность добавлять загустители, весьма высокие вязкостно-температурные свойства, неизменность коррозионного воздействия жидкостей при попадании в них воды извне, хорошая стойкость в этих композициях различных резинотехнических и уплотнительных материалов, простота приготовления смазочных жидкостей, которая заключается в основном лишь во взаимном растворении их компонентов. Немаловажно, что стоимость таких композиционных смесей значительно ниже синтетических композиций [9].

Анализ составов отечественных и зарубежных жидкостей на водной основе показал, что существующие смазочные композиции этого класса состоят из водной основы и загустителя [10]. А улучшение антифрикционных и противоизносных свойств осуществляется на основе добавления присадок [11]. В настоящее время в нашей стране и за рубежом замена минеральных и синтетических масел композициями на водной основе является весьма актуальной проблемой. Это тесно связано с вопросами охраны окружающей среды и экономии нефтепродуктов, так как запасы нефтяного сырья ограничены [12].

Развитие потребности в синтетических смазочных жидкостях привело к созданию смазочных материалов различной природы [13, 14]. Сюда относятся продукты органического синтеза, водно-масляные эмульсии (прямые и обратные), а также различные композиционные немасляные смеси.

Наиболее полно требованиям экологии и охраны окружающей среды отвечают смазочные водосодержащие композиции. К таким жидкостям относятся водно-масляные эмульсии и смеси, не содержащие нефтяные масла. Водно-масляные эмульсии негорючие, нетоксичны, и имеют самую низкую стоимость [15]. Однако время жизни таких эмульсий невелико даже с применением самых современных эмульгаторов – вязкостные и вязкостно-температурные характеристики данных жидкостей очень низкие в большинстве случаев. Кроме того, водно-масляные эмульсии

коррозионно активны и склонны к поражению микрофлорой.

Таким образом, наиболее перспективными на сегодняшний день среди синтетических смазочных жидкостей следует признать смазочные жидкости, не содержащие масла. К ним относятся водно-этиленгликолевые и водно-гликолевые, а также водно-глицериновые среды [16, 17].

К основным преимуществам данных жидкостей следует отнести, во-первых, высокие вязкостно-температурные свойства (индекс вязкости достигает 140–160 и выше), высокую стойкость в этих средах различных резинотехнических уплотнителей и, наконец, неизменность коррозионного воздействия при попадании в них небольших количеств воды извне.

К недостаткам указанных жидкостей можно отнести лишь повышенную испаряемость воды. Однако многолетний опыт эксплуатации показал, что потери воды в год обычно невелики и составляют не более 3–4%.

Такие жидкости обычно состоят из воды, растворенного в воде этиленгликоля или глицерина, а также растворенного в воде загустителя, придающего жидкости необходимые вязкостные свойства. Кроме указанных компонентов, в состав таких жидкостей обычно входит большое количество присадок антифрикционного, противоизносного, антипенного, буферного и других назначений. Таким образом, путь по улучшению смазочных свойств жидкостей за счет введения еще большего количества присадок и компонентов видимо нельзя признать достаточно эффективным. На наш взгляд, существует другой, более эффективный путь улучшения смазочных свойств жидкостей за счет изменения структуры их основы, то есть за счет изменения структуры воды [18]. Согласно современным представлениям о структуре воды, вода представляет собой некоторую ажурную структуру. Между молекулами воды находятся пустоты и кольцевые каналы, которые могут заполняться некоторыми низкомолекулярными углеводородами. Наибольший интерес среди таких низкомолекулярных углеводородов представляет собой предельные одноатомные спирты ряда метанола.

Некоторые из них, в частности, метанол, этиanol, пропанол, изопропанол, имеют в воде неограниченную растворимость.

Целью данной работы является теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение возможности использования предельных одноатомных и многоатомных

спиртов в их оптимальном соотношении с водой для повышения смазочных свойств водо-содержащих композиций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования были разбиты на два этапа.

На первом этапе проводилось исследование смазочных свойств воды, предельных одноатомных спиртов и их водных растворов при трении металлических поверхностей. Испытаны водные растворы с концентрациями от 5 до 95%.

Для оценки антифрикционных и противоизносных свойств воды и спирта-применялась схема трения с переменной площадью контакта и проводилась на серийно выпускаемой, имеющейся в распоряжении в лаборатории ЯГТУ, машине трения СМЦ-2. Данная машина является модификацией машины трения Амслера, предназначена для испытания материалов на износ и определение их фрикционных свойств в условиях трения скольжения и трения качения при нормальных температурах для модельных трибосистем. Допускаемая погрешность измерения момента трения (при проверке в режиме статического нагружения) составляет $\pm 5\%$ от измеряемой величины.

Неподвижный образец в виде диска прижимается к вращающемуся контрольному телу с помощью нагружающего устройства. Схема узла трения представлена на рисунке 1. Коэффициент трения регистрируется индуктивным датчиком и на потенциометре усовершенствованной конструкции.

Глубина износа рассчитывалась по формуле [19]:

$$H = l^2 / 8r, \quad (1)$$

где l – ширина канавки; r – радиус образца.

При испытаниях на износ обычно наблюдается разброс результатов, зависящий как от свойств материалов, так и от методики исследования [10]. Для оценки воспроизводимости результатов экспериментов были проведены серии опытов на образцах из пористого спеченного материала при нагрузке 2,0 МПа, смазке водной композицией, линейной скорости скольжения 0,7 м/с. Материал контртела – сталь 45 (HB-500, шероховатость $R = 0,4$ мкм).

Проведенные исследования позволяют выявить достоинства данной схемы трения с переменной площадью контакта и данную схему можно рекомендовать для оценки противоизносных и антифрикционных свойств различных материалов.

На втором этапе работы исследовали влияние загустителя, так как сама система вода – предельный одноатомный спирт не обладает достаточно высокими вязкостными и вязкостно-температурными свойствами. В экспериментальных исследованиях использовались композиции с концентрацией загустителя в виде глицерина от 30 до 80% масс. и систему вода – изопропанол с массовыми концентрациями в соотношении от 45 до 55% масс. Для оценки антифрикционных и противоизносных свойств трехкомпонентных растворов была разработана методика на базе модернизированной машины СМЦ-2 (рисунок 1).

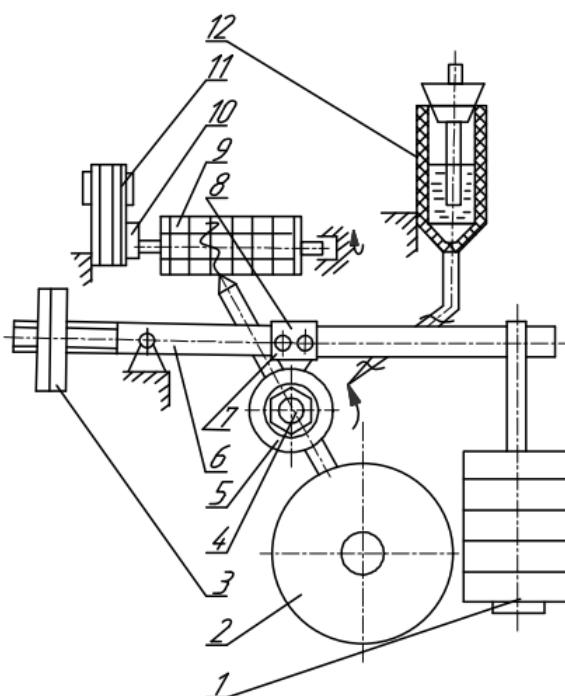


Рисунок 1 – Схема узла трения машины СМЦ-2:
 1 – калиброванные гири; 2 – регулятор грузов;
 3 – противовес; 4 – вал; 5 – контргирило;
 6 – нагрузочный рычаг; 7 – образец;
 8 – самоустанавливающаяся державка образца;
 9 – барабан; 10 – редуктор; 11 – двигатель;
 12 – капельница постоянного расхода

Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Friction unit diagram of the “Machine for testing materials for friction and wear”
 1 – calibrated weights; 2 – weight regulator;
 3 – counterweight; 4 – shaft; 5 – counterweight;
 6 – loading lever; 7 – sample;
 8 – self-aligning sample holder;
 9 – drum; 10 – gearbox; 11 – engine;
 12 – constant flow dripper.

Source: compiled by the authors.

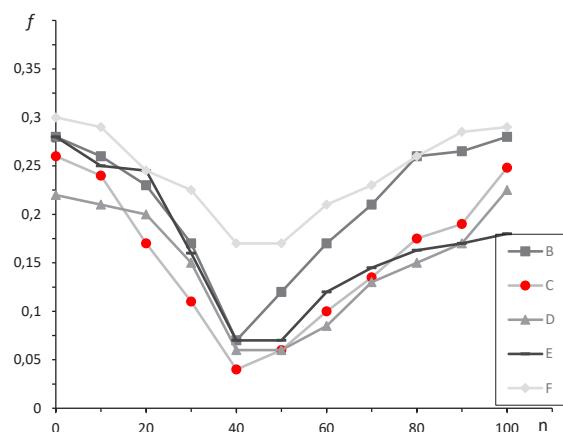


Рисунок 2 – Влияние концентрации водных растворов предельных одноатомных спиртов на коэффициент трения, где F – метанол; E – этиanol; D – пропанол; С – изопропанол; В – бутанол

Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Concentration influence of water solutions of saturated monohydric alcohols on the friction coefficient, where: F – methanol; E – ethanol; D – propanol; C – isopropanol; B – butanol.

Source: compiled by the authors.

Измерялись 3 параметра – интенсивность линейного изнашивания, величина коэффициента трения и температуры на выходе смазочной жидкости из зоны трения. Добавляли глицерин 35–65% масс. и смесь изопропанола с водой в соотношении 40–45% масс. и сравнивали с авиационным гидравлическим маслом АМГ-10, гидравлическим маслом СТЕОЛ-М и водно-глицериновым раствором.

Интенсивность линейного изнашивания определялась по формуле

$$l_h = \frac{\Delta h}{\Delta S}, \quad (2)$$

где Δh – величина изнашивания, ΔS – путь.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость коэффициента трения от концентрации от водных растворов предельных одноатомных спиртов показана на рисунке 2.

Результаты показывают, что коэффициент трения при 5% масс. спирта находится в пределах от 0,23 до 0,3, а при 40–45% масс. уже от 0,05 до 0,06 и вновь возрастает при дальнейшем увеличении его концентрации. При малых и больших концентрациях спирта – область граничной смазки, при 40–45% масс. явно выраженная область жидкостного трения. Изменение динамической вязкости растворов спиртов от концентрации изменяется по той же зависимости, что можно объяс-

нить добавлением не электролита и изменением структуры воды. Максимальная вязкость растворов соответствует минимальной интенсивности изнашивания и коэффициента трения. Результаты дают основание считать, что в данных условиях испытания увеличение концентрации растворов исследуемых спиртов повышает их вязкость, увеличивает долю гидродинамической смазки при трении, обеспечивая снижение износа и коэффициента трения от безразмерного параметра λ по диаграмме Герси-Штрибека.

$$l_h = \frac{\Delta h}{\Delta S}, \quad (3)$$

где μ – вязкость, ω – скорость вращения, P_{cp} – средняя нагрузка.

Такие углеводороды могут попадать в пустоты или кольцевые каналы пространственного каркаса воды и упрочнять этот каркас, т.е. стабилизировать структуру воды. Максимальное заполнение пустот молекулами спирта представляет собой эффект максимальной стабилизации структуры воды, при которой

резко меняются объемные и другие свойства раствора. При этом получаются структуры, обладающие уникальными свойствами.

Объяснить такое поведение спиртовых растворов только изменением вязкости не представляется возможным. Спирты относятся к группе дипольных соединений, они способны адсорбироваться на металле и снижать его свободную поверхностную энергию, уменьшая тем самым работу деформации твердого тела при трении. С увеличением концентрации спирта увеличивается степень адсорбционного пластифицирования поверхностей трения. Продукты механодеструкции спирта образуют на поверхности трения пленки с низким сопротивлением сдвигу. Рентгеноструктурный анализ в среде 45% раствора изопропилового спирта показал наличие на поверхности металла (трения) тончайший пленки окиси железа $z\text{-Fe}_2\text{O}_3$, которая по литературным данным обладает весьма высокими противозадирными свойствами.

Результаты исследований второго этапа приведены в таблице.

Таблица
Сравнительные смазочные характеристики водно-спирто-глицериновых композиций и масел при нагрузке 200 Н
Источник: составлено авторами.

Table
Comparative lubricating characteristics of water-alcohol-glycerin compositions and oils under the load of 200 N, where:
 I_h –intensiveness of the linear wear;
 f_h - friction coefficient at the beginning of the test;
 f_k - friction coefficient at the end of the test;
 $\Delta T, ^\circ\text{C}$ – temperature change during the experiment.
Source: compiled by the authors.

Композиция	I_h	f_h	f_k	$\Delta T, ^\circ\text{C}$
Масло АМГ-10	3,76	0,13	0,11	68
Стеол М	6,8	0,14	0,05	38
Водно-глицериновая смесь	9,3	0,17	0,07	40
Предлагаемые композиции:				
Композиция № 1	6,2	0,12	0,03	36
Композиция № 2	5,0	0,10	0,02	34
Композиция № 3	6,1	0,12	0,04	39
Композиция № 4	7,2	0,16	0,04	30
Композиция № 5	3,12	0,08	0,01	30

где I_h – интенсивность линейного изнашивания; f_h – коэффициент трения в начале испытания; f_k – коэффициент трения в конце испытания; $\Delta T, ^\circ\text{C}$ – изменение температуры в ходе эксперимента.

Введение в изопропиловую смесь с водой глицерина позволило повысить антифрикционные и противоизносные свойства смазочных жидкостей, что объясняется объемными и поверхностными свойствами водно-спиртовой жидкости. Введение в оптимальном соотношении воды, спирта и глицерина существенно повысили смазочные свойства жидкости. Эта система превзошла все сравниваемые виды смазок и даже систему этанол–вода–глицерин, известную под маркой СТЕНОЛ-М¹. Полученная композиция не только не уступает минеральным гидравлическим маслам, но и значительно превосходит их, имея при этом гораздо меньшее число компонентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хорошая растворимость в воде делает указанные композиции особенно применимыми в закрытых узлах трения на автотранспорте, текстильных, пищевых и химических отраслях промышленности.

Полная нетоксичность композиции позволяет использовать жидкость сливать в канализацию, не вызывая загрязнения окружающей среды.

Найдена область эффективных концентраций в воде предельных одноатомных спиртов, в которой резко уменьшается интенсивность изнашивания и коэффициент трения.

Установлено, что значение концентраций спиртов при максимуме антифрикционных и противоизносных свойств совпадают с концентрациями, отвечающими эффекту максимальной стабилизации структуры воды добавками соответствующего спирта.

Найдено оптимальное соотношение предельного одноатомного спирта и воды в тройных системах «вода–спирт–многоатомный спирт».

Разработаны новые смазочные композиции с добавлением загустителя в виде глицерина.

Доказано, что полученные водные композиции не уступают минеральным маслам, а по некоторым показателям превосходят их, имея при этом менее сложный состав.

Данные смазочные композиции разрабатываются для замены индустриальных и трансмиссионных масел, которые используются в закрытых редукторах трансмиссии автомобильной техники, строительных и дорожных машин и других транспортно-технологических

комплексов. К таким редукторам можно отнести механические ступенчатые и планетарные коробки перемены передач, червячные редукторы типа Ч-100, червячные мотор-редукторы, цилиндрические редукторы типа 1Ц2У-100, РМ-250.

Следующим этапом исследования новых смазочных композиций будут стендовые и эксплуатационные испытания на реальных механизмах трансмиссии транспортно-технологических машин.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Чооду О.А., Монгуш Э.С. Влияние климатических факторов на эксплуатационные показатели дорожно-строительных машин // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. 2013. № 3(18). С. 107–116.
- Трофименко Б.П., Маркелов А.В., Корытов А.С. Анализ причин низкой эксплуатационной надежности строительных и дорожных машин // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2024. № 28. С. 66–71. DOI 10.26160/2658-3305-2024-28-66-71
- Трофименко Б.П., Маркелов А.В. Совершенствование технической эксплуатации подвижного состава путем применения новых синтетических смазочных композиций // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2024. № 1. С. 57–64.
- Зарубин В.П., Киселев В.В., Пучков П.В. [и др.] Улучшение эксплуатационных характеристик автотранспортной техники за счет применения высокоеффективных присадок // Известия МГТУ МАМИ. 2014. Т. 3, № 1(19). С. 56–62.
- Nadine S., Raddatz K., Tobie T. [and others]. Investigations on the Scuffing and Wear Characteristic Performance of an Oil Free Water-Based Lubricant for Gear Applications // Text: electronic // Lubricants. 2021. V. 9 (3). P. 24. DOI:10.3390/lubricants9030024
- Ponnekanti N., Savita K. Development of ecofriendly/biodegradable lubricants: An overview // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. V. 16 (1). pp. 764–774. DOI: 10.1016/j.rser.2011.09.002
- Тракторные масла, трансмиссионные масла для внедорожной техники // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2010. № 4. С. 22. URL: <https://rucont.ru/efd/178364>
- Маньшев Д.А., Селезнев М.В. Результаты оценки показателей качества трансмиссионного масла при эксплуатации // Вестник НГИЭИ. 2018. № 7(86). С. 49–58.
- Колесниченко Д.С., Корчагин Р.К., Соболь Д.А. Снижение стоимости владения техникой за счет применения высококачественных смазочных материалов // Горная промышленность. 2016. № 4(128). С. 38.

¹ ГОСТ 5020–75. Жидкость «Стеол-М». Технические условия: дата введения 01.01.77 / Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР. Изд. официальное. М.: Издательство стандартов, 1984. С. 1–18.

10. Trajkovski A., Novak N., Pustavrh J. [and others]. Performance of Polymer Composites Lubricated with Glycerol and Water as Green Lubricants // *Applied sciences*. 2023. V. 13 (13). P. 7413. DOI:10.3390/app13137413
11. Senatore A., Pisaturo M., Guida D. Polyalkylene Glycol Based Lubricants and Tribological Behaviour: Role of Ionic Liquids and Graphene Oxide as Additives // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2018. V.18 (2). pp. 913-924. DOI:10.1166/jnn.2018.15253
12. Holmberg K., Erdemir A. Influence of Tribology on Global Energy Consumption, Costs and Emissions // *Friction*, 5, 2017. 263–284, URL: <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>
13. Luo J., Zhou X. Superlubricitive Engineering—Future Industry Nearly Getting Rid of Wear and Frictional Energy Consumption // *Friction*, 8, 2020. 643–665. <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0393-0>
14. Rahman M. H., Warneke H., Webbert H. [and others] Water-Based Lubricants: Development, Properties, and Performances // *Lubricants*. 2021. 9(8), URL: <https://doi.org/10.3390/lubricants9080073>
15. Freschi M., Paniz A., Cerqueni E. [and others] The Twelve Principles of Green Tribology: Studies, Research, and Case Studies—A Brief Anthology // *Lubricants*. 2022. 10(6), URL: <https://doi.org/10.3390/lubricants10060129>
16. Li L. [and others]. Impact of Water Content on the Superlubricity of Ethylene Glycol Solutions. Text: electronic // *Lubricants* 2023. 11(11). URL: <https://doi.org/10.3390/lubricants11110466>
17. Hua J. [and others]. Controllable Superlubricity Achieved with Mixtures of Green Ionic Liquid and Glycerol Aqueous Solution via Humidity Text: electronic // *J. Mol. Liq.*, 2022. 345. 117860, URL: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117860>
18. Монахова Ю.Б., Муштакова С.П. Квантовохимическое изучение системы вода – одноатомные спирты // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2006. Т. 6, № 1-2. С. 14–18.
19. Ефремов Л.В., Тикалов А.В. Измерение износов деталей машин в полевых условиях на основе метода искусственных баз // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 3. С. 237–242.

REFERENCES

1. Choodu O.A., Mongush E.S. Influence of climatic factors on the performance of road construction machines. *Bulletin of the Tuva State University*. No. 3 Technical, physical and mathematical sciences. 2013; 3 (18): 107-116.
2. Trofimenco B.P., Markelov A.V., Korytov A.S. Analysis of the causes of low operational reliability of construction and road machines. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2024. 28: 66-71. (In Russ.). DOI: 10.26160/2658-3305-2024-28-66-71
3. Trofimenco B.P., Markelov A.V. Improving the technical operation of rolling stock through the use of new synthetic lubricant compositions. *Problems of mechanical engineering and machine reliability*. 2024; (1): 57-64. (In Russ.).
4. Zarubin V.P., Kiselev V.V., Puchkov P.V. [and others] Improving the performance characteristics of motor vehicles through the use of highly effective additives. *Bulletin of Moscow State Technical University MAMI*. 2014. Vol. 3; 1(19): 56-62. (In Russ.).
5. Nadine S., Raddatz K., Tobie T. [and others] Investigations on the Scuffing and Wear Characteristic Performance of an Oil Free Water-Based Lubricant for Gear Applications. Text: electronic . *Lubricants*. 2021; 9 (3). R. 24. DOI:10.3390/lubricants9030024
6. Ponnekanti N., Savita K. Development of ecofriendly/biodegradable lubricants: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012; 16 (1): 764-774. DOI: 10.1016/j.rser.2011.09.002
7. Tractor oils, transmission oils for off-road equipment. *World of oil products. Bulletin of oil companies*. 2010; (4). P. 22. URL: <https://rucont.ru/efd/178364> (date of access: 18.07.2025). (In Russ.).
8. Manshev D.A., Seleznev M.V. Results of evaluation of quality indicators of transmission oil during operation. *Bulletin of NGEI*. 2018; 7(86): 49-58. (In Russ.).
9. Kolesnichenko D.S., Korchagin R.K., Sobol D.A. Reducing the cost of equipment ownership through the use of high-quality lubricants. *Mining industry*. 2016; 4(128): 38. (In Russ.).
10. Trajkovski A., Novak N., Pustavrh J. [and others]. Performance of Polymer Composites Lubricated with Glycerol and Water as Green Lubricants. *Applied sciences*. 2023; 13 (13): 7413. DOI:10.3390/app13137413
11. Senatore A., Pisaturo M., Guida D. Polyalkylene Glycol Based Lubricants and Tribological Behavior: Role of Ionic Liquids and Graphene Oxide as Additives. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2018; .18 (2): 913-924. DOI:10.1166/jnn.2018.15253
12. Holmberg K., Erdemir A. Influence of Tribology on Global Energy Consumption, Costs and Emissions. *Friction*, 5, 2017; 263–284, URL: <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5> (accessed 14.06.2025).
13. Luo J., Zhou X. Superlubricitive Engineering—Future Industry Nearly Getting Rid of Wear and Frictional Energy Consumption. *Friction*, 8. 2020; 643–665. <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0393-0>
14. Rahman M. H., Warneke H., Webbert H. [and others]. Water-Based Lubricants: Development, Properties, and Performances. *Lubricants*, 9(8). 2021. URL: <https://doi.org/10.3390/lubricants9080073> (accessed May 17, 2025).
15. Freschi M., Paniz A., Cerqueni E. [and others]. The Twelve Principles of Green Tribology: Studies, Research, and Case Studies—A Brief Anthology. *Lubricants*, 10(6). 2022. URL: <https://doi.org/10.3390/lubricants10060129>
16. Li L. [and others]. Impact of Water Content on the Superlubricity of Ethylene Glycol Solutions – Text: electronic . *Lubricants*, 11(11).2023. URL: <https://doi.org/10.3390/lubricants11110466>
17. Hua J. [and others]. Controllable Superlubricity Achieved with Mixtures of Green Ionic Liquid and Glycerol Aqueous Solution via Humidity – Text: elec-

tronic. *J. Mol. Liq.*, 2022; 345: 117860, URL: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117860>

18. Monakhova Yu. B., Mushtakova S. P. Quantum-chemical study of the water - monohydric alcohols system. *Bulletin of the Saratov University. New series. Series: Chemistry. Biology. Ecology.* 2006; 6, No. 1(2): 14-18. (In Russ.).

19. Efremov L. V., Tikalov A.V. Measurement of wear of machine parts in the field based on the method of artificial bases. *Izv. vuzov. Instrument engineering.* 2016; 59 (3): 237-242. (In Russ.).

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Трофименко Б.П. Обзор и анализ публикаций по заявленной тематике. Подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных, подготовка материала статьи.

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

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

Осадчий Ю.П. Научное консультирование проводимого исследования, включая корректирование формулировки проблемы и поставленных задач, формирование общей схемы проведения и выбор методов исследования, проведение экспериментальных исследований, подготовка отдельных материалов для статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Trofimenko Bogdan P. Review and analysis of the publications on the research issue. Coordinating and conducting the experimental studies, obtained data processing, preparation of the article material.

Markelov Aleksandr V. Organization of the author's team work, direction and research problem development, setting the objectives and choosing the study methods, editing of the article material.

Korytov Aleksey S. Planning and running the experimental studies, handling of the obtained results, working out individual materials for the article.

Osadchiy Yuryi P. Scientific consulting for ongoing research, including problem and task setting correction, generating a core scheme for the study, research methods' selection, conducting experiments, providing individual materials for the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Трофименко Богдан Павлович – аспирант кафедры «Инфраструктура и транспорт» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2487-9400>,
e-mail: bog6741@yandex.ru

Маркелов Александр Владимирович – д-р техн. наук, доц. кафедры «Инфраструктура и транспорт» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7125-6570>,

SPIN-код: 4362-4110,

Author ID (РИНЦ): 223288,

e-mail: alexander203.37@mail.ru

Корытов Алексей Сергеевич – магистр кафедры «Инфраструктура и транспорт» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9147-2785>,

e-mail: a.s.k.2001@mail.ru

Осадчий Юрий Павлович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Транспорт и автомобильные дороги» Ивановского государственного политехнического университета (153000, г. Иваново, Шереметьевский пр., д. 21).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2279-0990>,

SPIN-код: 3065-5370,

Author ID (РИНЦ): 401366,

e-mail: osadchiy-y@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Trofimenko Bogdan P. – Postgraduate Student, Infrastructure and Transport Department, Yaroslavl State Technical University (88, Moskow Avenue, Yaroslavl, 150023).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2487-9400>,

e-mail: bog6741@yandex.ru

Markelov Aleksandr V. – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Infrastructure and Transport Department, Yaroslavl State Technical University (88, Moskow Avenue, Yaroslavl, 150023).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7125-6570>,

SPIN-code: 4362-4110,

Author ID (RINTS): 223288,

e-mail: alexander203.37@mail.ru

Korytov Aleksey S. – Master of Science, Infrastructure and Transport Department, Yaroslavl State Technical University (88, Moskow Avenue, Yaroslavl, 150023).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9147-2785>,

e-mail: a.s.k.2001@mail.ru

Osadchiy Yuryi P. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Transport and Highways Department, Ivanovo State Polytechnic University (21, Sheremetevsk Avenue, Ivanovo, 153000).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2279-0990>,

SPIN-код: 3065-5370,

Author ID (RINTS): 401366,

e-mail: osadchiy-y@mail.ru

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

Научная статья

УДК 656.138, 368.212

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-760-771>

EDN: PBYTVD



Check for updates

МЕТОДЫ ТЕОРИИ ТРАНСПОРТНЫХ МАКРОСИСТЕМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ДЛЯ АВТОСТРАХОВАНИЯ

И.Е. Агуреев, С.А. Бурага

Тульский государственный университет,
г. Тула, Россия ответственный автор
buraga.sergey@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье представлены методы теории транспортных макросистем для повышения уровня технической готовности автомобильного транспорта после ДТП. Определены проблемы, приводящие к снижению эффективности транспортных систем при нахождении в ремонте за счет страховых компаний. Приведена математическая модель, в наиболее общем случае описывающая транспортную систему, состоящую из элементов – автомобилей, занимающих одно из множества состояний в СТОА. Описаны свойства элементов, находящихся в рассматриваемом объекте исследования.

Материалы и методы. В работе применяется теория транспортных макросистем, которая вытекает из известной научной дисциплины – теории макросистем. Среди ее задач имеются постановки о распределении элементов по подмножествам состояний и задачи о равновесии системы в целом. В макроскопических системах по определению стохастическое поведение большого числа элементов преобразуется в детерминированное поведение системы в целом. Макросистема является динамическим преобразователем хаотического поведения элементов в некоторое множество параметров поведения (фазовых переменных), образующих пространство небольшой размерности. Поэтому в рамках теории макросистем используются базовые понятия максимизации энтропии при равновесных состояниях системы. При этом функция распределения макросостояний выбирается в зависимости от способа заполнения элементами некоторых состояний из соответствующих подмножеств; необходимые значения априорных вероятностей и доказательства параметрических свойств моделей макросистем с различными статистиками (Ферми-, Эйнштейн- и Больцман-распределения). Даётся описание объекта исследования – транспортной системы, состоящей из автомобилей, требующих ремонта на основе выполнения обязательств со стороны страховых компаний.

Результаты. В работе представлены результаты расчетов, показывающие характер зависимостей между ёмкостями множества состояний, априорными вероятностями и количеством автомобилей, находящихся на ремонте в СТОА в рамках теории транспортных макросистем. Установлены распределения автомобилей, соответствующие равновесным состояниям при выбранных исходных данных.

Обсуждение и заключение. В рамках работы решены следующие задачи: доказана возможность исследования с применением методов теории транспортных макросистем для решения задач поиска равновесия в системах автомобильного транспорта после ДТП. Определены проблемы взаимодействия СТОА и Страховщика в области организации и согласовании стоимости восстановительного ремонта поврежденных автомобилей. Предложены подходы к организации взаимодействия СТОА и Страховщика в области проведения ремонта поврежденных автомобилей по автострахованию, основанные на возможностях математического моделирования при обосновании методик.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: транспортная макросистема, равновесие в транспортной системе, коэффициент технической готовности, автострахование, станция технического обслуживания

БЛАГОДАРНОСТИ: коллектив авторов выражает благодарность анонимным рецензентам и благодарит редакцию журнала за обработку статьи и возможность её опубликования.

Статья поступила в редакцию 17.03.2025; одобрена после рецензирования 03.09.2025; принята к публикации 21.10.2025.

© Агуреев И.Е., Бурага С.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

*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: Агуриев И.Е., Бурага С.А. Методы теории транспортных макросистем для решения задач динамики массового обслуживания для автострахования // Вестник СиБАДИ. 2025. Т. 22, № 5. С. 760-771. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-760-771>

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-760-771>
EDN: PBYTVD

METHODS OF THE THEORY OF TRANSPORT MACROSYSTEMS FOR MASS SERVICE DYNAMICS AND AUTO INSURANCE

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

ABSTRACT

Introduction. The article presents methods of the theory of transport macrosystems for increasing the level of technical readiness of motor transport after an accident. The problems leading to a decrease in the efficiency of transport systems during repairs at the expense of insurance companies have been identified. A mathematical model is given to describe a transport system consisting of elements – vehicles and their numerous states at the service station. The properties of the elements under the study have been described.

Methods and materials. The theory of transport macrosystems has been used, which is based on the theory of macrosystems, a well-known scientific theory. Among its tasks there are statements about the distribution of elements into subsets of states and problems of the equilibrium of the entire system. In macroscopic systems, by definition, the stochastic behavior of a large number of elements is transformed into the deterministic behavior of the system. A macrosystem is a dynamic converter of the chaotic behavior of elements into a set of behavior parameters (phase variables) forming a small-dimensional space. Therefore, within the framework of the theory of macrosystems, the basic concepts of maximizing entropy at equilibrium states of the system are used. In this case, the macrostate distribution function is selected depending on the method of filling elements of some states from the corresponding subsets; the necessary values of a priori probabilities and evidence of parametric properties of models of macrosystems with various statistics (Fermi, Einstein and Boltzmann distributions). The description of the research object is given, which is a transport system consisting of vehicles that require repair based on the fulfillment of obligations by insurance companies.

Results. The paper presents the results of calculations which have demonstrated the nature of the dependencies between the capacities of multiple states, a priori probabilities and the number of cars under repair at the service station within the framework of the theory of transport macrosystems. The distributions of vehicles corresponding to the equilibrium states with the selected initial data are established.

Discussion and conclusion. Within the framework of this investigation, the following tasks have been solved: the possibility of research based on the methods of the transport macrosystems theory to solve the problems of finding equilibrium in road transport systems after an accident has been proved; some problems have been identified in interaction between the service station and the Insurer in approving the cost of repair for damaged vehicles. Some approaches to provide interaction between the service station and the Insurer in the field of repair of damaged vehicles for auto insurance based on the possibilities of mathematical modeling in substantiating the methods have been proposed.

KEYWORDS: transport macrosystem, equilibrium in the transport system, coefficient of technical readiness, auto insurance

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors would like to thank the anonymous reviewers and the editorial council of The Russian Automobile and Highway Industry Journal.

© Agureev Igor E., Buraga Sergey A., 2025



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

The article was submitted: March 17, 2025; approved after reviewing: September 03, 2025; accepted for publication: October 21, 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: Agureev I.E., Buraga S.A. Methods of the theory of transport macrosystems for mass service dynamics and auto insurance. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2025; 22 (5): 760-771. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-760-771>

ВВЕДЕНИЕ

В функционировании городских наземных транспортных систем большое значение имеют бизнес-процессы, связанные с управлением технической готовностью автомобильного транспорта, в том числе при решении этой задачи за счет взаимодействия со страховщиками. Основная цель, которая интересует в данной работе, заключается в том, чтобы исследовать влияние указанных процессов на эффективность работы непосредственно транспортной системы. Существующая проблема заключается в том, что ремонт автомобилей за счет страховых выплат сопровождается временными затратами, которые снижают коэффициент технической готовности автомобиля и в итоге коэффициент использования автомобиля. Для того чтобы цель исследования была достигнута, разработаны задачи, которые необходимо решить для этого. Среди задач выделяется краткий обзор публикаций по теме исследования, описание системы – объекта исследования, выбор теории, на базе которой строится математическая модель, выполнение расчетов и разработка предложений по совершенствованию работы транспортной системы. В данной публикации мы демонстрируем работоспособность математической модели и планируем дальнейшую работу.

Систему взаимодействия можно представить как треугольник со сторонами: Клиент, Страховщик, станция технического обслуживания автомобилей (СТОА). Функционирование данной системы направлено на организацию и проведение восстановительного ремонта автомобилей.

Функционирование всех из перечисленных подсистем даже на предварительном этапе анализа представляется крайне сложным процессом. По нашему мнению, эта сложность возникает по следующим причинам:

- 1) изменения в области страхового законодательства;
- 2) неустойчивость экономической ситуации;
- 3) рост автомобильного парка;
- 4) случайный характер возникновения страховых случаев;

5) нераскрыта взаимосвязь между характеристиками подсистем, вовлеченных в указанное выше взаимодействие.

Работа [1] имеет существенное значение для тематики нашего исследования, так как в ней приводится подход к учету работы страховой компании, по сути, в нестационарных условиях. Это очень важно и в отношении страховых компаний, работающих в сфере автострахования, так как в ней заметна конкуренция, имеются некоторые риски для превышения прогнозного уровня убыточности, связанные со случайными колебаниями количества дорожно-транспортных происшествий (ДТП), непредвиденными природными катаклизмами, усложнением общей дорожно-транспортной ситуации и др. Таким образом, при моделировании выбранного объекта исследования естественно требуется учитывать динамический характер работы страховых компаний, заключающийся в том, что последняя все время может изменять число заключенных договоров и корректировать тарифную ставку. Все это нацелено на то, чтобы получать требуемый уровень доходности компании и не допускать в то же время невыполнение обязательств по урегулированию страховых случаев для владельцев автомобилей.

Отдельные работы посвящены моделированию страховой компании как системы массового обслуживания [2]. При этом входящие потоки событий – это заявки на выплату страховых сумм. Разработанные здесь модели содержат характеристики потоков событий – моментов поступления страховых премий и страховых выплат, которые в целом определяют динамику финансового состояния страховой компании. При таком подходе необходимо, конечно же, иметь хотя бы оценочные данные об интенсивностях этих потоков событий. Для наших задач важно, что рассматриваемая в целом система (макроскопическая транспортная система, имеющая на выходе некоторый поток заявок на обслуживание в страховой компании и затем – в сервисные организации по ремонту автомобилей) имеет вероятностный характер функционирования,

но, что еще более важно, она создает поток заявок на ремонт с определенными правилами заполнения свободных мест в сервисных организациях. Если рассмотреть предельный случай – равновесие в такой системе, то поиск равновесного состояния представляет собой важный с практической и теоретической стороны вопрос.

Часть работ [3, 4] касается проблем управления деятельностью станций технического обслуживания автомобилей. Нами были выбраны и рассмотрены те публикации, которые так или иначе связаны с процессами принятия решений при ремонте, снабжении запасными частями, новыми технологиями, ускоряющими деятельность таких компаний в целом. Это важно с точки зрения того, каким образом следует разрабатывать методики, сокращающие длительность пребывания заявок в ремонте. Такие методики должны ориентироваться как на стохастичность потоков заявок, так и на инновационные технологии, снижающие возникающие от этого риски. Другая часть работ [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11] посвящена вопросам проектирования и оптимизации СТОА с помощью современных информационных технологий, что приводит к росту привлекательности конкретных СТОА, например, в работе [5] рассматривается проектирование клиентской зоны, а в статье [6] используются BIM-технологии при проектировании СТОА. В целом работы авторов [5, 6] направлены на повышение эффективности использования помещений СТОА и общей привлекательности предприятия. Процессы имитационного моделирования являются важной компонентой при проектировании технического обслуживания, на что указывает и ряд зарубежных исследований [8, 9, 10, 11].

Другой частью рассматриваемой в настоящей работе системы является страховая компания, которая взаимодействует как с клиентом, так и со СТОА. Следует указать, что процессы, происходящие в страховом бизнесе, напрямую влияют на восстановление автомобилей после ДТП. Поэтому было важно рассмотреть некоторые особенности динамики страховых компаний, особенно действующих в области автострахования. В целом результаты демонстрируют [12], что работа страховщиков происходит в достаточно сложной системе, которая требует учета самых различных факторов, порой трудно формализуемых и имеющих чаще всего экспертное решение. Тем не менее основной вывод, который мы могли бы сделать уже сейчас, заключается в том, что процессы возникновения заявок на

ремонт и процессы обслуживания заявок – основные источники стохастичности, которые должны учитываться в достаточной степени, чтобы сокращать потери времени в ремонте автомобилей для транспортных систем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В этом разделе дается описание объекта исследования – транспортной системы, состоящей из автомобилей, требующих ремонта на основе выполнения обязательств со стороны страховых компаний. Учитывая, что в каждом регионе имеется большое число участников таких систем, взаимодействующих с целыми группами страховых компаний (Страховщиков) и станций технического обслуживания, транспортная система вместе с указанными операторами организации и выполнения восстановительного ремонта автомобилей может рассматриваться нами как макроскопическая, которая должна изучаться соответствующими методами теории макросистем [13]. Это дает возможность находить равновесия транспортной макросистемы, в которых учитывается взаимосвязанный характер процессов поступления автомобилей в ремонт. Такие процессы зависят от ряда количественных параметров, определяющих результат достижения равновесия макросистемы, например, от «емкости» обслуживающих систем, наличия достаточно-го числа мест для ожидания в очереди, качества обслуживания и интенсивности выполнения операций. В теории макросистем принято использовать энтропийные методы расчета равновесий, зависящих, таким образом, от емкостей состояний, априорных вероятностей заполнения состояний элементами, а также от величины удельных расходов ресурсов в макросистеме. Ниже мы более детально опишем эти понятия.

При этом с практической точки зрения необходимо учитывать ряд существующих проблем, на устранение которых должны быть направлены теоретические исследования:

- длительные сроки ремонта автомобиля;
- низкое качество проведенных ремонтных работ (нередко под давлением Страховщика, для экономии средств последнего);
- отказ СТОА выдать отремонтированный автомобиль собственнику (законному представителю собственника) в связи с отсутствием оплаты ремонта Страховщиком;
- отказ СТОА в приемке автомобиля в ремонт по выданному Страховщиком направлению в ремонт из-за финансовых или каких-либо иных разногласий со Страховщиком.

Не редки случаи отказа в ремонте автомобиля даже после приемки последнего в связи с теми же разногласиями со Страховщиком.

Указанные и другие подобные им проблемы приводят в результате к существенному снижению эффективности транспортных систем за счет уменьшения коэффициента технической готовности. Таким образом, требуется математическая модель транспортной системы, которая должна отражать процессы поступления автомобилей на СТОА в зависимости от качества ремонтных работ в СТОА и интенсивности их выполнения. Для достижения цели настоящей статьи необходимо выявить закономерности, которые позволяют количественно оценить последствия внедрения мероприятий, направленных на уменьшение влияния перечисленных проблем.

Необходимо дать краткую характеристику основных подходов теории макросистем: множество элементов (автомобилей), множество состояний системы, их рабочих мест и ресурсов (те же автомобили, но «привязанные» к страховой компании (СК)), для того чтобы на этой основе представить математическую модель объекта исследования. Динамика системы заключается в том, что элементы заполняют имеющиеся в системе состояния из некоторого множества, при этом соблюдаются те или иные правила, которые соответствуют типу системы. Так, Ю.С. Попков¹ выделяет четыре основных типа макросистем: Е-, В-, F- и Р-системы. Для Е-системы (Эйнштейн-система) имеется возможность нахождения неограниченного числа элементов в одном и том же состоянии. Примером может служить число автомобилей, находящихся в одном и том же перегоне дорожной магистрали, или число пассажиров, перемещающихся в одном составе метропоезда и т.п. Для В-системы считается, что в одном и том же состоянии может находиться небольшое число элементов. Так, Больцман-системой можно представить очередь к колонке автозаправки или число пассажиров, находящихся на остановке при отсутствии пиковых потоков. В случае Ферми-системы в каждом состоянии может находиться только один элемент. Таких случаев в транспортных системах много там, где для каждого элемента четко выделено его возможное положение: парковочные места, места для сидения пассажиров и т.п. Параметрическая система (Р-система) отличается от по-

следней тем, что существует четкий параметр, который задает число элементов, которые могут находиться в одном состоянии. Например, на СТОА может быть несколько мест для ожидания автомобилей в очереди, несколько зон диагностики, технического обслуживания и т.п. Таким образом, нам необходимо определить, какой вариант макросистемы будет применяться в рассматриваемой системе.

Перечислим элементы, которые имеются в рассматриваемом объекте исследования:

- Автомобили, ожидающие ремонта. Это те поврежденные автомобили, по которым подано заявление Страховщику на организацию и проведение восстановительного ремонта, но направление на ремонт еще не выдано, в связи с проверкой Страховщиком предоставленных документов по страховому событию, имеющему признаки страхового случая.

- Автомобили, находящиеся в процессе ремонта. Это поврежденные автомобили, по которым Страховщик рассмотрел заявление о повреждении автомобиля, признал случай страховым, а также выдал направление на ремонт на СТОА. В этом случае СТОА может еще не приступить к ремонтным работам, но принять автомобиль по направлению от Страховщика, начать составлять смету стоимости восстановительного ремонта для направления её на согласование Страховщику. Автомобили занимают места для ожидания в очереди, для ремонта (по отдельным его операциям). Ситуация напоминает работу многофазной системы массового обслуживания (СМО), но нас в рамках теории макросистем больше интересует равновесное состояние в целом, а не отдельные характеристики СМО.

- Отремонтированные автомобили. Это отремонтированные автомобили, переданные собственнику/представителю собственника и не оплаченные Страховщиком.

Применительно к СТОА этот подход означает, что для каждой фазы (приемка, диагностика, разборка, ремонт, окраска, сборка, выдача автомобиля и др.) предусмотрено некоторое число рабочих мест, каждое из которых может занимать только один автомобиль. На практике часто бывает, что для каждой фазы предусмотрено число рабочих мест $S_i > 1$ и некоторое число мест для ожидания в очереди. Поэтому мы будем пользоваться вариантом Р-системы. Величина параметра r будет задавать это число для каждой фазы.

¹ Попков Ю.С. Теория макросистем. Равновесные модели. 2-е изд. М.: Издательство УРСС, 2013. 320 с.

Постановка задачи теории макросистем (модель). Поскольку мы не имеем возможности получить или рассчитать данные о каждом элементе системы, то динамика макросистемы – это динамика того, как изменяются числа заполнения подмножеств состояний без идентификации этих элементов, считая, что они не отличаются друг от друга. Это основное допущение модели. Применительно к транспортной макросистеме в целом, мы должны отметить, что динамика каждого отдельного элемента в макросистеме уже не определена. Ее нельзя вычислить или выделить. Остается исключительно динамика самой системы, где случайное поведение элементов преобразовано в ее детерминированное поведение. Эта динамика имеет самостоятельное значение, поскольку относится к макроскопическим параметрам. В то же время для описания этой макродинамики важна природа микроскопического поведения, так как именно на этом уровне формируется результат взаимодействия элементов транспортной системы между собой. Все случайные возмущения складываются в соответствующую динамику макроскопического уровня.

На макроуровне динамика представляется изменением чисел заполнения подмножеств состояний; эти числа являются функциями времени. Запишем теперь математическое описание приведенных здесь подходов для случая стационарного состояния, как это описано в работе [14] для Р-системы. Результатом является формулировка модели макросистемы, позволяющей рассчитывать равновесие системы, то есть число автомобилей, распределенных по отдельным подмножествам состояний.

В настоящей статье впервые приведена математическая модель, которая в наиболее общем случае описывает транспортную систему, состоящую из элементов – автомобилей, занимающих одно из множества состояний в СТОА:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\Gamma} = \tilde{\Gamma}(t); \\ \rho = \rho(t); \\ q = q(t); \\ \tau_0 \leq t \leq \tau_0 + \Delta\tau; \Delta\tau = \sum_{k=1}^K \Delta\tau_k; \\ V(t) = \{V_1, \dots, V_\alpha, \dots, V_p : V_\alpha = \sum_{v=1}^{v_f} n_v(t) | v \in r_\alpha\}; \\ v = 1, \dots, v_f(t); \\ \pi_v = \pi_v(t); \\ \Pi(t) = \{\pi_1(t), \dots, \pi_\beta(t), \dots, \pi_{v_f}(t)\}; \\ G(t) = g_v \otimes \Pi(t) \leq G^*; \\ H(V^*(\Delta\tau_k)) = - \sum_{n=1}^m V_n \ln \frac{V_n}{a_n} - (G_n + V_n) \ln (G_n + V_n) \rightarrow \max, \end{array} \right.$$

где k – индекс (номер) интервала времени $\Delta\tau_k$; K – число временных интервалов $\Delta\tau_k$; $\tilde{\Gamma}$ – граф системы, содержащий связи между всеми страховщиками и сервисными организациями; ρ – матрица связей бизнес-процессов; q – матрица соответствующих связей пропускных способностей; t – непрерывное время; $V(t)$ – множество, каждый из элементов которого равен числу автомобилей, находящихся в момент времени t в ремонте α ; V – индекс автомобиля (его уникальный идентификатор); $v_f = N_a$ – наибольший индекс автомобиля, соответствующий количеству автомобилей в текущий момент времени; π_v – уравнение процесса обслуживания для v -го автомобиля, определяющее долю выполненной заявки на обслуживание; $\Pi(t)$ – множество, состоящее из отдельных уравнений процесса обслуживания β – индекс процесса; $G(t)$ – векторная функция расходования ресурса(-ов); g_v – вектор удельных расходов ресурса для каждого автомобиля; H – информационная энтропия транспортной системы; G^* – вектор ограничений на расход ресурсов; a_n – априорные вероятности нахождения элемента в состоянии n ; G_n – емкость состояния n ; n – порядковый номер состояния элементов; m – общее число различных состояний.

Представленная здесь модель транспортной системы оперирует с множеством уравнений процесса обслуживания. Поскольку имеется переменная времени, но на каждом относительно малом интервале времени реализуется гипотеза о равновесии системы, то модель можно отнести к классу квазидинамических. Будем считать, что формулы образуют замкнутую систему уравнений и неравенств с учетом неуказанных здесь вспомогательных соотношений. Тогда соотношения образуют постановку задачи оптимизации процесса обслуживания, если в качестве критерия оптимальности выбрать минимум расходования ресурсов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе были выполнены расчеты с помощью разработанной авторами статьи программ, составленной на основе алгоритмов из книги Ю.С. Попкова [12], которая позволяет рассчитывать равновесие Р-системы. Цель расчета – показать влияние величин, от которых может зависеть равновесие. Эти расчеты послужат затем обоснованием для методик, разработанных с целью повышения коэффициентов технической готовности транспортных систем. Полученные результаты показывают

характер зависимостей между ёмкостями и априорными вероятностями и количеством автомобилей, находящихся на ремонте в СТОА (результатом). Ниже используются следующие обозначения:

a – априорная вероятность. Априорная вероятность есть оценка исследователя того, что изучаемое событие произойдет (элемент займет некоторое состояние из известного подмножества), основанная на теоретической точке зрения или на основе ранее проведённых наблюдений;

R – количество одновременно находящихся автомобилей в каждой конкретной фазе (приемка, дефектовка, кузовной ремонт и т.д.).

Ёмкости СТОА показывают, какое максимальное количество автомобилей одновременно может обслуживать СТО.

Ресурсы показывают количество поступающих в ремонт автомобилей от страховых компаний.

Показатели, которые различны в разных группах СТОА: станции были ранжированы в четырех категориях в зависимости от размера СТОА, ее специализации и степени партнерских отношений со страховой компанией. Каждой группе СТОА присвоено свои значения показателей и сведены в таблицу.

Таблица
Категории СТОА
Источник: составлено авторами.

Table
STOA categories
Source: compiled by the authors.

Категория СТОА	Количество СТОА	Характеристики СТОА	Распределение потока автомобилей по СТОА	Комментарий
1	3	СТОА официального дилера	30% от общего числа. Направляются на ремонт гарантийные и негарантийные ТС	Все страховые компании работают (направляют на ремонт) в эти СТОА, взамен официальный дилер заключает договора страхования (как агент) на проданные автомобили
2	3	СТОА, не являющиеся официальным дилером и специализирующиеся на кузовном ремонте	30 % от общего числа. Направляются на ремонт как гарантийные, так и негарантийные автомобили, т.к. цены ниже, чем у официальных дилеров	Все страховые компании работают (направляют на ремонт) в эти СТОА, т.к. цены в них ниже, чем у официального дилера
3	9	СТОА, не являющиеся официальным дилером и выполняющие любые работы	30% от общего числа. В основном постгарантийные автомобили. Цены на ремонт равняются 2-й категории или ниже	Большинство страховых компаний работают с данными СТОА, т.к. цены на уровне СТОА 2-й категории или ниже (как правило, выполняют ремонт средней или легкой сложности)
4	5	СТОА, не являющиеся официальным дилером и выполняющие любые работы (небольшие СТОА)	10% от общего числа. Постгарантийные автомобили, преимущественно с ремонтом легкой сложности. Цены на ремонт равняются категории 3 или ниже	Страховые компании со СТОА данной категории работают по «остаточному принципу», цены на уровне СТОА 3-й категории или ниже. Ремонт легкой сложности

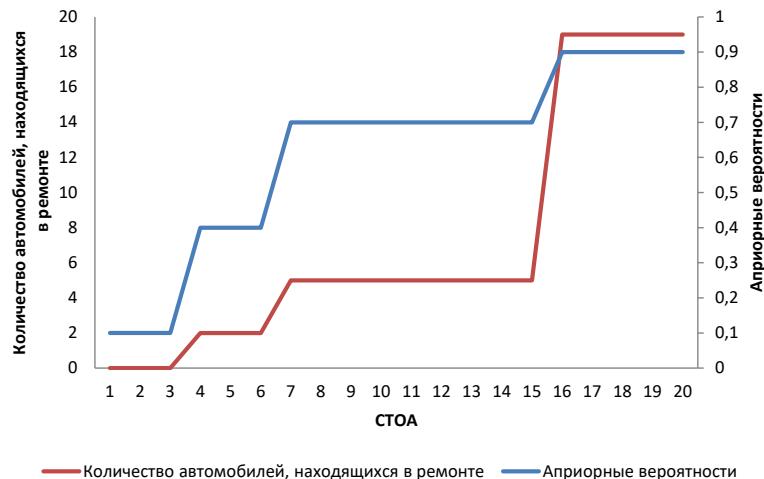


Рисунок 1 – Влияние априорной вероятности на количество автомобилей, находящихся в ремонте
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The effect of a priori probability on the number of cars under repair
Source: compiled by the authors.

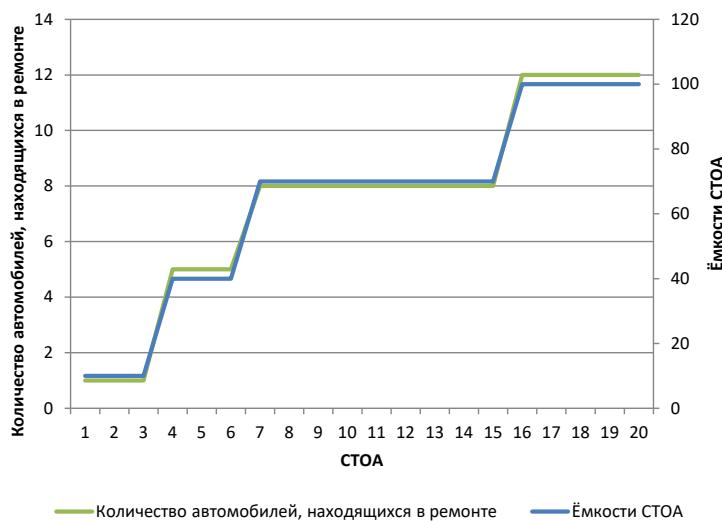


Рисунок 2 – Влияние величины ёмкости состояний на количество автомобилей, находящихся в ремонте
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – The effect of the capacity of states on the number of cars under repair
Source: compiled by the authors.

На рисунке 1 показано, что при росте априорной вероятности (разные значения в каждой группе СТОА) растет количество автомобилей, находящихся в ремонте на СТОА, однако не указаны показатели емкости, ресурсов и удельного расхода ресурсов, так как они приняты одинаковыми для всех СТОА (подмножества состояний). Значения показателей при построении графика: емкости – 50; априорные вероятности – 0,3, 0,3, 0,3, 0,1; ресурсы – 10; удельный расход ресурсов – 0,04.

На рисунке 2 видно, что при увеличении ёмкости СТОА растет количество автомобилей, находящихся в ремонте. Не показаны графики для априорных вероятностей и удельных расходов ресурсов, так как эти показатели выбраны одинаковыми для всех СТОА (подмножества состояний). Значения показателей при построении графика: емкости – 10, 40, 70, 100; априорные вероятности – 0,4; ресурсы – 10; удельный расход ресурсов – 0,04.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предварительный анализ показал возможность исследований с применением методов теории транспортных макросистем для решения задач поиска равновесия в системах массового обслуживания. Практически полное отсутствие научных работ по рассматриваемой теме, а именно рассмотрение системы взаимодействия, которую можно представить как «треугольник» со сторонами: Клиент, Страховщик, СТОА, функционирование которой направлено на организацию и проведение восстановительного ремонта автомобилей. Чаще можно найти работы, которые посвящены отдельно тематике СТОА и страховых компаний, работающих в сфере автострахования. Так, наиболее актуальными являются вопросы, связанные с ценовой политикой автострахования [15], использования телематических технологий [16, 17], прогнозных моделей премиальных выплат [18]. Телематика как технология в автостраховании известна и среди российских исследователей [19] как инновационная форма ведения бизнес-процессов. Все перечисленное ставит вопрос по поводу применения используемых в настоящей статье результатов, так как они имеют большое значение при математическом моделировании всей системы «Клиент-Страховщик-СТОА» на макроуровне, что соответствует региональным системам. При этом существенным является именно объединенный подход, в котором процессы Страховщика становятся необходимым элементом, влияющим на работу всей совокупности СТОА. Таким образом, модели организации работ по послеаварийному ремонту автомобилей на уровне математических моделей, обеспечивающих поиск равновесных распределений клиентов по СТОА должны учитывать особенности функционирования Страховщиков.

Итак, данные результаты могут быть применены при разработке новой модели взаимодействия СТОА и Страховщика в области организации и проведения ремонта поврежденных автомобилей по автострахованию, позволяющей сократить время простоя автомобилей в ремонте.

Совокупность СТОА представляет собой множество состояний, а каждая СТОА – конкретное состояние, заполняемое некоторым числом автомобилей. Емкость каждой СТОА для заполняющих данное состояние автомобилей обозначим G_i , где i – номер СТОА. Смысл данной величины заключается в том, что оно представляет собой число одновременно об-

служиваемых автомобилей с кузовным ремонтом (а также с другими дополнительными видами ремонта, сопровождающего кузовной), направленных от страховых компаний. Таким образом, емкость G_i непосредственно влияет на скорость ремонта автомобилей.

Отдельные простейшие работы по обслуживанию автомобилей, такие как уборка, очистка кузова, кабины, мойка автомобиля и его заправка топливом и другими материалами, а также внешний технический контроль могут быть выполнены самими владельцами-водителями автомобилей. Однако ряд серьезных работ по обслуживанию автомобилей и восстановление утраченной работоспособности их агрегатов, узлов, деталей и систем, требующих использования средств технического контроля, специальных оборудований и инструментов, выполняются в специальных обслуживающих предприятиях и мастерских, силами специальных подготовленных работников.

Современный автосервис во многих странах мира располагает широко разветвленной и хорошо налаженной сетью предприятий как по обслуживанию автомобилей, так и по торговле или запасными частями и материалами к ним, а также их хранению. Социально-экономическое значение автосервиса заключается в том, что он, являясь составной частью системы автомобильного транспорта независимо от формы его собственности, служит обеспечению бесперебойности, регулярности, надежности, безопасности и экономичности автомобильных перевозок. Заметим, что вопросы повышения безопасности поведения водителей становятся, как ни странно, частью бизнеса Страховщика. Так, многие зарубежные работы посвящены теме риска-менеджмента, опирающегося на данные о поведении водителя, полученные напрямую от телематических систем и исследуемые машинным интеллектом [20, 21, 22, 23, 24]. Это означает, что цепочка связей в системе «Клиент-Страховщик-СТОА» замыкается не только в направлении «Клиент-Страховщик», но и в направлении «Страховщик-Клиент», где у Страховщика появляются новые данные о поведении водителей и возможность влиять на безопасность транспортного процесса практически в режиме реального времени. В этом процессе, представляющем явный системный характер, не последнее значение имеет проблема удержания клиентов [25], а также технологий мониторинга вождения [26]. Все это указывает на то, что в исследуемой системе вопросы ее устойчивости выходят на новый

уровень, когда безопасность вождения становится управляющим параметром со стороны именно Страховщика, а не участников дорожного движения. Сокращающаяся за счет этого аварийность приводит к более стабильной работе страховых компаний, а следовательно, и к более полному покрытию убытков и к более качественному и быстрому восстановлению автомобилей. Работа СТОА теперь имеет все возможности к более точному и тонкому планированию загрузки со стороны Клиентов.

Следовательно, при «более тесном сотрудничестве» СТОА и Страховщика кардинальных изменений в целях СТОА не будет. Однако с большой долей вероятности будет смещение приоритетов к скорости ремонта (оказываемых услуг) и повышению качества ремонта.

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

При «более тесном сотрудничестве» поток поврежденных автомобилей в ремонт будет выше, соответственно загрузка СТОА увеличится. Одновременно уменьшится время ремонта за счет сокращения простоя автомобилей в ремонте на время, необходимое на согласование объема и стоимости ремонтных работ и необходимых запасных частей (при их необходимости).

Более тесное взаимодействие СТОА и Страховщика. Возможны разные варианты взаимодействия: например, на основании договора или в другом варианте Страховщик организовывает работы своего собственного СТОА как обособленного подразделения компании. Следовательно, возможные эффекты от применения теории и моделей выглядят как:

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тетин И.А. Моделирование стратегии страховой компании в условиях цикла страховой де-

ятельности // Вестник Томского государственного университета. Экономика. 2017. № 38. С. 122–136.

2. Даммер Д.Д. Математическая модель страховой компании в виде системы массового обслуживания с неограниченным количеством приборов с учетом единовременных страховых выплат // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2016). 2016. С. 18–23.

3. Николайчева А.М. Тренды цифровизации и автоматизации процессов станций технического обслуживания // Управленческий учет. 2021. №. 7(2). С. 462–468.

4. Мамедов Э.Н. Теоретико-игровая оптимизация методов страхования в сфере автотранспорта // SCIENCE AND WORLD. 2013. С. 145.

5. Нестеренко И.С., Нестеренко Г.А., Бугров В.С. Проектирование клиентской зоны, позволяющей повысить спрос на услуги станций технического обслуживания автомобилей // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 1(115). С. 55–58. DOI: 10.23670/IRJ.2022.115.1.112

6. Нестеренко Г.А., Нестеренко И.С., Залознов И.П. Использование BIM-технологий для повышения эффективности разработки и эксплуатации предприятий по обслуживанию и продажам автомобилей // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 11 (137). С.1–6. DOI: 10.23670/IRJ.2023.137.14

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

8. Phi-Hung Nguyen. Automotive Service Quality Investigation Using a Grey-DEMATEL Model // Computers, Materials & Continua. 2022. 73 (3). pp. 4779-4800. DOI: 10.32604/cmc.2022.030745

9. Revina I.V., Trifonova E.N. Car Service Optimization Based on Simulation // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 1791(01). 012084. DOI: 10.1088/1742-6596/1791/1/012084

10. Bugrimov V., Sarbaev V. Optimization of the system of management of stores of the car service with the help of imitation simulation // MATEC Web of Conferences 334. 2021; 01022. DOI: 10.1051/matecconf/202133401022

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

12. Будникова И.К., Марданова А.М. Моделирование финансовой деятельности страховой компании // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. 2020. №1. С. 24–27.

13. Попков Ю.С. Концепция энтропии в системном анализе // Сборник трудов V Международной научно-практической конференции-биеннале / под общей ред. Г.Б. Клейнера, С.Е. Щепетовой. М.:

Прометей. 2018. С. 27–28. DOI: 10.33278/SAE-2018.rus.027-028

14. Агуреев И.Е., Ахромешин А.В. Математическая модель транспортного поведения на основе теории транспортных макросистем // Мир транспорта. 2021. Т. 19, № 6(97). С. 13–18. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-6-2

15. Hosein P.A Data-Driven Pricing Strategy for Automobile Insurance Policies // 2022 5th Asia Conference on Machine Learning and Computing (ACMLC). DOI: 10.1109/ACMLC58173.2022.00009

16. Xie Sh. Analyzing the Influence of Telematics-Based Pricing Strategies on Traditional Rating Factors in Auto Insurance Rate Regulation // Mathematics. 2024. 10.3390/math12193150, 12, 19, (3150). DOI: 10.3390/math12193150

17. Henckaerts R., Antonio K. The added value of dynamically updating motor insurance prices with telematics collected driving behavior data // Insurance: Mathematics and Economics, 10.1016/j.insmatheco. 2022. 03.011, 105, (79-95). DOI: 10.1016/j.insmatheco.2022.03.011

18. Masello L., Sheehan B., Castignani G., Guillen M., Murphy F. Predictive Modeling for Driver Insurance Premium Calculation Using Advanced Driver Assistance Systems and Contextual Information // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 10.1109/TITS.2024.3518572, 26, 2, (2202-2211). 2025. DOI: 10.1109/TITS.2024.3518572

19. Кушелев И.Ю. Внедрение инновационных информационных технологий на страховом рынке в России: телематика в автостраховании // Путеводитель предпринимателя. 2023. Т. 16, № 2. С. 110–119. <https://doi.org/10.24182/2073-9885-2023-16-2-110-119>

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

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

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

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

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

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

26. Manko B.A. Erie Insurance: Monitoring technology in the car insurance market and the issue of data privacy // Journal of Information Technology Teaching Cases, 10.1177/20438869221117571. 2022. 13 (2): 193-198. DOI:10.1177/20438869221117571

REFERENCES

1. Tetin I.A. Modeling the strategy of an insurance company in the context of the insurance activity cycle] *Bulletin of Tomsk State University. Economics*. 2017; No. 38. (In Russ.).
2. Dammer D.D. Mathematical model of an insurance company in the form of a mass service system with an unlimited number of devices taking into account one-time insurance payments. *Information technology and mathematical modeling (ITMM-2016)*. 2016; (In Russ.).
3. Nikolaycheva A.M. Trends in digitalization and automation of service station processes. *Management accounting*. 2021; 7 (2) (In Russ.).
4. Mamedov E.N. Game-theoretic optimization of insurance methods in the field of motor transport] *SCIENCE AND WORLD*. 2013. (In Russ.).
5. Nesterenko I.S. Design of a customer zone that allows increasing demand for the services of car service stations. *International Research Journal*. 2022; 1 (115). (In Russ.). DOI: 10.23670 / IRJ.2022.115.1.112
6. Nesterenko G.A., Nesterenko I.S., Zaloznov I.P. Using BIM technologies to improve the efficiency of development and operation of enterprises for car maintenance and sales. *International Research Journal*. 2023; 11 (137). (In Russ.). DOI: 10.23670/IRJ.2023.137.14
7. Zakharov N.S., Kozin E.S. Technological design of vehicle service stations using genetic algorithms. *International Journal of Advanced Studies : Transport and Information Technologies*. 2024; 14 (2). (In Russ.). DOI 10.12731/2227-930X-2024-14-2-296
8. Phi-Hung Nguyen. Automotive Service Quality Investigation Using a Grey-DEMATEL Model. *Computers, Materials & Continua*. 2022; 73 (3). DOI: 10.32604/cmc.2022.030745
9. Revina I.V. Trifonova E.N. Car Service Optimization Based on Simulation. *Journal of Physics: Conference Series*. 1791 (2021) 012084. DOI: 10.1088/1742-6596/1791/1/012084
10. Bugrimov V., Sarbaev V. Optimization of the system of management of stores of the car service with the help of imitation simulation. *MATEC Web of Conferences*. 334, 01022. 2021; (In Russ.). DOI: 10.1051/matecconf/202133401022
11. Kryne M., Mazur M. Innovative Work Order Planning with Process Optimization Using Computer Simulation in the Automotive Industry, in the Case of Repair Workshops. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. 2024. DOI: 10.3311/pptr.23546

12. Budnikova I.K., Mardanova A.M. Modeling of financial activities of an insurance company. *Information technologies in construction, social and economic systems*. 2020. No. 1. (In Russ.).
13. Popkov Yu.S. The concept of entropy in systems analysis. Collection of works of the V-th International scientific and practical conference-biennale. Under the general editorship of G.B. Kleiner, S.E. Shchepetova. M.: Publisher: Limited Liability Company "Prometheus Publishing House". 2018. (In Russ.). DOI: 10.33278/SAE-2018.rus.027-028
14. Agureev I.E., Akhromeshin A.V. Mathematical model of transport behavior based on the theory of transport macrosystems. *World of Transport*. 2021. 19. No. 6 (97). DOI 10.30932/1992-3252-2021-19-6-2. (In Russ.)
15. Hosein P.A Data-Driven Pricing Strategy for Automobile Insurance Policies. 2022 5th Asia Conference on Machine Learning and Computing (ACMLC). DOI: 10.1109/ACMLC58173.2022.00009
16. Xie Sh. Analyzing the Influence of Telematics-Based Pricing Strategies on Traditional Rating Factors in Auto Insurance Rate Regulation. *Mathematics*. 10.3390/math12193150, 12, 19, (3150). 2024. DOI: 10.3390/math12193150
17. Henckaerts R., Antonio K. The added value of dynamically updating motor insurance prices with telematics collected driving behavior data. *Insurance: Mathematics and Economics*, 10.1016/j.inmatheco.2022.03.011, 105, (79-95). 2022. DOI:10.1016/j.inmatheco.2022.03.011
18. Masello L., Sheehan B., Castignani G., Guillen M., Murphy F. Predictive Modeling for Driver Insurance Premium Calculation Using Advanced Driver Assistance Systems and Contextual Information. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 10.1109/TITS.2024.3518572, 26, 2, (2202-2211). 2025; DOI: 10.1109/TITS.2024.3518572
19. Kushelev I.Yu. Implementation of innovative information technologies in the insurance market in Russia: telematics in car insurance] Entrepreneur's Guide. 2023;16 (2). (In Russ.). <https://doi.org/10.24182/2073-9885-2023-16-2-110-119>
20. Lang F., Riegel L. Acceptance of online customer channels for damage claims in Germany. *Information Technology and Management*. 10.1007/s10799-023-00404-z:26:1(101-116) Online publication date: 1-Mar-2025. DOI:10.1007/s10799-023-00404-z
21. McDonnell K., Murphy F., Sheehan B., Masello L., Castignani G. Deep learning in insurance. *Expert Systems with Applications: An International Journal*. 10.1016/j.eswa.2023.119543217:C. Online publication date: 1-May-2023. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.119543
22. Li H., Luo X., Zhang Z., Jiang W., Huang S. Driving risk prevention in usage-based insurance services based on interpretable machine learning and telematics data. *Decision Support Systems*. 10.1016/j.dss.2023.113985172:C. Online publication date: 1-Sep-2023. DOI: 10.1016/j.dss.2023.113985
23. Brühwiler L., Fu Ch., Huang H., Longhi L., Weibel R. Predicting individuals' car accident risk by trajectory, driving events, and geographical context. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2022; Volume 93. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2022.101760
24. Cunha L., Bravo J. M. Automobile Usage-Based-Insurance: Improving Risk Management using Telematics Data. 2022 17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), 10.23919/CISTI54924.2022.9820146. 2022; (1-6), DOI: 10.23919/CISTI54924.2022.9820146
25. Ortega M., Quintanilla J., Ong E.R., Ramos M.R., Trinidad C.J. Asfalis: A Web-based System for Customer Retention Strategies Optimization of a Car Insurance Company Using Cohort and Churn Analysis. 2023 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT). DOI: 10.1109/ICICT57646.2023.10134149
26. Manko B.A. Erie Insurance: Monitoring technology in the car insurance market and the issue of data privacy. *Journal of Information Technology Teaching Cases*. 2022; 10.1177/20438869221117571, 13 (2): 193-198. DOI:10.1177/20438869221117571

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Агуареев И.Е. Формулировка задач исследований, научные положения.

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

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Agureev Igor E. Formulating research objectives, setting out scientific provisions.

Buraga Sergey A. Analysis of the system functioning processes, development of solutions for optimizing the system functioning.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7903-139X>,
SPIN-код: 1910-6751,

e-mail: agureev-igor@yandex.ru

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

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9889-7578>,
e-mail: buraga.sergey@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7903-139X>,
SPIN-code: 1910-6751,

e-mail: agureev-igor@yandex.ru

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

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9889-7578>,
e-mail: buraga.sergey@yandex.ru

Научная статья

УДК 656.1:004.8

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-772-785>

EDN: ITMNZK



Check for updates

ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ОРГАНИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Д.С. Курбатов¹ А.В. Старostenко²

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,

¹АО «СТАР-Проект»,

г. Санкт-Петербург, Россия

²АО ПО «РосДорСтрой»,

г. Санкт-Петербург, Россия

ответственный автор

dimkur21@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассматривается разработка теоретической модели для внедрения цифровых двойников автомобильных дорог и оценка их эффективности в системе организации дорожного движения с адаптацией принципов их построения к особенностям транспортной инфраструктуры России.

Материалы и методы. Интеграция цифровых двойников в управлении дорожным движением демонстрирует свою эффективность благодаря тесной взаимосвязи с интеллектуальными транспортными системами. В основе исследования лежит современный метод и системный анализ создания и применения цифровых двойников. Авторами предложена математическая модель для формализации и оценки эффективности, которая интегрирует такие ключевые факторы, как затраты на содержание дорог, снижение времени простоя транспорта, экономия топлива и повышение безопасности. Цифровые двойники приносят экономическую выгоду за счет более точного прогнозирования ремонтных и профилактических работ, сокращения эксплуатационных расходов и уменьшения необходимости постоянного присутствия персонала на объектах. Кроме того, они также выступают ключевым инструментом долгосрочного планирования, предостав员ая возможность моделировать будущие сценарии развития транспортной сети с минимальными финансовыми затратами.

Результаты. Исследование охватило методы прогнозной аналитики, данные пилотных проектов и подходы к созданию цифровых двойников, использующих данные, собранные с помощью сетей датчиков, видеокамер и беспилотников. Обработка и объединение этой информации в единую цифровую платформу позволяют в режиме реального времени отслеживать изменения на дорогах, прогнозировать развитие ситуаций и принимать обоснованные управленческие решения с помощью инструментов предсказательной аналитики.

Для оценки эффективности цифровых двойников разработана и формализована теоретико-экономическая модель, которая позволяет количественно обосновать инвестиционные решения. Определены некоторые специфические проблемы масштабирования технологий в Российской Федерации, включая недостаточную нормативно-правовую базу, разработку единых стандартов данных, кадровый дефицит. Представлена структурированная таблица развития цифровых двойников и их ключевых направлений.

Обсуждение и заключение. Исследование показало, что объединение цифровых двойников с интеллектуальными транспортными системами открывает широкие возможности для оптимизации управления дорожным потоком, улучшения безопасности на дорогах и увеличения транспортной емкости.

Комплексная оптимизация дорожного движения невозможна без показанной практической значимости цифровых двойников. Предложенная модель может являться основой для планирования и обоснования инвестиций в цифровизацию транспортной инфраструктуры на различных государственных и муниципальном уровнях. Однако успешная реализация зависит от многих факторов и требует комплексного подхода, включая серьезную подготовку кадров на всех уровнях, развитие нормативной базы и формирование единой цифровой экосистемы.

© Курбатов Д.С., Старostenко А.В., 2025

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровой двойник, управление дорожным движением, интеллектуальные транспортные системы, теоретико-экономическая модель, оптимизация транспортных потоков, безопасность дорожного движения

Статья поступила в редакцию 27.06.2025; одобрена после рецензирования 16.09.2025; принята к публикации 21.10.2025.

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: Курбатов Д.С., Старostenко А.В. Инновационные подходы к организации дорожного движения на основе цифровых двойников автомобильных дорог // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 5. С. 772-785. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-772-785>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-772-785>

EDN: ITMNZK

INNOVATIVE APPROACHES TO TRAFFIC MANAGEMENT BASED ON DIGITAL TWINS OF ROAD NETWORKS

Dmitriy S. Kurbatov¹✉, Andrey V. Starostenko²

¹St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
«STAR-Project» JSC,
St. Petersburg, Russia

²«RosDorStroy» JSC, Production association,
St. Petersburg, Russia

✉ corresponding author
dimkur21@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The article considers the development of the theoretical model for the implementation of digital twins of highways and assesses their effectiveness within the traffic management system, adapting their construction principles to the specifics of Russia's transport infrastructure.

Materials and Methods. The integration of digital twins into traffic management demonstrates its effectiveness through a close relationship with intelligent transport systems. The research is based on modern method and system analysis to the creation and application of digital twins. The authors propose a mathematical model for formalizing and evaluating the effectiveness, which integrates key factors such as: road maintenance costs, reduction of vehicle idle time, fuel savings, and improved safety. Digital twins generate economic benefits through more accurate forecasting of repair and preventive maintenance work, diminishing operational expenses, and decreased need for constant personnel presence at sites. Furthermore, they also serve as a key tool for long-term planning, providing the capability to model future scenarios for the development of the transport network with minimal financial investment.

Results. The study encompassed methods of predictive analytics, data from pilot projects, and approaches to creating digital twins that utilize data collected by sensor networks, video cameras, and drones. Processing and integrating this information into the unified digital platform enables real-time monitoring of changes on the roads, forecasting situation development, and making informed management decisions using tools of predictive analytics. A theoretical and economic model has been developed and formalized to assess the effectiveness of digital twins, providing quantitative justification for investment decisions. Several specific problems related to scaling these technologies in the Russian Federation were identified, including an insufficient regulatory framework, the need to develop unified data standards, and a shortage of skilled personnel. A structured table outlining the development of digital twins and their key directions is presented.

Discussion and Conclusion. The research has showed that combining digital twins with intelligent transport systems opens sufficient opportunities for optimizing traffic flow management, improving road safety, and increasing transport capacity.

© Kurbatov Dmitriy S., Starostenko Andrey V., 2025



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

Comprehensive traffic optimization is impossible without demonstrating the practical significance of digital twins. The proposed model can serve as a basis for planning and justifying investments in the digitalization of transport infrastructure at various state and municipal levels. However, successful implementation depends on many factors and requires a complex approach, including serious personnel training at all levels, development of the regulatory framework, and creation of the unified digital ecosystem.

KEYWORDS: *digital twin, traffic management, intelligent transportation systems, theoretical and economic model, traffic flow optimization, road safety*

The article was submitted: June 27, 2025; **approved after reviewing:** September 16, 2025; **accepted for publication:** October 21, 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. Kurbatov D.S., Starostenko A.V. Innovative approaches to traffic management based on digital twins of road networks. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2025; 22 (5): 772-785. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-772-785>

ВВЕДЕНИЕ

Российская транспортная система в последнее время испытывает серьезные испытания, вызванные некоторыми ключевыми факторами: стремительным увеличением количества транспортных средств, перегрузкой дорожной сети, ухудшением экологического состояния и ростом количества ДТП. Традиционные подходы к управлению транспортными потоками уже не справляются с современными вызовами: они не обладают достаточной гибкостью, эффективностью и масштабируемостью. В качестве перспективного решения выделяются цифровые двойники, представляющие собой виртуальные копии физических объектов, постоянно обновляемые актуальной информацией в реальном времени. В их состав входят геометрическая модель, сведения о техническом состоянии объектов, история эксплуатации и аналитические инструменты¹.

Разработка комплексного подхода к применению цифровых двойников автомобильных дорог является целью данного исследования, что в итоге должно непременно сказаться на повышении эффективности организации дорожного движения, адаптированного именно к российским условиям, а создание теоретической модели должно привести к правильной оценке экономической и практической эффективности. Стоит отметить, что внедрение цифровых двойников сопровождается рядом трудностей, среди которых стоит выделить необходимость обработки массивных данных, создание надежной защищенной системы и обеспечение мощных вычислительных ресурс-

сов для обработки информации в динамичном режиме. Необходимо также разработать соответствующие нормативно-правовые акты, поскольку текущие стандарты не всегда адекватно отражают особенности функционирования таких систем [1].

Цифровые двойники, благодаря стремительному развитию технологий, открывают новые возможности для совершенствования транспортных систем, уменьшения пробок и усиления безопасности на дорогах. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- провести системный анализ современных методик создания и применения цифровых двойников в дорожно-транспортной сфере с выделением перспективных направлений;
- разработать теоретическую модель, формализующую взаимосвязь ключевых факторов эффективности внедрения цифровых двойников в систему организации дорожного движения;
- предложить вариант создания экономико-математического аппарата для комплексной оценки инвестиционной целесообразности и окупаемости проектов цифровизации дорожной инфраструктуры;
- выявить и систематизировать основные проблемы и перспективы развития технологии цифровых двойников автодорог в России.

Современная концепция обеспечения безопасного и эффективного движения высокоматематизированных транспортных средств (ВАТС) по автомобильным дорогам общего пользования, в том числе в условиях смешанного транспортного потока, предполагает обязательное взаимодействие ВАТС с интеллек-

¹ Паспорт Стратегии цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации // Мир дорог. 2021. № 139. С. 74–76. EDN IRTQRP

туальными транспортными системами (ИТС) с использованием цифровых двойников дороги и систем высокоточного позиционирования. Такая система способна ускорить внедрение автономного транспорта, который сможет безопасно и с высокой эффективностью работать в густонаселенных городах [2].

Актуальность темы подчеркивается не только глобальными трендами цифровизации, но и конкретными инициативами, такими как федеральный проект «Цифровая транспортная сеть» и стратегии развития умных городов. Результаты данного исследования могут быть полезны для государственных органов, занимающихся планированием транспортной политики, а также для коммерческих организаций, внедряющих интеллектуальные системы управления перевозками. Информация, полученная от этих моделей, играет ключевую роль в создании ИТС, что подтверждается актуальностью данной тематики в национальных планах цифровой модернизации².

Научная новизна исследования состоит в создании уникальной методики оценки эффективности цифровых двойников автомобильных дорог, учитывающей отраслевые и региональные особенности организации дорожного движения в России.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве материала для исследования послужили данные открытых научных публикаций, отчетная документация по пилотным проектам внедрения цифровых двойников, а также действующие нормативно-правовые акты Российской Федерации, регламентирующие вопросы разработки и применения интеллектуальных транспортных систем и цифровой трансформации транспортной отрасли. Цифровой двойник дороги представляет собой виртуальную модель дорожной инфраструктуры, которая содержит информацию о геометрии дорог, их состоянии, интенсивности движения транспорта и других характеристиках. Изготовление данного объекта осуществляется на основе информации, которая была получена при помощи различных технологий и способов: геодезические измерения; дистанционное зондирование; системы мониторинга и другие. Для создания цифрового двойника дороги необходимо собрать большой объем информации, обработать их с помощью специальных программ и алгоритмов, а так-

же постоянно обновлять информацию, чтобы поддерживать актуальность модели.

Цифровые двойники революционизируют мониторинг состояния дорог, обеспечивая оперативность и точность, недоступные традиционным методам. В то время как классические обследования требуют значительных временных и финансовых вложений, цифровая модель может быть оперативно обновлена с помощью современных технологий, таких как дроны, мобильные лазерные сканеры и спутниковые снимки. Благодаря им создаются высокоточные 3D-модели, что существенно сокращает время диагностики и выявления проблем на дорогах. Центр интеллектуальных транспортных систем МАДИ отмечает, что применение цифровых двойников ускоряет процесс обследования объектов в 3-4 раза, обеспечивая при этом более точные результаты. Автоматическая обработка данных, получаемых из цифровых моделей, интегрируемых в системы управления дорожной инфраструктурой, исключает вероятность человеческих ошибок и повышает надежность принимаемых решений.

Цифровые двойники открывают новые возможности для планирования и совершенствования ремонтных работ на дорогах. Благодаря им можно разрабатывать обоснованные планы текущего и капитального ремонта, а также оптимальные схемы технического обслуживания. Анализируя цифровую модель дороги, можно выявить наиболее проблемные участки, сравнив их по показателям износа, нагрузки, частоты аварий, климатических условий и даже динамики скорости движения. Такой подход к планированию ремонта позволяет эффективно распределять ресурсы и формировать ремонтные графики исходя из приоритетов [3]. Особенno большое значение это приобретает для протяженных федеральных дорог, где даже незначительные погрешности в расчетах могут обернуться крупными финансовыми потерями.

Цифровые двойники оказывают существенное влияние на повышение безопасности на дорогах за счет возможности сбора, анализа и визуализации данных о дорожно-транспортных происшествиях, динамике движения транспорта, погодных явлений и других факторов в режиме онлайн. Такой подход позволяет, например, в рамках реализации проекта «Безопасные и качественные дороги» выяв-

² Министерство цифрового развития РФ. Концепция цифровой трансформации транспорта. М., 2022.

лять и оптимизировать участки с повышенным риском аварий в крупных городах. Использование цифровых моделей и искусственного интеллекта позволяет предсказывать места, где могут произойти ДТП. Благодаря этому службы безопасности могут оперативно принимать меры по снижению рисков, например, улучшить освещение, пересмотреть схему движения, установить дополнительные предупреждающие знаки и камеры. Такой подход особенно актуален во время зимнего периода, когда погодные условия играют ключевую роль в обеспечении безопасности на дорогах [4].

Цифровые двойники выступают в качестве фундамента для продвижения интеллектуальных и автономных транспортных систем. Современные беспилотные автомобили нуждаются в высокоточном представлении не только дорожной сети, но и всех окружающих объектов, включая дорожные знаки, временные ограничения и специфические правила движения, для обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации. На магистралях М-11 «Нева» и ЦКАД проводятся экспериментальные проекты, направленные на создание цифровых моделей дорожных сегментов, которые смогут обмениваться информацией с автомобилями посредством V2X-технологий. Данная система предоставляет водителям актуальную информацию о пробках, дорожных работах, состоянии дорожного покрытия, погодных условиях и даже о планах других участников движения, что в итоге ведет к более комфорtnому, безопасному и экономичному путешествию по трассе [5].

Цифровые двойники выступают ключевым элементом в разработке и аprobации подхода к паспортизации автомобильных дорог на основе создания цифровых двойников с учетом российских нормативных требований [6]. Они обеспечивают единое хранилище данных о конструктивных особенностях дороги, проведенных ремонтах, ее текущем состоянии, а также расположении объектов и инженерных сетей. Такая централизованная база данных повышает эффективность взаимодействия между заказчиком и подрядчиками, минимизирует вероятность ошибок и дублирования информации, упрощая отслеживание и контроль со стороны заказчика. Интеграция цифрового паспорта дороги с кадастровыми и инженерными базами данных существенно упростит задачи проектирования и модернизации объектов транспортной инфраструктуры.

Цифровые модели оказывают существенное влияние на прозрачность и эффективность

контроля над подрядчиками. В частности, при реализации контрактов, охватывающих весь жизненный цикл объекта, от строительства до многолетней эксплуатации, цифровой двойник становится незаменимым инструментом для мониторинга соответствия выполненных работ проектной документации и установленным стандартам.

Помимо технических составляющих, большое значение имеет инвестиция в развитие человеческого капитала и создание надлежащей правовой базы. В данный момент наблюдается нехватка квалифицированных специалистов, владеющих навыками работы с цифровыми двойниками и большими данными в транспортной отрасли, что тормозит темпы и качество внедрения передовых технологий. Для ускорения этого процесса требуется активное совершенствование образовательных курсов в технических вузах и программы профессионального развития персонала на предприятиях. Для эффективного регулирования цифрового пространства необходимо сформировать правовую основу, которая одновременно защитит персональные данные и кибербезопасность, гарантирует доступ к информации, поощряет развитие отечественных технологий и обеспечивает открытость и ответственность в управлении цифровыми системами [7].

Успешное развитие цифровых двойников тесно связано с обеспечением им финансовых ресурсов. В настоящее время финансирование в основном сосредоточено на целевых программах и pilotных проектах, что, безусловно, тормозит масштабное внедрение инновационных технологий. Для создания полноценной инфраструктуры цифровых двойников требуется более широкая государственная поддержка, а также активное привлечение частных капиталов и развитие партнерских отношений между государственными структурами и бизнес-сообществом. Для успешного развития цифровых инноваций необходимо создать благоприятную среду, которая будет поощрять научные исследования и предоставлять поддержку как стартапам, так и компаниям, занимающимся разработкой ИТС.

Исходя из анализа существующих данных о цифровых двойниках автомобильных дорог, можно заключить, что создание и эксплуатация таких систем представляют собой сложный многоэтапный процесс, требующий комплексного подхода. Как показано на рисунке 1, данный процесс включает последовательную реализацию взаимосвязанных этапов, каждый из которых обладает специфическими особенностями и требованиями.

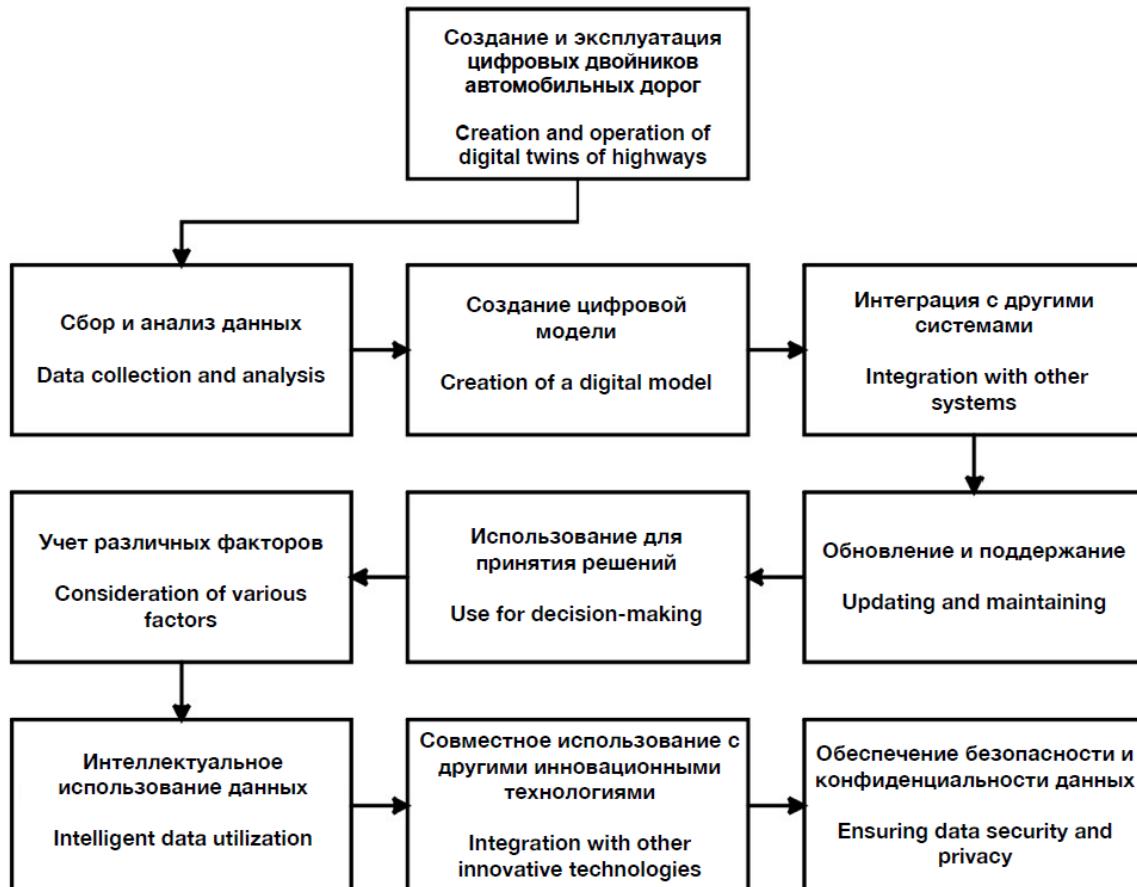


Рисунок 1 – Создание и эксплуатация цифровых двойников автомобильных дорог
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Creation and operation of digital twins for highways
Source: compiled by the authors.

В процессе создания цифровых двойников автомобильных дорог ключевым первым шагом выступает сбор и глубокий анализ имеющихся данных. Цель этого этапа – получить исчерпывающую информацию о текущем состоянии дорожной сети и динамике транспортных потоков. Для достижения данной цели применяются разнообразные источники, включая системы видеонаблюдения, датчики движения, GPS-трекеры и другие приборы, обеспечивающие сбор сенсорной информации. После сбора информации она подвергается обработке и анализу с помощью специальных программных приложений, что в итоге приводит к формированию цифровой карты дорожной инфраструктуры [8].

С помощью этих данных создаётся цифровая копия автомобильной дороги, которая

воспроизводит её ключевые свойства и параметры в виртуальном пространстве. Такая модель может содержать сведения о местоположении дорог, их строении и взаимосвязях, а также данные о движении транспорта, дорожных сооружениях и существующей инфраструктуре.

Интеграция цифровых двойников автомобильных дорог с другими управлением и мониторинговыми платформами, такими как системы регулирования светофоров, управления дорожным движением и системами безопасности, формирует единый информационный пул. Данная интеграция позволяет осуществлять комплексное управление и надзор за состоянием и функционированием всей дорожной сети.

Чтобы цифровые модели оставались релевантными, их непрерывно совершенствуют. Для этого постоянно собираются и обновляются сведения о трафике, состоянии дорожного покрытия и других факторах. Кроме того, все изменения, возникающие в процессе эксплуатации, должны быть учтены в цифровой модели для ее точности [9].

Цифровые двойники служат инструментом для поддержки решений в разных сферах, например, при составлении оптимальных маршрутов, повышении эффективности транспортных потоков, прогнозировании аварийных и критических ситуаций, а также для оценки действенности существующей инфраструктуры и разработке планов её модернизации.

Цифровые двойники строятся с учетом множества факторов, которые воздействуют на движение и безопасность, таких как погодные аномалии, качество дорожной инфраструктуры, временные рамки и другие нюансы. Благодаря этому создается более реалистичная и многомерная модель, способная адаптироваться к динамике окружающей среды и меняющимся условиям дорожного движения.

Цифровые двойники, благодаря встроенным интеллектуальным алгоритмам и аналитическим инструментам, способны самостоятельно обрабатывать и анализировать поступающие данные, выявлять закономерности, предсказывать происшествия и содействовать принятию решений, основанных на фактических данных. Такая функциональность обеспечивает повышение эффективности управления транспортной сетью и укрепление безопасности дорожного движения [10].

Цифровые двойники тесно интегрируются с другими передовыми технологиями, создавая синергетический эффект в сферах, таких как автономное и беспилотное движение, системы *V2X*, интернета вещей (*IoT*) и других. Это комплексное технологическое объединение служит мощным инструментом для развития умных городов и повышения уровня жизни их обитателей [11]. Для обработки этих данных применяются методы искусственного интеллекта, в частности машинное обучение, которое используется для прогнозирования износа дорожного покрытия, оптимизации транспортных потоков и моделирования потенциальных аварийных ситуаций. Дополнительно задействуются ГИС-технологии, обеспечивающие пространственный анализ и точную привязку

данных к цифровой картографической основе.

Безопасность и конфиденциальность данных являются приоритетными факторами при разработке и внедрении цифровых двойников. Чтобы предотвратить несанкционированный доступ, взломы и киберугрозы, применяются комплексные подходы, включающие в себя как технические решения, такие как шифрование и защищенные сетевые протоколы, так и организационные меры, например, обучение персонала по безопасной работе с информацией.

Таким образом, цифровой двойник автомобильных дорог представляет собой динамическую систему, объединяющую передовые методы моделирования, обработки данных и прогнозирования. Его эффективность определяется не только техническими возможностями используемых технологий, но и степенью их интеграции, что требует соблюдения стандартов совместимости данных и создания единой информационной среды. Для конкретных проектов состав методов и материалов может варьироваться в зависимости от масштабов – от моделирования отдельных перекрестков до создания комплексных систем управления дорожной сетью региона [12].

В современном мире транспортная инфраструктура играет ключевую роль в обеспечении устойчивого развития городов и регионов. Эффективное управление улично-дорожной сетью (УДС) становится все более важным в условиях роста населения, увеличения автопарка и интенсификации городского движения. В этой связи цифровая трансформация транспортной отрасли становится необходимой мерой для обеспечения устойчивого развития городов и обеспечения безопасности и комфорта транспортного движения [13].

Цифровой двойник УДС включает в себя несколько ключевых элементов, обеспечивающих создание виртуальной модели реальной транспортной инфраструктуры и обеспечивающих возможность эффективного управления и мониторинга.

Первым ключевым элементом является цифровая карта, которая представляет собой основу цифрового двойника, которая виртуально отображает реальную УДС, разработанную с использованием архитектуры локальной динамической карты или других архитектур, и использует четырехслойную модель, как показано на рисунке 2.

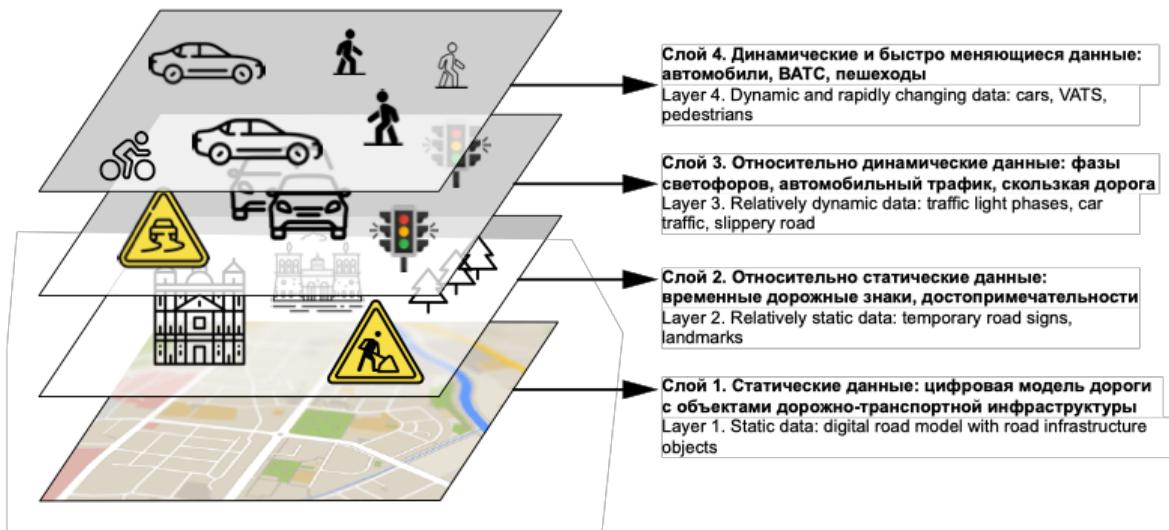


Рисунок 2 – Структура локальной динамической карты

Источник: <https://delta.news/article/mintrans-zaplatit-300-mln-rublej-za-sozdanie-cifrovogo-kopii-trassy-m-11-dlya-bespilotnikov-8278>.

Figure 2 – Structure of the local dynamic map

Source: <https://delta.news/article/mintrans-zaplatit-300-mln-rublej-za-sozdanie-cifrovogo-kopii-trassy-m-11-dlya-bespilotnikov-8278>.

Цифровая модель автомобильной дороги должна содержать высокоточные пространственные и технические данные о количестве проезжих частей, дорожной разметке, дорожных знаках, светофорах, периферийном оборудовании ИТС и схеме организации дорожного движения, с учетом рядности и полос движения. Данная информация должна быть достаточной для решения задач определения местоположения транспортного средства на проезжей части, расчета маршрута его движения по автомобильным дорогам и УДС, включ-

чая перестроение и обгон. Цифровой двойник позволяет перейти к оптимизации светофорного регулирования в реальном времени, обеспечивая переход от статических светофорных циклов, к динамическому адаптивному управлению, учитывающих текущую ситуацию. С помощью получаемых данных с датчиков и камер, алгоритмы ИИ в режиме реального времени корректируют длительность сигналов, обеспечивая «зеленую волну» и приоритет общественному транспорту (рисунок 3).

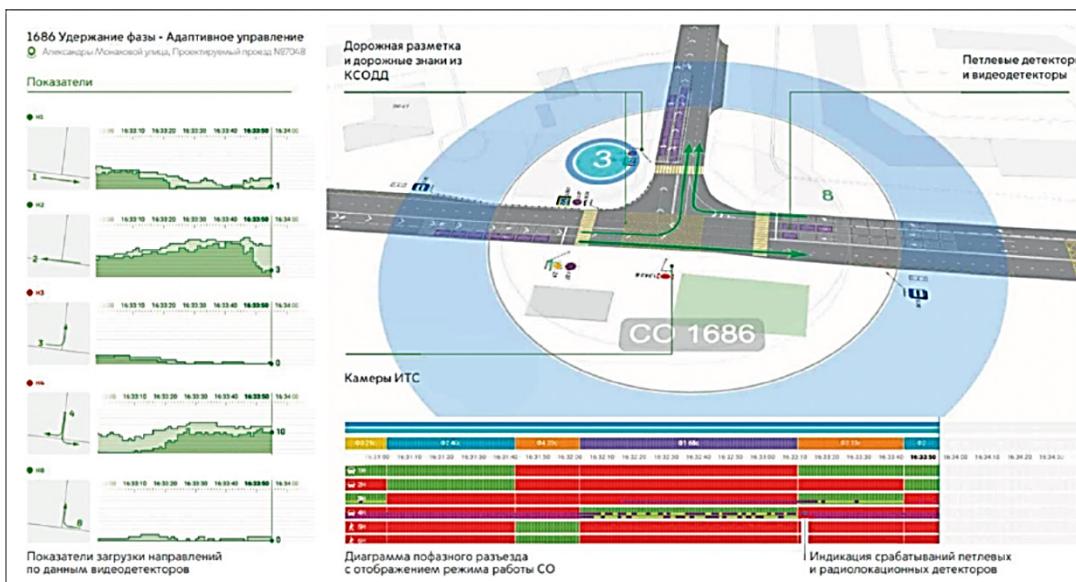


Рисунок 3 – Цифровой двойник светофорного объекта
Источник: журнал «Системы безопасности» 2022. № 2. 31 с.

Figure 3 – Digital twin of the traffic light object
Source: "Safety Systems" Journal – 2022. – №2. – 31 c.

Второй элемент – центр управления, централизованный узел, где собираются, анализируются и обрабатываются данные о дорожном движении и состоянии транспортной инфраструктуры от уже существующих элементов автоматизированной системы управления дорожным движением (АСУДД). Центр управления принимает решения на основе полученной информации и координирует действия для оптимизации транспортного потока, улучшения безопасности и обеспечения эффективного функционирования дорожной сети [14].

Третий элемент – это автомобильное бортовое оборудование *OBU*, устанавливаемое в транспортные средства, используемые для проведения испытаний. Предназначено для осуществления информационного обмена

между транспортным средством и дорожно-транспортной инфраструктурой посредством элементов телекоммуникационной инфраструктуры. Бортовое оборудование должно поддерживать возможность передачи информации посредством использования IEEE 802.11p (ETSI ITS-G5) и/или сети подвижной радиотелефонной связи стандартов GSM/WCDMA/LTE; 5G³.

В качестве технологической инфраструктуры, обеспечивающей связь и взаимодействие между различными устройствами и системами в УДС, используется сервисная V2X-платформа. На рисунке 4 изображена коммуникация автомобилей, оборудованных данной технологией.

³Сафиуллин Р.Н., Керимов М.А. Интеллектуальные бортовые системы на автомобильном транспорте. Directmedia, 2017.

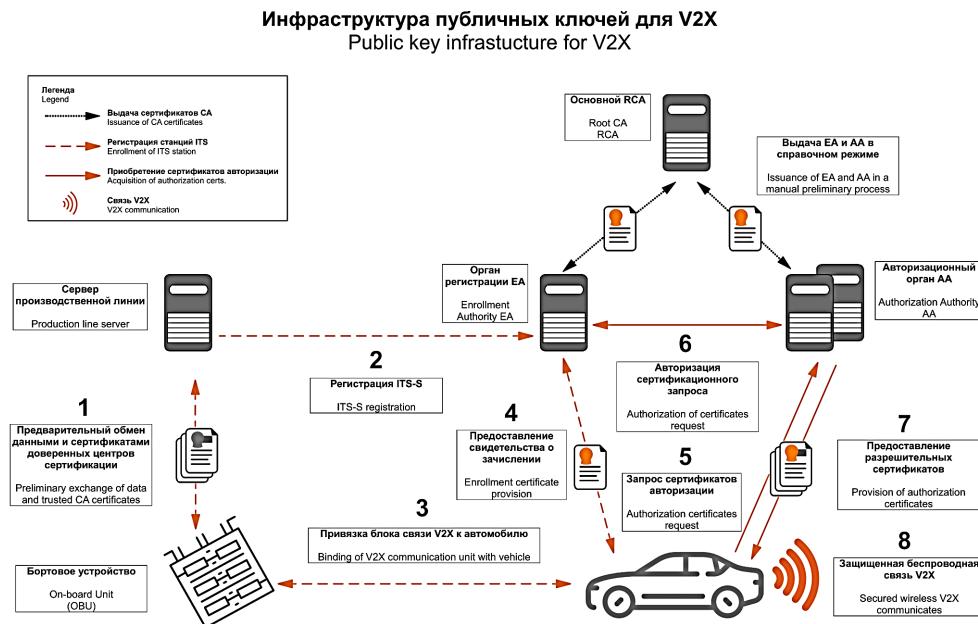


Рисунок 4 – Применение технологий V2X
 Источник: <https://iot-automotive.news/gemalto-v2x/>.

Figure 4 – Application of V2X technologies
 Source: <https://iot-automotive.news/gemalto-v2x/>.

Подобная платформа обеспечивает передачу данных и команд между транспортными средствами, инфраструктурой, пешеходами и другими участниками дорожного движения, что позволяет им взаимодействовать между собой и с центром управления для координации действий и оптимизации работы системы в целом [15].

Для оценки эффективности внедрения цифровых двойников была разработана теоретическая модель, описывающая совокупный показатель эффективности системы после внедрения цифрового двойника. Модель основана на взвешенном суммировании эффектов от ключевых факторов за вычетом затрат на внедрение и эксплуатацию. Для оценки экономической целесообразности предложено условие, при котором совокупный экономический эффект за определенный период должен покрывать капитальные и операционные затраты. Далее представлена формализованная модель оценки эффективности внедрения цифрового двойника и экономическое обоснование её применения.

Теоретическая модель эффективности

Показатель эффективности системы после внедрения цифрового двойника описывается по формуле

$$E_{\text{после}} = \sum_{i=1}^n w_i \times e_i - \Delta E_{\text{затраты}}, \quad (1)$$

где w_i – весовой коэффициент значимости i -го фактора;

e_i – эффективность от i -го фактора;

n – число ключевых факторов, влияющих на эффективность;

$\Delta E_{\text{затраты}}$ – снижение эффективности из-за затрат на внедрение цифрового двойника.

Наиболее существенными факторами являются:

- уменьшение времени простоя транспортных средств (оптимизация дорожного движения и своевременное устранение проблем снижают задержки);

- снижение затрат на техническое обслуживание и ремонт автомобильных дорог (цифровой двойник позволяет прогнозировать износ дорожного покрытия и оптимизировать ремонтные работы);

- повышение безопасности дорожного движения (снижение аварийности за счет мониторинга и анализа данных);

- экономия на топливе (оптимизация маршрутов и снижение пробок уменьшают расход топлива).

Таким образом, уравнение (1) приобретает следующий вид по формуле

$$E_{\text{после}} = w_1 \times e_1 + w_2 \times e_2 + w_3 \times e_3 + w_4 \times e_4 - \Delta E_{\text{затраты}}. \quad (2)$$

После создания системы очевидно, что при поддержании работоспособности полезные действия будут также проводиться постоянно в течение времени, значит и вся эффективность от положительных факторов увеличивается со временем.

Экономическая модель эффективности: оценка экономической целесообразности. Эффективность внедрения цифрового двойника должна удовлетворять условию по формуле

$$\sum_{i=1}^n B_i(t) \geq C_k + \int_0^T C_0(t) dt, \quad (3)$$

где B_i – экономический эффект от i -го фактора во времени;

C_k – капитальные затраты на внедрение цифрового двойника;

$C_0(t)$ – операционные затраты на поддержку;

T – горизонт планирования.

При известном снижении убытков от положительных свойств системы и затратах на её содержание возможно рассчитать соотношение инвестиций ко времени, через которое затраченные ресурсы на внедрение системы будут полностью восстановлены. Данное соотношение позволит показать рентабельность внедрения системы цифрового двойника.

Решение обратной задачи с известным горизонтом планирования и выделенными ресурсами на создание системы позволит найти минимальную требуемую эффективность системы цифрового двойника для положительного эффекта на всю систему.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенное исследование выявило ряд важных результатов, представленных в виде взаимосвязанных этапов, которые оказывают существенное влияние на совершенствование подходов к оценке эффективности и практической реализации цифровых двойников в российском транспортном секторе.

В рамках первого этапа исследования была создана теоретическая модель, позволяющая количественно оценить эффективность внедрения цифровых двойников автомобильных дорог. Ключевым результатом этой работы явилось формирование комплексной модели, которая определяет эффективность по-

средством расчета интегрального показателя, учитывающего воздействие четырех основных определяющих факторов:

- сокращение простоев транспортных средств;
- уменьшение расходов на содержание и ремонт объектов дорожной сети;
- усиление защиты участников дорожного движения за счет уменьшения количества происшествий;
- снижение расхода топлива за счет рационального планирования маршрутов и сокращения пробок.

Чтобы оценить вклад каждого фактора в модель, используются весовые коэффициенты, определяемые либо экспертным путем, либо с помощью регрессионного моделирования на основе прошлых данных. Важной особенностью модели является то, что она учитывает естественное снижение эффективности, вызванное расходами на внедрение и обслуживание системы, что корректирует общую положительную отдачу от модели.

На втором этапе мы обосновываем экономическую целесообразность внедрения цифровых двойников, используя разработанную модель и выявляя условия, при которых реализация таких проектов будет экономически выгодной. Предложенный экономико-математический инструмент обладает высокой практической значимостью, так как он способен эффективно решать две ключевые задачи, которые тесно взаимосвязаны:

- расчет рентабельности проекта при фиксированных показателях его результативности;
- задача заключается в определении минимального показателя рентабельности, который позволит окупить инвестиции в установленные сроки, при условии ограниченности финансовых ресурсов.

Этот подход отличается своей гибкостью в составлении инвестиционных планов и дает возможность настраивать модель под разные варианты финансирования проектов по цифровой модернизации дорожной инфраструктуры.

На третьем этапе была проведена оценка текущего положения дел и выявлены препятствия, мешающие широкому внедрению цифровых двойников в России. Комплексный анализ позволил выделить и структурировать основные проблемы, тормозящие этот процесс.

Основные выводы исследования систематизированы в таблице, где для каждого направления развития отражены ключевые тенденции, текущее положение дел и требуемые действия.

Таблица
Основные задачи развития цифровых двойников автомобильных дорог
Источник: составлено авторами.

Table
Key development objectives for digital twins of highways
Source: compiled by the authors.

Направление развития	Текущий статус	Необходимые действия
Стандартизация данных	Частичная, отдельные регионы и проекты	Разработка и внедрение федеральных стандартов обмена данными
Интеграция цифровых платформ	Ограниченнная совместимость систем	Создание единой национальной цифровой платформы с открытыми API
Точность и актуальность моделей	Высокая на пилотных участках, локальная	Масштабирование и регулярное обновление данных по всей сети
Кадровый потенциал	Недостаточный, дефицит профильных специалистов	Развитие профильного образования и повышение квалификации
Нормативно-правовое обеспечение	На стадии формирования законодательных актов	Принятие комплексных нормативных документов и регламентов
Финансирование	Ограничено целевыми программами и грантами	Расширение государственного финансирования и привлечение частных инвестиций

Одна из причин, препятствующих массовому внедрению цифровых двойников, – это несовершенство технологической базы во многих регионах. Исследования показали, что лишь 35% субъектов России имеют достаточную телекоммуникационную инфраструктуру для полноценной реализации проектов цифровых двойников.

Для решения обозначенных проблем актуальной задачей является создание отраслевой программы цифровой модернизации дорожного сектора, которая предусматривает организацию центра экспертизы по цифровым двойникам, установление системы сертификации для цифровых решений и введение стимулов для внедрения инновационных технологий.

Результаты исследования предоставляют отправную точку для создания стратегии цифровой модернизации дорожного сектора и послужат основой для разработки государственных инициатив по развитию интеллектуальных транспортных систем в России.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование выявило огромный потенциал цифровых двойников в реорганизации систем управления дорожным движением. Предложенный в ходе работы методический подход предлагает все необходимое для комплексной оценки пользы внедрения подобных технологий.

Изучение полученных данных свидетельствует о том, что внедрение цифровых двой-

ников оказывает синергетический эффект на все сферы управления дорожным движением. В результате отмечается улучшение ключевых показателей, таких как безопасность, пропускная способность транспортной сети, экологическая чистота и экономическая эффективность эксплуатации дорожной инфраструктуры.

Оптимизация процесса принятия инвестиционных решений путем его формализации является ключевым фактором для повышения обоснованности и открытости управленческих действий. Представленные модели и подходы дают возможность не только непосредственно оценивать экономическую эффективность, но и выявлять необходимые параметры внедрения для реализации поставленных целей.

Для успешной реализации потенциала цифровых двойников в масштабах национальной транспортной системы требуется преодоление ряда системных проблем. Ключевыми направлениями развития представляются: формирование комплексной нормативно-правовой базы, разработка отраслевых стандартов и протоколов взаимодействия, создание системы подготовки квалифицированных специалистов, а также развитие механизмов финансирования подобных проектов.

Перспективные направления дальнейших исследований включают апробацию разработанных моделей на данных реальных проектах, изучение вопросов интеграции с перспективными транспортными технологиями, а также разработку комплексных решений в об-

ласти кибербезопасности таких систем. Дальнейшее развитие предложенных подходов будет способствовать созданию методологической основы для цифровой трансформации транспортной отрасли.

Таким образом, результаты исследования свидетельствуют о практической значимости разработанных моделей и методик для обоснования решений по внедрению цифровых двойников в системах организации дорожного движения. Реализация предложенных подходов может способствовать повышению эффективности управления транспортной инфраструктурой и созданию основы для развития интеллектуальных транспортных систем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Thonhofer E. et al. Infrastructure-based digital twins for cooperative, connected, automated driving and smart road services // IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems. 2023; 4: C. 311-324. DOI: <https://doi.org/10.1109/OJITS.2023.3266800>
2. Свистельников А.А. [и др.] Востребованность испытаний и исследований интеллектуальных транспортных систем и отдельных ее элементов, в том числе направленных на обеспечение движения высокоматематизированных транспортных средств // Транспортное дело России. 2024. № 4. С. 188–191. EDN QNPAKW.
3. Диденко Д.Н. Цифровая трансформация сферы транспорта и дорожного хозяйства России // Вестник науки. 2024. Т. 2, №12 (81). С. 973–982.
4. Кравченко П.А., Плотников А.М., Олещенко Е.М. О цифровых технологиях обеспечения безопасности дорожного движения в Российской Федерации // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2018. № 4 (77). С. 12–16.
5. Ризаева Ю.Н. Государственная политика в области развития беспилотных систем // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2023. № 5. С. 11–19.
6. Комарова А.А., Акулова А.О. Паспортизация автомобильных дорог с использованием цифровых технологий и двойников // Московский экономический журнал. 2024. № 9 (6). С. 55–73. DOI 10.55186/2413046X_2024_9_6_279 . EDN SZRPLJ
7. Wu D. et al. Digital Twin Technology in Transportation Infrastructure: A Comprehensive Survey of Current Applications, Challenges, and Future Directions // Applied Sciences. 2025. № 15 (4). Article ID 1911. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15041911>
8. Акимов А.Е. [и др.] К вопросу о создании цифрового двойника для строительства автомобильной дороги // Системные технологии. 2023. № 4 (49). С. 25–34.
9. Чекина Е.В. Построение цифровых двойников автомобильных дорог в среде интеллектуальной транспортной геоинформационной системы // IT & Transport = ИТ & Транспорт: сб. науч. статей. 2021. С. 88.
10. Kušić K., Schumann R., Ivanjko E. A digital twin in transportation: Real-time synergy of traffic data streams and simulation for virtualizing motorway dynamics // Advanced Engineering Informatics. 2023. № 55: Article ID 101858. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101858>
11. Евстигнеев И.А., Шмыгинский В.В. Вопросы взаимодействия беспилотных транспортных средств с дорожной инфраструктурой // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2019. № 6 (85). С. 17–21.
12. Argota Sánchez-Vaquerizo J. Getting real: The challenge of building and validating a large-scale digital twin of Barcelona's traffic with empirical data // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2022. №11 (1). С. 24. <https://doi.org/10.3390/ijgi11010024>
13. Иванов С.А. [и др.] Концепция построения цифрового двойника города // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2020. № 9 (4): С. 5–23.
14. Hilmani A., Maizate A., Hassouni L. Automated real-time intelligent traffic control system for smart cities using wireless sensor networks // Wireless Communications and mobile computing. 2020. Article ID: 8841893, 28 с. <https://doi.org/10.1155/2020/8841893>
15. Бирюков Т.А., Иневаткина А.П. Умные дороги: влияние инновационных технологий V2X на безопасность и эффективность // Вестник науки. 2025. Т. 4, № 1 (82): С. 963–967.

REFERENCES

1. Thonhofer E., et al. (2023). "Infrastructure-based Digital Twins for Cooperative, Connected, Automated Driving and Smart Road Services." *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*, 4: 311-324. DOI: 10.1109/OJITS.2023.3266800
2. Svistel'nikov A. A., et al. Demand for Testing and Research of Intelligent Transport Systems and Their Individual Components, Including Those Aimed at Ensuring the Movement of Highly Automated Vehicles. *Transport Business of Russia* 2024; 4: 188–191. (In Russ.). EDN QNPAKW.
3. Didenko D.N. Digital Transformation of Russia's Transport and Road Sector. *Bulletin of Science*. 2024; 2(12)(81): 973-982. (In Russ.).
4. Kravchenko P.A., Plotnikov A.M., Oleshchenko E.M. On Digital Technologies for Ensuring Road Safety in the Russian Federation. *Transport of the Russian Federation: Journal on Science, Practice, Economics*. 2018; 4(77): 12-16. (In Russ.).
5. Rizaeva Yu.N. State Policy in the Development of Unmanned Systems. *Intelligence. Innovations. Investments*, 2023; 5: 11-19 (In Russ.).
6. Komarova A. A., Akulov A. O. Road Passortization Using Digital Technologies and Digital Twins. *Moscow Economic Journal*. 2024; 9 (6): 55–73. (In Russ.). DOI 10.55186/2413046X_2024_9_6_279 EDN SZRPLJ
7. Wu D., et al. Digital Twin Technology in Transportation Infrastructure: A Comprehensive Sur-

vey of Current Applications, Challenges, and Future Directions. *Applied Sciences*, 2025; 15(4): 1911. DOI: 10.3390/app15041911

8. Akimov A.E., et al. On the Creation of a Digital Twin for Road Construction. *System Technologies*. 2023; 4(49): 25-34. (In Russ.).

9. Chekina E.V. Building Digital Twins of Highways in an Intelligent Transport GIS Environment. *IT & Transport: Collection of Scientific Articles*. 2021; 88. (In Russ.).

10. Kušić K., Schumann, R., Ivanjko, E. A Digital Twin in Transportation: Real-time Synergy of Traffic Data Streams and Simulation for Virtualizing Motorway Dynamics. *Advanced Engineering Informatics*. 2023; 55: Article ID 101858. DOI: 10.1016/j.aei.2022.101858

11. Evstigneev I.A., Shmytinsky, V.V. Issues of Interaction Between Autonomous Vehicles and Road Infrastructure. *Transport of the Russian Federation: Journal on Science, Practice, Economics*. 2019; 6(85): 17-21. (In Russ.).

12. Argota Sánchez-Vaquerizo, J. Getting Real: The Challenge of Building and Validating a Large-scale Digital Twin of Barcelona's Traffic with Empirical Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2022; 11(1): 24. DOI: 10.3390/ijgi11010024

13. Ivanov S.A., et al. Concept for Building a City's Digital Twin. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Informatics*. 2020; 9(4): 5-23. (In Russ.).

14. Hilmani A., Maizate, A., Hassouni, L. Automated Real-time Intelligent Traffic Control System for Smart Cities Using Wireless Sensor Networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2020; Article ID 8841893. DOI: 10.1155/2020/8841893

15. Biryukov T.A., Inevatkina, A.P. Smart Roads: The Impact of V2X Innovative Technologies on Safety and Efficiency. *Bulletin of Science*. 2025; 4,1(82): 963-967. (In Russ.).

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Курбатов Д.С. Определение ключевых целей и задач с последующим проведением анализа существующих методик совершенствования цифровых двойников автомобильных дорог, отработка теоретического материала на практике на основе предложенных решений на участках дорожной сети.

Старostenко А.В. Тщательный подбор и изучение научной литературы по теме, всесторонняя оценка полученных данных, а также последующая систематизация результатов и формулировка итоговых выводов.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Kurbatov Dmitriy S. Defining key goals and objectives with the following analysis of existing methodologies for improving digital twins of highways, practical testing of theoretical materials on proposed solutions for the road network segments.

Starostenko Andrey V. Selection and review of scientific literature on the topic, comprehensive evaluation of the obtained data, systematization of the results and formulation of final conclusions.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Курбатов Дмитрий Сергеевич – аспирант кафедры «Транспортные системы и дорожно-мостовое строительство» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4), начальник отдела безопасности и диагностики организации дорожного движения АО «СТАР-Проект» (196084, г. Санкт-Петербург, Измайловский бульвар, д. 11, строение 1, помещение 29Н, кабинет 2).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5413-8878>,

e-mail: dimkur21@yandex.ru

Старostenко Андрей Владимирович – АО «ПО РосДорСтрой», ведущий специалист по сопровождению объектов (175400, г. Валдай, Комсомольский пр., д. 1 А), магистр Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, Москва, Ленинградский пр-т., 64).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3889-6489>,

e-mail: starostenko2637@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kurbatov Dmitriy S. – Postgraduate Student of the Department of Transport Systems and Road Bridge Construction, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Head of the Road Traffic Safety and Road Traffic Management Diagnostics Department «STAR-Project» JSC (2nd Krasnoarmeyskaya st., 4, St. Petersburg, 190005).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5413-8878>,

e-mail: dimkur21@yandex.ru

Starostenko Andrey V. – Leading specialist in facility maintenance, «RosDorStroy» JSC Production association, St. Petersburg, Russia, Master's degree, Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University-MADI (Leningradsky Prospekt, 64, Moscow, 125319)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3889-6489>

e-mail: starostenko2637@mail.ru

Научная статья

УДК 656.13

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-786-802>

EDN: ONDBUU



Check for updates

ЭВОЛЮЦИЯ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ НАЗЕМНОГО ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ Г. МОСКВЫ

P.B. Филиппова¹✉, И.А. Феньков²*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),**¹ГУП «Мосгортранс»,**г. Москва, Россия**²ГКУ «Организатор перевозок»,**г. Москва, Россия**✉ ответственный автор**filippovaRV@transport.mos.ru*

АННОТАЦИЯ

Введение. Ежедневно все виды городского пассажирского транспорта общего пользования г.Москвы перевозят около 17,81 млн пассажиров. В рамках реализации масштабной транспортной реформы, намеченной до 2030 г., планируется модернизация всех компонентов транспортной инфраструктуры. Целью реформы является повышение эффективности, безопасности и экологичности транспортной системы столицы.

Материалы и методы. В условиях глобальной турбулентности мероприятия по адаптации транспортной инфраструктуры, системы общественных перевозок и обеспечения оптимальных условий дорожного движения определяют путь устойчивого развития мегаполисов и их способность эффективно подстраиваться и к происходящим изменениям климата. В г. Москве выбран путь декарбонизации и перехода на низкоуглеродные виды транспорта – электробусы. Новые электробусы адаптированы к прогнозируемым климатическим изменениям, в том числе обеспечена техническая возможность безаварийной работы в диапазоне температур от -40 до + 40 0 С.

Результаты. В статье авторы анализируют перспективы и сложности внедрения данного вида транспорта в транспортную систему столицы с учетом технических, экологических и эксплуатационных особенностей самого подвижного состава и обеспечения соответствующей транспортной инфраструктуры. В статье также показаны пропускная способность и динамика развития зарядной инфраструктуры, в том числе ультрабыстрых зарядных станций. Для исключения сбоев в движении электробусов на маршрутах важно перераспределить транспортные средства по зарядным станциям, что позволит минимизировать риски простоев и образования очередей.

Обсуждение и заключение. В завершение статьи авторы определяют перечень основных мероприятий по адаптации транспортного комплекса г. Москвы к климатическим изменениям.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электробус, адаптация к изменениям климата, декарбонизация, выбросы парниковых газов, транспортная инфраструктура

Статья поступила в редакцию 29.08.2025; одобрена после рецензирования 07.10.2025; принята к публикации 21.10.2025.

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: Филиппова Р.В., Феньков И.А. Эволюция декарбонизации наземного городского пассажирского транспорта общего пользования г. Москвы // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 5. С. 786-802. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-786-802>

© Филиппова Р.В., Феньков И.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-786-802>

EDN: ONDBUU

DECARBONIZATION EVOLUTION OF GROUND URBAN PASSENGER TRANSPORT IN MOSCOW

Rimma V. Filippova¹✉, Ivan A. Fen'kov²

¹*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, State Unitary Enterprise "Mosgortrans", Moscow, Russia*

²*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, State Budgetary Institution "Organizer of Transportation", Moscow, Russia*

✉ corresponding author
filippovaRV@transport.mos.ru

ABSTRACT

Introduction. All types of urban public transport in Moscow carry about 17.81 million passengers on a daily basis. As part of the large-scale transport reform realization planned until 2030, it is intended to modernize all components of the transport infrastructure. The aim of the reform is to increase the efficiency, safety and environmental friendliness of the capital's transport system.

Materials and Methods. In the context of global turbulence, measures to adapt the transport infrastructure, public transportation systems, and ensure optimal traffic conditions determine the path for the sustainable development of megacities and their ability to adapt to climate change effectively. Moscow has chosen the way of decarbonization and the transition to low-carbon modes of transport - electric buses. The new electric buses are adapted to the predicted climate changes, including ensuring the technical possibility of trouble-free operation in the temperature range from -40°C to + 40 °C.

Results. In the article, the authors analyze the prospects and difficulties of introducing this type of transport into the transport system of the capital, taking into account the technical, environmental and operational characteristics of the rolling stock itself and the provision of appropriate transport infrastructure. The article also shows the flow capacity and dynamics of charging infrastructure development, including ultra-fast charging stations. To avoid disruptions in the movement of electric buses on routes, it is important to redistribute vehicles among charging stations, which will minimize the risks of downtime and queues.

Discussions and Conclusion. At the end of the article, the authors define a list of the main measures to adapt Moscow transport complex to climate change.

KEYWORDS: electric bus; climate change adaptation; decarbonization; greenhouse gas emissions; transport infrastructure

The article was submitted: August 29, 2025; approved after reviewing: October 7, 2025; accepted for publication: October 21, 2025.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Filippova R.V., Fen'kov I.A. Decarbonization evolution of ground urban passenger transport in Moscow. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22(5): 786-802. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-786-802>

© Filippova Rimma V., Fen'kov Ivan A., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Москва, площадью порядка 2,5 тыс. км², – один из крупнейших мегаполисов мира с 13-миллионным населением, характеризующимся плотной городской застройкой, развитой транспортной системой, промышленностью и коммунально-инженерной инфраструктурой.

По данным научных исследований, за последнее десятилетие в столице наблюдается усиление экстремальности климата: аномальная жара, создающая дополнительный риск заболеваемости и смертности населения; резкие изменения погоды и переходы через ноль; увеличение количества неблагоприятных метеорологических явлений; увеличение количества дней с ослабленными условиями рассеивания, которые приводят к повышению уровня загрязнения воздуха в городе¹ [1, 2]. Кроме того, вклад существующего транспорта в выбросы в атмосферу Москвы составляет более 80%, выбросы от транспорта составили 207 тыс. т в 2024 г. по причинам, связанным, в частности большим пробегом транспортных средств, высокой мощностью двигателя, использованием преимущественно дизельного топлива, старением автопарка машин. Вклад от автобусов в выбросы основных загрязняющих веществ составляет от 3 до 23%.

Так, в структуре автобусного парка городских перевозчиков и иных организаций г. Москвы, где доля автопарка крупнейшего городского перевозчика ГУП «Мосгортранс» составляет 22%, 74% автобусов используют в качестве основного топлива – дизельное.

В целях регулирования выбросов от автобусов в транспортной системе столицы принято решение о переходе городского наземного пассажирского транспорта на электробусы городских (комерческих) перевозчиков, оказывающих услуги перевозки на основании государственных контрактов.

Согласно Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 г., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 12 апреля 2025 г. № 908-р, в целевом сценарии развитие альтернативного транспорта будет способствовать сокращению темпов роста спроса на автомо-

бильный бензин и дизельное топливо и диверсификации автопарка за счет роста доли электротранспорта, автомобилей на газомоторном топливе и в перспективе на водородном топливе с 1 до 14%. При этом для повышения уровня использования электромобилей субъектам Российской Федерации рекомендуется установить минимальные доли таких автомобилей в составе парков транспортных средств перевозчиков, выполняющих регулярные перевозки пассажиров и багажа, и организаций с государственным участием (Методические рекомендации по стимулированию использования электромобилей и гибридных автомобилей в субъектах Российской Федерации, утвержденные распоряжением Минтранса России от 25 мая 2022 г. № АК-131-р).

Стабильность работы социально значимой транспортной системы во многом также зависит от многочисленных климатических показателей. Объекты транспортной системы по-разному подвержены воздействию различных климатических факторов. Влияние сезонных погодных перемен приводит к рискам нарушения работы транспортной инфраструктуры, режима ее функционирования и безопасности дорожного движения². В таблице 1 предоставлено воздействие климатических факторов на городской пассажирский транспорт Москвы.

Цель научных исследований авторов – снижение уязвимости транспортной системы г. Москвы к происходящим изменениям климата в условиях высокого загрязнения окружающей среды и чрезмерного потребления природных ресурсов.

Задачи, поставленные авторами в данной статье:

Показать влияние изменяющихся климатических факторов на транспортную систему г. Москвы. В частности, наземного городского пассажирского транспорта.

Представить в графическом виде зависимость задержек движения (в % от плана рейсов) от температурного режима воздуха за определенный период времени.

Выявить зависимость потерь по бракам электробусов от температуры воздуха.

¹ План мероприятий по адаптации города Москвы к климатическим изменениям. Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы, г. Москва, 2023, с. 3.

² План мероприятий по адаптации города Москвы к климатическим изменениям. Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы, г. Москва, 2023, с. 23.

Таблица 1

Воздействие различных климатических факторов на транспортные системы г. Москвы
Источник: составлено авторами.

Table 1

Impact of various climatic factors on Moscow transport systems
Source: compiled by the authors.

Вид транспорта (объект влияния)	Климатический фактор	Неблагоприятное воздействие
Легковой пассажирский транспорт	Экстремальные температуры, волны жары, «застои» воздуха, повышенное содержание загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, неблагоприятная роза ветров, шквалистый ветер, сильный снегопад, ливневые осадки, град, подтопление территорий, наводнения, сильный ветер, снег с дождем, увеличение эрозии почвы, гололед, изморозь, ураган	Рост потребления топлива для кондиционирования
		Ухудшение условий дорожного движения
		Повреждение автомобилей
Наземный городской пассажирский транспорт общего пользования	Экстремальные температуры, волны жары, «застои» воздуха, повышенное содержание загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, неблагоприятная роза ветров, шквалистый ветер, сильный снегопад, ливневые осадки, град, подтопление территорий, наводнения, сильный ветер, снег с дождем, увеличение эрозии почвы, гололед, изморозь, ураган	Рост нагрузки на НГПТ ОП вследствие невыезда части личного легкового парка, в том числе каршеринга. Увеличение интервалов движения, сбои в графике движения
		Повреждение подвижного состава, дорожного полотна и транспортной инфраструктуры
		Сбои в графике движения
		Деформация рельсов
		Рост рисков разрыва проводов из-за налипания снега и наледи
		Затруднение или прекращение движения в результате преграждения дорожного полотна упавшими конструкциями и деревьями, повышение рисков ДТП, разрыв питающих проводов
Рельсовый транспорт		

Определить детальное распределение потока ТС на зарядной станции в будние дни в часы пик.

Провести анализ плановых расписаний для маршрутов электробусов и определить максимальное количество ТС, которые возможно заряжать на 1 УБЗС.

Показать значимость и необходимость разработки и реализации дополнительных мер по сокращению уязвимости транспортной системы от влияния погодно-метеорологических и климатических факторов.

Оценка климатических рисков в отраслях экономики осуществляется в рамках отраслевых планов адаптации. В отношении объектов транспортной инфраструктуры планом адаптации в области транспорта, утвержденным приказом Минтранса России от 02.03.2022 № 69, предусмотрено утверждение отраслевой методики расчета рисков и оценки послед-

ствий изменения климата, а также формирование перечня объектов транспортной инфраструктуры федерального значения, уязвимых к последствиям изменения климата. Данная методика до настоящего времени не утверждена. Соответственно, вопросы адаптации транспортных систем городов к изменениям климата являются предметом научных и экспериментальных исследований. Моделирование качественных и количественных выгод и ущерба транспортной инфраструктуре и деятельности городского пассажирского транспорта г. Москвы от климатических изменений как комплексный инструмент позволит оценить существующие и последующие результаты климатических изменений на транспортную систему столицы и принимать взвешенные заголовочные решения с учетом климатических рисков.

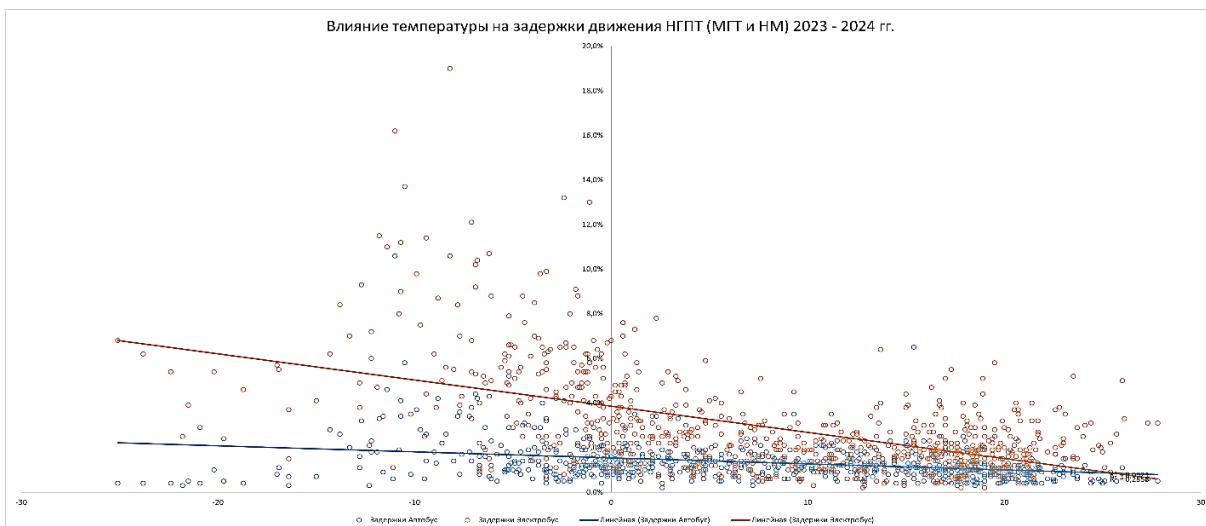


Рисунок 1 – Влияние температуры на задержки движения НГПТ в г. Москве
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Temperature influence on delays of ground urban passenger transport in Moscow
Source: compiled by the authors.

В статье авторы показывают, что одной из практических выгод может выступать научный подход к анализу маршрутов и статистики потерь по задержкам движения в результате изменений климата, по итогам которого может проводиться эффективная корректировка перераспределения выпуска транспортных средств между маршрутами и зарядными станциями без дополнительных затрат.

Основные климатические факторы г. Москвы, оказывающие влияния на количество ДТП: количество дней с экстремально высокими и низкими температурами; количество дней с резкими перепадами температуры; дни с осадками $> 0,1$ мм; дни с метелью, с гололёдом, с дымкой, с грозой и ливневыми осадками³.

Общая корреляция зависимости показала, что влияние изменяющихся климатических факторов на возникновение ДТП, задержек и сбоев в движении наземного городского пассажирского транспорта является умеренным, но свидетельствует о необходимости дополнительных мер по сокращению уязвимости транспортной системы от влияния погодно-метеорологических и климатических факторов.

На рисунке 1 представлена зависимость потерь по задержкам движения (в % от плана

рейсов) от температуры (в градусах по оси X) за 2023–2024 гг.

График построен в разрезе видов ТС: автобус (дизельные и газовые) и электробус. Каждая точка на графике – процент потерь в определенный день при средней температуре в этот день. Линия на графике – общий тренд. На графике можно наблюдать точки с высоким % задержек, связанных с различными погодными аномалиями (снегопады, обильные дожди и т.п.), а также событиями в городе, не связанными с погодой (перекрытия, ремонты и т.п.). Так, например, 13.12.2023 г. (процент задержек по электробусам – 13,7%) был обильный снегопад, что вызвало аномальные пробки в городе. Несмотря на локальные точки аномального роста задержек, общий тренд показывает, что зависимость задержек движения автобусов от температуры незначительная. Прослеживается зависимость задержек на электробусах от температуры (чем теплее, тем меньше сбоев). Основная причина – сбои в работе УБЗС⁴ [5].

Кроме того, температура воздуха влияет на такое событие как потери по техническим причинам и на рисунке 2 отражена данная зависимость температуры (в градусах по оси X) от потерь по технике (% от плана рейсов по оси Y) за 2023–2024 гг.

³ План мероприятий по адаптации города Москвы к климатическим изменениям. Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы, г. Москва, 2023г., с. 7.

⁴ Внутренний отчет Транспортного комплекса города Москвы за 2024 год, г. Москва, с.33.

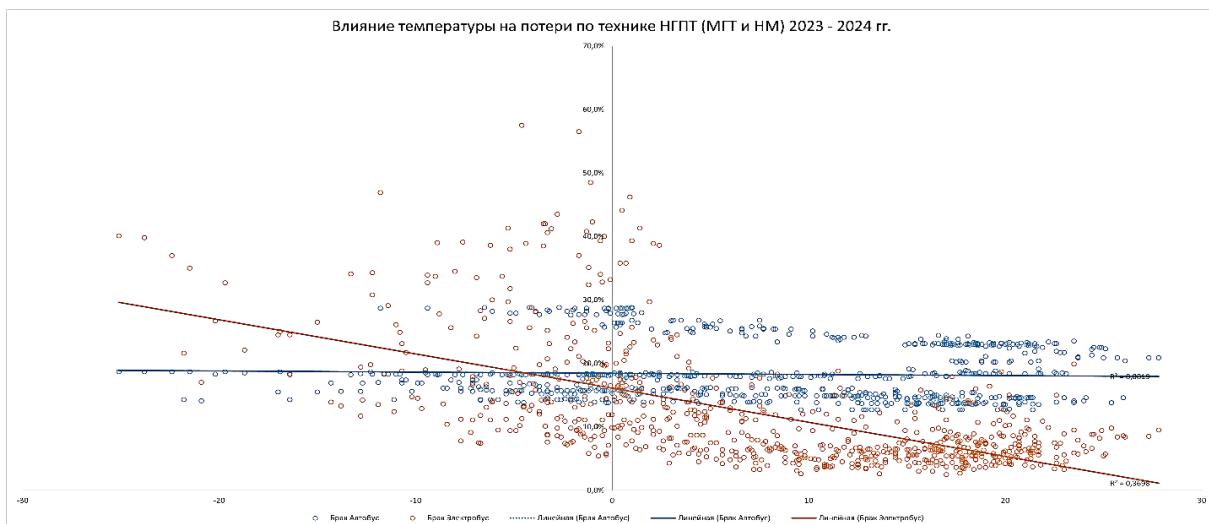


Рисунок 2 – Влияние температуры на потери по технике НГПТ в г. Москве
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Temperature influence on losses of ground urban passenger transport in Moscow
Source: compiled by the authors.

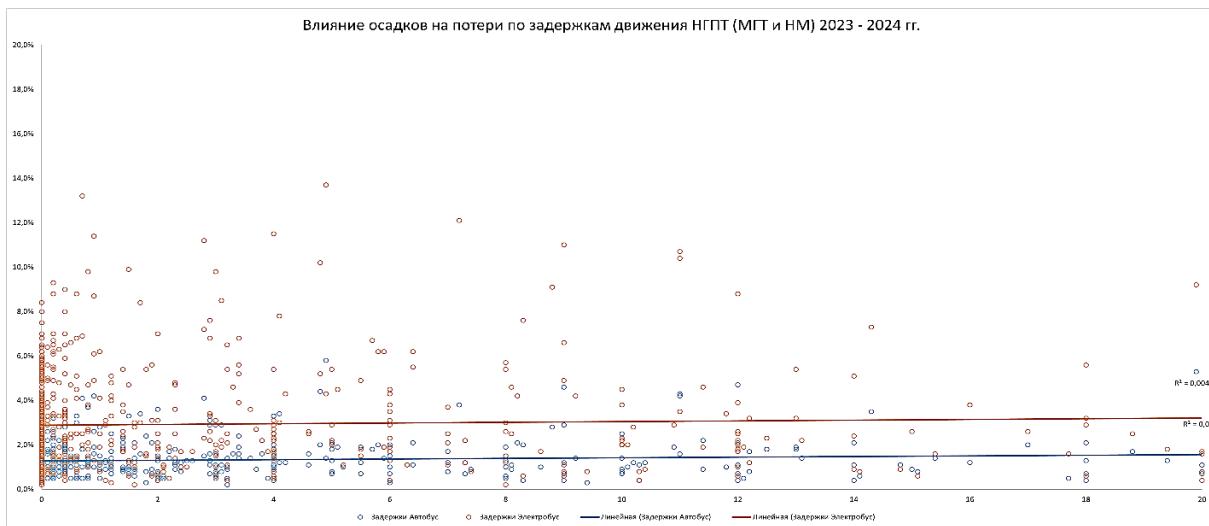


Рисунок 3 – Влияние осадков на потери по задержкам движения НГПТ в г. Москве
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Precipitation influence on losses because of the delays of ground urban passenger transport in Moscow
Source: compiled by the authors.

График построен в разрезе видов ТС: автобус (дизельные и газовые) и электробус. Каждая точка на графике – процент потерь в определенный день при средней температуре в этот день. Линия на графике – общий тренд. На графике можно наблюдать точки с высоким % потерь по технике, связанных с различными погодными аномалиями (снегопады, обильные дожди и т.п.) и другими причинами. Так, например, 19.12.2024 г. (процент потерь по технике у электробусов – 46,9%, у автобусов

– 28,7%) был снегопад и гололедица, что вызвало аномальные пробки в городе. Несмотря на локальные точки аномального роста потерь по браку, общий тренд показывает, что зависимость потерь по бракам автобусов от температуры незначительная. Прослеживается зависимость потерь по бракам электробусов от температуры (чем теплее, тем меньше сбоев). Возможные причины – сбои в работе батареи и электроники⁶.

Такие погодные явления как осадки (снегопады, обильные дожди и т.п.) также могут влиять на движение наземного городского транспорта, что демонстрирует рисунок 3.

На графике «Влияние осадков на потери по задержкам движения НГПТ» представлена зависимость количества осадков (в мм по оси X) от потерь по задержкам движения (%) от плана рейсов по оси Y) за 2023–2024 гг. Анализ зависимости потерь по бракам от осадков не проводился, так как зависимость данных показателей слабая. График построен в разрезе видов ТС: автобус (дизельные и газовые) и электробус. Каждая точка на графике – процент потерь в определенный день при суммарном количестве осадков в этот день. Линия на графике – общий тренд. Зависимость задержек движения от осадков не прослеживается на большом промежутке времени. Есть локальные зависимости, например, в периоды, когда осадки вызывают подтопления улиц или сильные снегопады вызывают пробки, но на общей линии тренда это не сказывается.

Также комплекс неблагоприятных климатических факторов оказывает существенное влияние на здоровье человека. Каждый фактор отдельно или комбинация нескольких могут усугубить течение имеющихся заболеваний: органов дыхания, инфекционных, сердечно-сосудистой системы, пищеварительной системы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Способность мегаполисов адаптироваться к происходящим изменениям климата в условиях высокого загрязнения окружающей среды и чрезмерного потребления природных ресурсов существенно определяет путь их дальнейшего устойчивого развития. В части городских транспортных систем современные мегаполисы выбирают путь масштабного внедрения низкоуглеродного транспорта – электробусов⁵ [3, 4, 5].

Новые электробусы, эксплуатируемые в городе Москве, адаптированы к прогнозируемым климатическим изменениям, в том числе обеспечена техническая возможность безаварийной работы в диапазоне температур от -40 до + 40 ° С [6].

Внедрение такого вида наземного городского пассажирского транспорта становится

одним из приоритетных направлений модернизации транспортной системы. Среди ключевых технологических преимуществ электробусов и идентификации электробусов с точки их экологических характеристик стоит отметить отсутствие прямых выбросов углекислого газа и других загрязняющих веществ, низкий уровень шума, более простое техническое обслуживание и их высокую энергоэффективность.

Согласно исследованиям отечественных специалистов в области электротранспорта электробусы обладают значительным потенциалом для решения транспортных проблем мегаполисов [5, 7, 8].

Комплексное изучение практического применения электробусов, включающее все возможные проекты внедрения в различных климатических условиях, параметры эксплуатации, специфику их технического обслуживания, а также особенности зарядной инфраструктуры, позволяет сформировать понимание потенциала внедрения и развития электробусов в мегаполисах [9, 10, 11].

После запуска электробусного маршрута проводится мониторинг по нескольким показателям, таким как выполнение транспортной работы, пунктуальность и пассажиропоток. Так, например, в результате анализа маршрута и статистики потерь по задержкам движения проводится корректировка скорости на маршруте, что позволяет либо повысить эффективность, либо уровень сервиса (в случае корректировки с целью снижения потерь). Другой вариант корректировки расписания – это перераспределение выпуска между маршрутами, например, при инфраструктурных изменениях и изменениях городской застройки.

При переходе на электробусы необходимо учитывать особенности формирования расписания, поэтому важно принимать в расчет потери производственного времени на зарядку, так как может потребоваться увеличение выпуска на маршруте для сохранения сервиса при переходе на электробусы.

В последние годы наблюдается рост внедрения электробусов в транспортную систему столицы [6, 9, 11]. На рисунке 4 представлена динамика ввода электробусов в транспортную систему г. Москвы.

⁵ Внутренний отчет Транспортного комплекса города Москвы за 2023 год, г. Москва, с.17, с. 25.

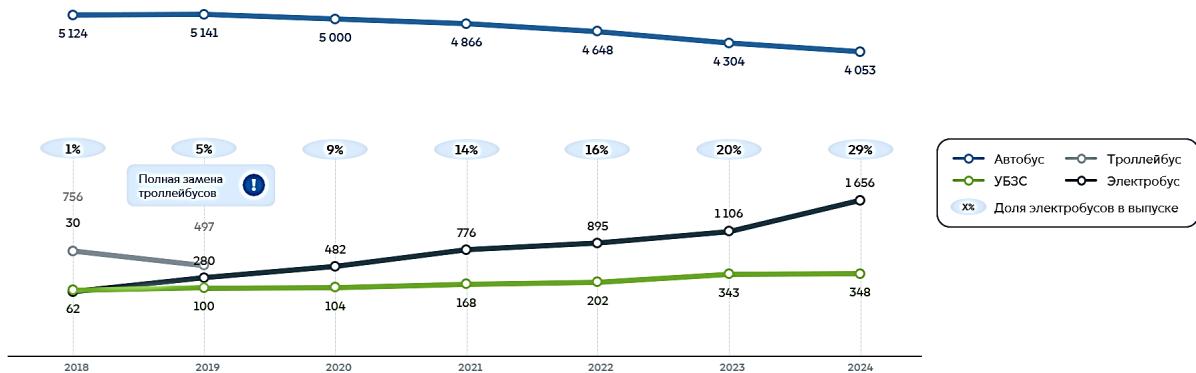


Рисунок 4 – Динамика роста количества электробусов в г. Москве
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Growth dynamics of the number of electric buses in Moscow
Source: compiled by the authors.

Ежедневно в г. Москве на маршруты выходит свыше 2 350 электробусов, обслуживающих 217 маршрутов общей протяженностью более 3000 км, где среднесуточный пассажиропоток 1 млн чел., а с начала работы количество перевезенных пассажиров составляет более 500 млн чел^{6, 7}.

В планы развития электробусного парка до 2030 г. входит значительное расширение парка до 6000 ед. транспортных средств, что предполагает увеличение существующего парка на 3 700 электробусов. Для более эффективного внедрения новых единиц необ-

ходимо грамотно выстраивать и планировать будущую маршрутную сеть.

Вместе с тем появляется потребность в развитии и модернизации зарядных станций. В 2025 г. функционирует 57 зарядных станций, представленных на рисунке 5, девять из которых размещены на эксплуатационных площадках; 48 на отстойно-разворотных площадках (далее – ОРП). Общее количество ультрабыстрых зарядных станций (далее – УБЗС) составляет 393 ед. с общей мощностью свыше 177 МВт^{8, 9}.

⁶ Внутренний отчет Транспортного комплекса города Москвы за 2024 год, г. Москва, с. 37-39.

⁷ Официальный портал ГУП «Мосгортранс» <https://mosgortrans.ru>.

⁸ План мероприятий по адаптации города Москвы к климатическим изменениям, Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы, 2023г., г. Москва, с. 3-5.

⁹ Единый транспортный портал <https://transport.mos.ru>.

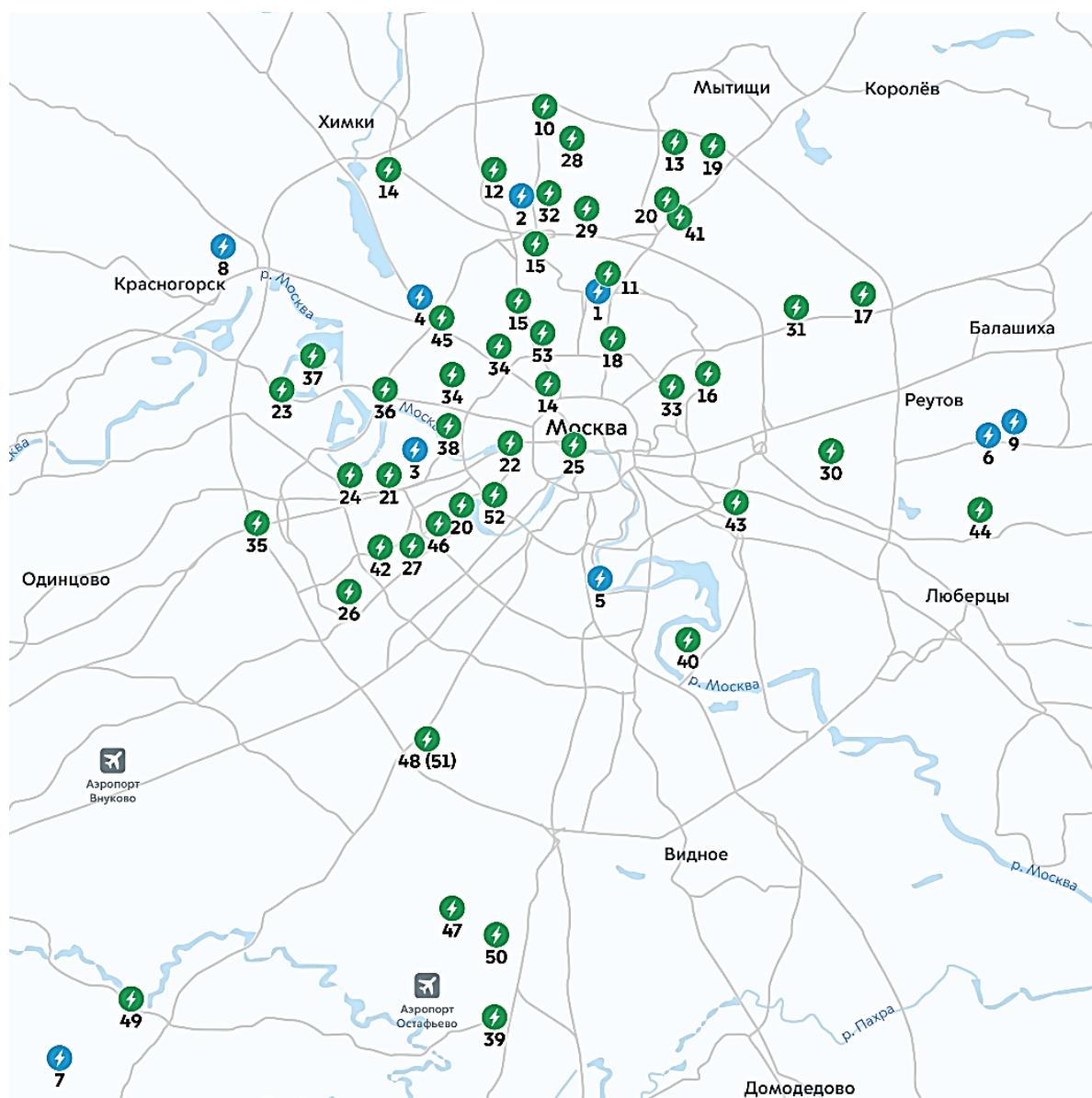


Рисунок 5 – Зарядные станции г. Москвы
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Charging stations in Moscow
Source: compiled by the authors.

Несмотря на постепенный переход на электробусы, дизельные автобусы на сегодняшний день составляют значительную часть общественного городского транспорта г. Москвы, что в свою очередь делает АЗС востребованными. Анализ эффективности работы АЗС показывает, что существуют ограничения по пропускной способности в сравнении с зарядными станциями, что включает в себя непосредственное участие водителя транспортного средства,

ограниченность в маневрировании и неравномерное распределение потока в течение транспортных суток, а также производительность топливораздаточных колонок.

Статистика работы зарядных станций и АЗС показывает преимущество и более высокую пропускную способность зарядных станций благодаря правильно спланированной инфраструктуре станции и быстрой зарядке¹⁰.

¹⁰ Внутренний отчет Транспортного комплекса города Москвы. за 2024 год, г. Москва, с.43.



Рисунок 6 – схема ОРП «МЦД Курьяново»
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Figure 6 – Layover and turnaround areas' scheme (Moscow Central Diameter “Kuryanovo”)
Source: compiled by the authors.

Применив метод статического анализа данных, удалось установить корреляцию между количеством зарядных станций и количеством ТС на отдельно взятой ОРП.

Например, на ОРП «Митино» суммарная мощность составляет 3 300 кВт, где ультрабыстрый режим работы станции выдает максимально 300 кВт и требуемое время на зарядку электробусов – 30 мин (от 0 до 100%), а в ночном режиме поступает максимально 15,7 кВт и время зарядки составляет до 8 ч (от 0 до 100%).

На рисунке 6 представлена схема ОРП «МЦД Курьяново». Вместе с тем на рисунке 7 отображено плановое распределение потока ТС по часам суток в рабочий день (загруженность станции в определенные часы, шаг – один час с 09:00). Например, в часы с 07:00 до 08:00 выявлены существенные пики загруженности. В указанный период зафиксировано максимальное количество ТС – 6 ед.¹¹ Детальное распределение потока ТС на зарядной станции в будние дни за период с 06:00 по 08:30 представлено на рисунке 8.

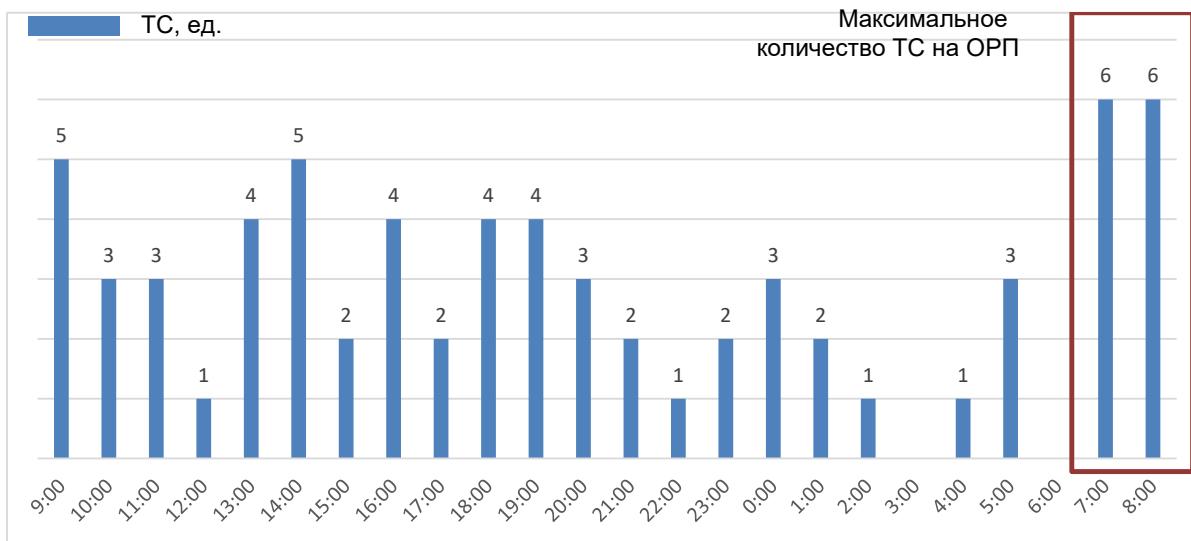


Рисунок 7 – Распределение потока по часам суток (в будние дни)
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Hourly flow distribution (on weekdays)
Source: compiled by the authors.



Рисунок 8 – Распределение потока с 07:00 по 09:00 (в будние дни)
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Flow distribution from 7:00 a.m. to 9:00 a.m. (on weekdays)
Source: compiled by the authors.

На основании вышеописанного метода проведен аналогичный анализ распределения количества маршрутов и ТС по зарядным станциям на всех ОРП, представленных в таблице 2.

Таблица 2
Распределение маршрутов и ТС на зарядные станции Москвы
Источник: составлено авторами.

Table 2
Distribution of routs and vehicles among Moscow charging stations
Source: compiled by the authors.

Адрес	Количество маршрутов	Количество ТС	Количество УБЗС	Нагрузка на 1 УБЗС
Эксплуатационная площадка «Нагорная» (Электролитный проезд, д. 4)	9	59	9	7
Эксплуатационная площадка «Митино» (ул. Зенитчиков, д. 2, к. 2)	9	84	37	6
(Осташковская улица) Чечёрский пр., д. 43	9	49	11	5
(Метро «Ломоносовский проспект») Ломоносовский пр-т, д. 28	8	38	6	6
Саратовская ул., д. 18/10, стр. 1 (ОРП «ул. Саратовская»)	8	56	12	5
ул. Подольская, д. 18 (ул. Донецкая, д. 5) (ОРП «МЦД Курьяново»)	7	47	7	7
Осташковская ул. (Осташковская ул., д. 20)	6	52	7	7
Эксплуатационная площадка «Останкино» (ул. Бочкова, д. 10)	6	56	9	6
Стадион Лужники (Новолужнецкий проезд, д. 3)	6	62	10	6
Метро Тёплый Стан Новоясеневский проспект, 4Б	6	42	8	5
Эксплуатационная площадка «Новокосино» ул. Галины Вишневской, д. 7, стр. 1	6	46	13	4
6-й мкр. Бибирева (Алтуфьевское шоссе, д. 102)	5	43	5	9
ВДНХ (южн.) (1-я Останкинская ул., д. 57)	5	71	9	8
ул. Лухмановская, д. 37 (ОРП «9-й мкр. Кожухова»)	5	35	5	7
Киевский вокзал (площадь Киевского вокзала)	5	57	9	6
Рижский вокзал (Рижская пл., д. 7)	5	29	6	5
Дворец спорта «Сокольники» (Сокольнический вал, д. 17)	5	19	9	5
(Троицк микрорайон «В») Троицк, микрорайон В, д. 12а	5	34	8	4
3-й мкр. Новокосино (ул. Николая Старостина, д. 15)	4	32	4	8
Платформа «Новогиреево» (Перовская ул., д. 70)	4	27	4	7
(Серебряный бор) Таманская улица, 33	4	58	11	5
(МЦД Аминьевская) Аминьевское ш., д. 4Д, корп. 3а	4	39	11	5
(Беляево) Миклухо-Маклая ул., 22а	4	34	7	5
«Ивановское» (Саянская ул., д. 22а)	4	17	4	4
Эксплуатационная площадка «Красная Пахра» (поселение Краснопахорское, квартал № 92, д.1)	4	31	34	3
пос. Московский, дер. Саларьево, Картмазовская ул., 50	4	18	12	2
Метро «Филёвский парк» (Минская ул., д. 16а)	3	15	2	8
Метро «Бибирево» (Костромская ул., д. 20)	3	28	4	7
Эксплуатационная площадка «Верхние Лихоборы» (Верхнепихорская ул., д. 4)	3	27	4	7
Метро «Озёрная» (ул. Озерная, д. 33, к. 2)	3	34	6	6
Карамышевская набережная, 9	3	32	6	5
Крылатское (ул. Крылатские холмы, д.38, к.3)	3	15	3	5
Метро «Сокол» (Ленинградский пр-т, д. 73А, стр. 3)	3	22	5	4
Эксплуатационная площадка «Сокол» (Ленинградское шоссе, д. 4, с. 1)	3	17	4	4

Адрес	Количество маршрутов	Количество ТС	Количество УБЗС	Нагрузка на 1 УБЗС
Эксплуатационная площадка «Фили» (ул. Дениса Давыдова, д. 2)	3	33	8	4
Станция МЦД Щербинка (Щербинка, Бутовский тупик, д. 1, корп. 2)	3	11	4	3
МЦД «Остафьево»	3	19	12	2
Уссурийская ул. (Алтайская, д. 21, стр. 1)	2	23	3	8
Холмогорская ул. (ул. Холмогорская д. 1)	2	30	4	8
«Вагоноремонтная» «МЦД Ляназово» ДСК-1 Дмитровское шоссе, д. 155 (Дмитровское шоссе, д. 114А, стр.1)	2	22	3	7
ОРП Р5 Сколково (Большой бульвар, д. 5)	2	14	2	7
«Генерала Ермолова» Метро «Парк Победы» (ул. Неверовского, д.13)	2	36	6	6
Метро «Владыкино» (Сигнальный проезд. д. 6а)	2	17	3	6
Москва-Сити (ул. Тестовская, д. 9)	2	19	4	5
Проспект Будённого (Измайловское шоссе, д. 4а)	2	16	4	4
Эксплуатационная площадка «Салтыковка» Салтыковская улица, 55, с. 1	2	18	13	3
Электрозводский мост (ул. Электрозводская, д. 1)	1	13	2	7
Северянинский путепровод (пр. Мира, д. 222А, стр.9)	1	17	3	6
Ул. Кравченко (ул. Кравченко, д. 22)	1	14	3	5
Бескудниковский переулок (Бескудниковский бульвар д. 13)	1	8	2	4
Базовская ул. (Коровинское шоссе, д. 30а)	1	16	5	3

Средняя нагрузка по количеству электробусов на 1 УБЗС составляет 5 ед. Вместе с тем максимальное количество равно 9 ед., минимальное – 2. Выявленная неравномерность соотношения показателей обусловлена неравномерностью маршрутной сети и возможностью территориального размещения и строительства УБЗС из-за сложившейся плотной застройки г. Москвы. На основании анализа плановых расписаний для маршрутов электробусов установлено максимальное количество ТС, которые возможно заряжать на 1 УБЗС, что составляет 9.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В рисунке 9 представлено соотношение количества электробусов по расписанию на 1 УБЗС и количественное распределение на всех ОРП г. Москвы.

Проанализировав количественное распределение электробусов как на уровне отдельных УБЗС, так и в целом по всем ОРП города Москвы, можно сделать вывод о текущем состоянии парка электробусов.

На существующих ОРП г. Москвы для действующих маршрутов электробусов имеется существенный резерв по количеству ТС, ко-

торые возможно заряжать на установленных УБЗС, что позволит не только эффективно обслуживать текущий парк электробусов, но и обеспечивать планомерное увеличение количества ТС.

Полученный резерв способствует полному отсутствию очередей и простоев электробусов. Однако существуют определенные риски и потенциальные проблемы, способные нарушить стабильную работу. Нарушение работы одной или несколько УБЗС на ОРП, снижение напряжения в сети, технические сбои в системе управления, неравномерное распределение нагрузки и другие аварийные ситуации. Даже один из перечисленных выше сбоев может привести к серьезным нарушениям в соблюдении расписания маршрутов и требует оперативного регулирования.

Для исключения сбоев в движении транспортных средств на маршрутах важно перераспределять электробусы по зарядным станциям при работе на маршрутах регулярных перевозок, что позволит минимизировать риски простоев и образования очередей. Вместе с тем важно обеспечивать оперативное реагирование на сбои, включая корректировку трасс следования маршрутов.

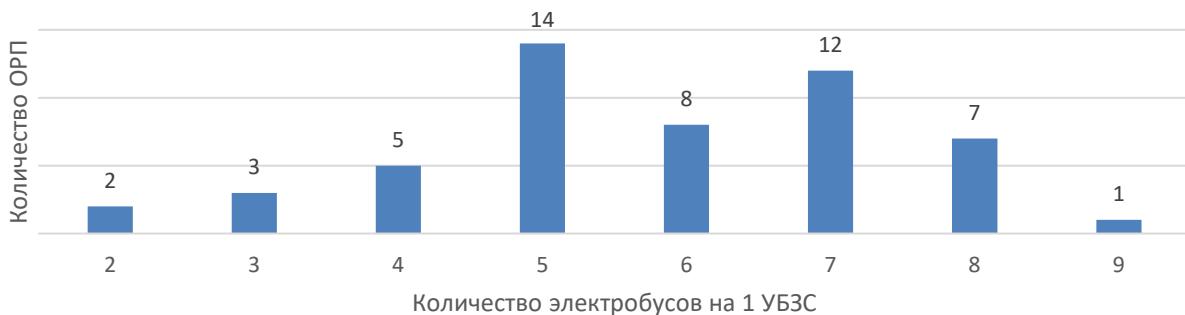


Рисунок 9 – Соотношение количества электробусов на 1 УБЗС г. Москвы
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Ratio of electric buses per one ultra-fast charging station in Moscow
Source: compiled by the authors.

Современные мегаполисы, стремясь к сокращению выбросов углекислого газа в атмосферу и улучшению качества воздуха, активно внедряют электробусный транспорт в свои транспортные системы [3, 5, 8, 13].

Научные исследования подтверждают, что в связи с изменением климата транспортный сектор будет уязвимым как по отношению к экстремальным метеорологическим и природным явлениям, так и к «вялотекущим» неблагоприятным процессам. Ключевыми проблемами для г. Москвы, возникающими вследствие меняющегося климата, являются зимнее содержание дорог, повышение температуры и длительные периоды жары, которые вызывают размягчение асфальтового покрытия и приводят к учащенным отказам транспортного оборудования [13]. Безопасность и бесперебойность дорожного движения также зависит от климатических условий.

Проведен детальный анализ распределения количества маршрутов и ТС по зарядным станциям на всех ОРП. Результаты представлены в таблице 2 «Распределение маршрутов и ТС на зарядные станции г. Москвы».

На основании анализа плановых расписаний для маршрутов электробусов установлено максимальное количество ТС, которые возможно заряжать на 1 УБЗС.

Авторы показывают, что выбор приоритетов инвестиций в адаптацию определяется их эффективностью, рассчитываемой не через соотношение предотвращенного ущерба и потерь и вложений в реализацию проекта, а через соотношение суммы (совокупных) выгод (доходов) от реализации управлеченческих и технических решений, включая выгоды адаптации, с одной стороны, и величины указанных вложений, с другой стороны.

Утверждение отраслевой методики расчета рисков и оценки последствий для объектов транспортной инфраструктуры прогнозируемых климатических изменений в данном случае выступит эффективным экономическим инструментом реализации мероприятий по оценке климатических рисков, организации транспортной работы, реализации технологий транспортных процессов, проектирования, строительства и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры с учетом изменения климата.

В графическом виде представлена и описана зависимость задержек движения (в % от плана рейсов) от температурного режима воздуха за определенный период времени.

В графическом виде представлена и описана зависимость потерь по бракам электробусов от температуры воздуха. Также описаны возможные причины сбоев.

Определено и наглядно показано детальное распределение потока ТС на отдельно взятой зарядной станции в будние дни в часы пик.

Установлена корреляция между количеством зарядных станций и количеством ТС на отдельно взятой ОРП Москвы.

Выявлены причины неравномерности соотношения показателей нагрузки по количеству электробусов на 1 УБЗС.

Доказана необходимость разработки и реализации дополнительных мер по сокращению уязвимости транспортной системы от влияния погодно-метеорологических и климатических факторов.

Представлены конкретные мероприятия, которые должна содержать система мероприятий г. Москвы по адаптации транспортного комплекса к климатическим изменениям.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основы перехода на низкоуглеродный транспорт представляют собой комплексный подход, включающий развитие зарядной инфраструктуры, модернизацию системы управления транспортом и подготовку кадров. Ключевым фактором успешного внедрения является стратегическое планирование, учитывавшее специфику города, пассажиропоток и особенности транспортной сети. Вместе с тем необходимо отметить, что переход на электробусы требует значительных первоначальных инвестиций, но в долгосрочной перспективе обеспечивает существенную экономию благодаря снижению эксплуатационных расходов и уменьшению затрат на обслуживание.

Система мероприятий г. Москвы по адаптации транспортного комплекса к климатическим изменениям должна содержать такие мероприятия, как развитие системы быстрого оповещения о приближении опасных погодных явлений; оптимизацию вывода на линию подвижного состава общественного транспорта для компенсации роста пассажиропотока при неблагоприятных климатических явлениях; совершенствование методов борьбы с наледью; снижение скоростных лимитов на магистралях; ограничение движения грузовых транспортных средств; развитие системы информирования населения об экстремальных погодных условиях с рекомендациями по снижению воздействия; рекомендации по удаленной работе; активная работа с транспортным поведением населения.

Моделирование качественных и количественных выгод и ущерба транспортной инфраструктуре и деятельности городского пассажирского транспорта от климатических изменений является предметом исследований как комплексный инструмент, который позволит оценить существующие и последующие результаты климатических изменений на транспортную систему столицы и принимать взвешенные заблаговременные решения с учетом климатических рисков.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Брижанин В.В., Киселева С.П., Филиппова Р.В., Остах С.В. Перспективы углеродного регулирования в России и повышение ответственности и вовлеченности предприятий в деятельность по сокращению выбросов парниковых газов // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. 2023. № 20(2). С. 130–142.

2. Cars, planes, trains: where do CO₂ emissions from transport come from? <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport> (дата обращения: 06.08.2025 г.)

3. Маслов А.А., Сазонов С.Л. Планы руководства Китая по достижению углеродной нейтральности к 2060 г. // Большая Евразия: развитие, безопасность, сотрудничество. 2022. № 5 (1). <https://cyberleninka.ru/article/n/plany-rukovodstva-kitaya-podostizheniyu-uglerodnoy-neytralnosti-k-2060-g> (дата обращения: 08.08.2025 г.)

4. Воробьев С.А. Перспективы развития автомобильного транспорта на альтернативной энергетике: монография. СПб.: Наукомкие технологии. 2023. 122 с.

5. Анализ рынка электробусов Великобритании: «Общество производителей и продавцов автомобилей». 2023. <https://www.smmt.co.uk/2023/07/uk-electric-bus-registrations> (дата обращения: 17.08.2025 г.).

6. Терентьев В.В. Внедрение интеллектуальных систем на автомобильном транспорте. Надежность и качество сложных систем. 2018. № 1 (21), 2018. <https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-intellektualnyh-sistem-na-avtomobilnom-transporte/viewer> (дата обращения: 17.08.2025 г.).

7. Jittrapirom P., Marchau V., Heijden R. Dynamic adaptive policymaking for implementing Mobility-as-a Service (MaaS). Research in Transportation Business & Management. 2018. 27: 46-55/ 10.1016/j.rtbm.2018.07.001 (дата обращения: 11.08.2025г.)

8. Ruf Y., Kaufmann M., Lange S., Heieck F., Endres A., Pfister J. Fuel Cells and Hydrogen Applications for Regions and Cities: Cost analysis and high-level business case // Brussels and Frankfurt. 2017. Vol. 2.

9. Golbabaei F., Yigitcanlar T. & Bunker J. The role of shared autonomous vehicle systems in delivering smart urban mobility: A systematic review of the literature // International Journal of Sustainable Transportation. 2021. 15. pp. 731-748.

10. Shen P. Building retrofit optimization considering future climate and decision-making under various mindsets // Journal of Building Engineering. 2024. V. 96. P. 110422. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110422> (дата обращения: 08.08.2025г.)

11. Glasgow's strategy for creating low-emission zones: Glasgow City Council. 2023, <https://www.glasgow.gov.uk/lowemissionzone> (дата обращения: 11.08.2025 г.)

12. Тематическое исследование Northumberland Park Depot: «Актуальные новости». 2023. <https://www.current-news.co.uk/londons-largest-electric-bus-depot> (дата обращения: 11.08.2025 г.)

13. Брижанин В.В., Филиппова Р.В., Сударикова Е.В., Судариков М.Д. Вклад Российской Федерации в сокращение выбросов парниковых газов: механизмы регулирования и современное технологическое решение их реализации // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. 2022. №19 (5): 125.

14. Kai L., Zhe L., Hong G., Meng Z. Optimal charging strategy for large-scale electric buses considering resource constraints. // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2021,

99. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103009> (дата обращения: 11.08.2025 г.)
15. Спирин И.В. Инвестиционные аспекты развития парка подвижного состава // Вестник университета (Гос. университет управления). Серия «Развитие отраслевого и регионального управления». 2007. № 1(1).
16. Звонов В.А., Козлов А.В., Теренченко А.С. Экология: альтернативные топлива с учетом их полного жизненного цикла // Автомобильная промышленность. 2001. № 4.
17. Миренкова Е.А. Альтернативные моторные топлива из природного газа: энергетическая эффективность и экологические показатели в полном жизненном цикле // 8-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса: сборник трудов Международной научно-технической конференции. 2019. С. 152.

REFERENCES

- Brizhanin V.V., Kiseleva S.P., Filippova R.V., Ostakh S.V. Prospects of carbon regulation in Russia and increasing responsibility and involvement of enterprises in activities to reduce greenhouse gas emissions. *Bulletin of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2023; 20(2): 130-142. (In Russ.)
- Cars, planes, trains: where do CO₂ emissions from transport come from? <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport>.
- Maslov A.A., Sazonov S.L. Plans of the Chinese leadership to achieve carbon neutrality by 2060. *Greater Eurasia: development, security, cooperation*. 2022; 5 (1). (In Russ.). <https://cyberleninka.ru/article/n/plany-rukovodstva-kitaya-po-dostizheniyu-uglerodnoy-neytralnosti-k-2060-g>.
- Vorobyov S.A. Prospects for the development of motor transport on alternative energy. Monograph. St. Petersburg: Science-intensive technologies. 2023:122. (In Russ.).
- Analysis of the UK Electric Bus market: Society of Automobile Manufacturers and Sellers. 2023. <https://www.smmt.co.uk/2023/07/uk-electric-bus-registrations>.
- Terentyev V.V. The introduction of intelligent systems in road transport. *Reliability and quality of complex systems*. 2018; 1 (21). <https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-intellektualnyh-sistem-na-avtomobilnom-transporte/viewer>.
- Jittrapirom P., Marchau V., Heijden R. Dynamic adaptive policymaking for implementing Mobility-as-a Service (MaaS). *Research in Transportation Business & Management*. 2018; 27: 46-55. (In Russ.). / 10.1016/j.rtbm.2018.07.001.
- Ruf Y., Kaufmann M., Lange S., Heieck F., Andres A., Pfister J. Fuel Cells and Hydrogen Applications for Regions and Cities: Cost analysis and high-level business case. *Brussels and Frankfurt*. 2017. Vol. 2.
- Golbabaei F., Yigitcanlar T. & Bunker J. The role of shared autonomous vehicle systems in delivering smart urban mobility: A systematic review of the literature. *International Journal of Sustainable Transportation*. 2021; 15: 731-748.
- Shen P. Building retrofit optimization considering future climate and decision-making under various mindsets. *Journal of Building Engineering*. 2024; 96: 110422. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110422>.
- Glasgow's strategy for creating low-emission zones: Glasgow City Council. 2023. <https://www.glasgow.gov.uk/lowemissionzone>.
- Northumberland Park Depot Case Study: "Current News". 2023. <https://www.current-news.co.uk/londons-largest-electric-bus-depot>.
- Brizhanin V.V., Filippova R.V., Sudarikova E.V., Sudarikov M.D. Contribution of the Russian Federation to the reduction of greenhouse gas emissions: regulatory mechanisms and modern technological solutions for their implementation. *Bulletin Plekhanov Russian University of Economics. Moscow*. 2022; vol 19, 5 (125) (in Russ.).
- Kai L., Zhe L., Hong G., Meng Z. Optimal charging strategy for large-scale electric buses considering resource constraints. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2021; 99. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103009>.
- Spirlin I.V. Investment aspects of the development of the rolling stock fleet. *Vestnik universiteta (Gos. universitet upravlenija), Serija «Razvitiye otraslevogo i regional'nogo upravlenija»*. 2007; 1(1). (In Russ.).
- Zvонov V.A., Kozlov A.V., Terenchenko A.S. Ecology: alternative fuels taking into account their full life cycle. *Automotive industry*. 2001; 4. (In Russ.).
- Mirenko E.A. Alternative motor fuels from natural gas: energy efficiency and environmental performance in the full life cycle. In the collection: *The 8th Lucanian Readings. Problems and prospects of development of the motor transport complex Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. 2019; P. 152. (in Russ.).

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Филиппова Р.В. Концепция исследования, научное руководство, научное редактирование текста. Исследование и анализ качественных и количественных выгод и ущерба транспортной инфраструктуре и деятельности городского пассажирского транспорта г. Москвы от климатических изменений. Подготовка перечня мероприятий по адаптации транспортного комплекса к климатическим изменениям.

Феньков И.А. Разработка графиков и диаграмм и их описание, анализ данных. Комплексное изучение практического применения электробусов в г. Москве. Представление динамики внедрения данного вида транспорта в систему города, представление данных и возможностей перераспределения электробусов по зарядным станциям при работе на маршрутах регулярных перевозок столицы. Разработка предложений по минимизации рисков простоев и образования очередей для подзарядки.

Авторами внесен равный вклад в разработку статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Filippova Rимма V. Research concept, scientific supervision, scientific editing of the text. Research and analysis of qualitative and quantitative benefits and damages to the transport infrastructure and activities of urban passenger transport in Moscow from climate change. Preparation of the list of measures to adapt the transport complex to climate change.

Fen'kov Ivan A. Design of graphs and diagrams and its description, data analysis. Comprehensive study of the practical application of electric buses in Moscow. Presentation of dynamics of the electric bus introduction into the city's system, presentation of data and possibilities for the redistribution of electric buses operating on Moscow regular transportation routes among charging stations. Development of the proposals to minimize the risks of downtime and queues for recharging.

The authors have made the equal contribution to the development of this article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Филиппова Римма Владимировна – канд. экон. наук, советник при ректорате Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), старший руководитель проектов службы корпоративной политики ГУП «Мосгортранс» (125319, г. Москва, Ленинградский пр., 64).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1364-297>,

SPIN-код: 2166-4008,

e-mail: filippovaRV@transport.mos.ru

Феньков Иван Алексеевич – соискатель ученой степени канд. техн. наук Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, г. Москва, Ленинградский пр., 64).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4543-5647>,

SPIN-код: 8392-8245,

e-mail: fenkov.ivan@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Filippova Rимма V. – Candidate of Sciences (Economics), Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), State Unitary Enterprise "Mosgortrans" (64, Leningradskiy prospect, Moscow, 125319)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1364-297>,

SPIN-code: 2166-4008,

e-mail: filippovaRV@transport.mos.ru

Fen'kov Ivan A. – Applicant for the Degree of Candidate of Technical Sciences, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), State Budgetary Institution "Organizer of Transportation" (64, Leningradskiy prospect, Moscow, 125319)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4543-5647>,

SPIN-код: 8392-8245,

e-mail: fenkov.ivan@gmail.com

**РАЗДЕЛ III.
СТРОИТЕЛЬСТВО
И АРХИТЕКТУРА**



**PART III.
CONSTRUCTION
AND ARCHITECTURE**

Научная статья

УДК 69.04

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-804-821>

EDN: FKZDHT



Check for updates

РАСЧЕТ ЭСТАКАДЫ ПОД ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРУБОПРОВОДЫ НА ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ ОБРУШЕНИЕ ПРЯМЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

А.Ф. Истомин , М.Ю. АнаньинУральский федеральный университет,
г. Екатеринбург, Россия

ответственный автор

istomin.anton89@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. В данной статье рассмотрен порядок расчета на прогрессирующее обрушение эстакады под технологические трубопроводы в прямой динамике с использованием различных методов задания времени инициирующего воздействия. Особенность проектирования эстакад под технологические трубопроводы с учетом обеспечения прочности на прогрессирующее обрушение связана с тем, что из-за расположения трубопроводов, как правило, нет возможности поместить связи в плоскости рамы опор эстакады.

Материалы и методы. Расчет выполнен на базе программного комплекса SCAD Office, использующего метод конечных элементов для определения напряженно-деформированного состояния расчетной модели. Произведено исследование на асимптотическую сходимость расчетной модели в трех итерациях с последующим увеличением числа конечных элементов. Оценка сходимости производилась на основе анализа разности усилий в элементах, полученных при расчете каждой итерации. При расчете в прямой динамической постановке используется три метода оценки времени инициирующего воздействия.

Результаты. Произведен анализ асимптотической сходимости расчетной модели, по результатам анализа была выбрана модель с размерностью, при которой усилия в элементах последующих моделей отличаются не более чем на 3%. Выполнено сравнение результатов динамических расчетов с учетом трех вариантов задания времени инициирующего воздействия.

Обсуждение и заключение. По результатам исследования определяется необходимость исследования расчетных моделей на асимптотическую сходимость для оценки и верификации результатов. Делается выводы по результатам использования трех методов задания времени инициирующего воздействия. Определена зависимость усилий и перемещений от величины времени инициирующего воздействия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: прогрессирующее обрушение, прогрессирующее разрушение, лавинообразное обрушение, живучесть зданий и сооружений

Статья поступила в редакцию 29.04.2025; одобрена после рецензирования 17.09.2025; принята к публикации 21.10.2025.

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: Истомин А.Ф., Ананьин М.Ю. Расчет эстакады под технологические трубопроводы на прогрессирующее обрушение прямым динамическим методом // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 5. С. 804-821. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-804-821>

© Истомин А.Ф., Ананьин М.Ю., 2025

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-804-821>

EDN: FKZDHT

TECHNOLOGICAL PIPELINE STRUCTURAL DESIGN AGAINST PROGRESSIVE COLLAPSE THROUGH DYNAMIC DIRECT ANALYSIS

Anton F. Istomin , **Mikhail Yu. Ananin**

Ural Federal University

Yekaterinburg, Russia

 corresponding author

istomin.anton89@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. this article discusses the procedure of calculation for the progressive collapse of a pipeline overpass in direct dynamics with the use of various methods for setting the initiating impact time. The peculiarity of designing pipeline overpasses in terms of their resistance to progressive collapse is related to the fact that due to the pipelines location it is often not possible to install the bracings within the overpass support frame.

Materials and methods. The calculation was performed on the basis of the SCAD Office software package with the finite element method to determine the stress-strain state of the calculation model. A study was conducted on the asymptotic convergence of the calculation model in three iterations, with a subsequent increase in the number of finite elements. The convergence was assessed based on an analysis of the difference in forces in the elements obtained during the calculation of each iteration. When calculating in a direct dynamic formulation, three methods for estimating the initiating impact time were used.

Results. The asymptotic convergence of the calculation model was analyzed, and based on the analysis results, a model was selected in which the stresses in the elements of subsequent models differ by no more than 3%. The results of dynamic calculations were compared based on three options for setting the initiating impact time.

Discussion and conclusion. Based on the research, the need was proved to study the calculation models for asymptotic convergence to evaluate and verify the results obtained. Conclusions have been made based on the use of three methods for setting the initiating impact time. The dependences between stresses, displacements and the initiating impact time have been determined.

KEYWORDS: progressive collapse, progressive destruction, avalanche collapse, survivability of buildings and structures

The article was submitted: April 29, 2025; approved after reviewing: September 17, 2025; accepted for publication: October 21, 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. Istomin A.F., Ananin M.Y. Technological pipeline Structural design against PROGRESSIVE COLLAPSE through dynamic direct analysis. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (5): 804-821. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-804-821>

© Istomin Anton F., Ananin Mikhail Yu., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент, исходя из действующих нормативных документов¹, для зданий класса КС-3² необходимо выполнять расчет на прогрессирующее обрушение. В литературе представлено множество публикаций, в которых рассмотрены примеры подобных расчетов. Анализ подобных публикаций автор проводит в отдельной статье [1], однако актуальных случаев расчета эстакад нет. Также в рамках данной работы были рассмотрены более поздние отечественные публикации [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21] и более поздние зарубежные публикации [22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36], где также нет примеров расчета эстакад на прогрессирующее обрушение. Поскольку эстакады, предназначенные для технологических трубопроводов, входят в состав зданий и сооружений особо опасных объектов (классы опасности I и II), выполнение такого расчета для них тоже обязательно.

Цель исследования – повысить надежность и безопасность эксплуатации строительных конструкций. Задачи включают: 1) разработку рабочей расчетной модели рамной эстакады без связей в плоскости рамы; 2) определение напряженно-деформированного состояния её элементов при расчете на прогрессирующее обрушение; 3) исследование асимптотической сходимости расчетной модели; 4) проведение динамического расчета с использованием трех методов оценки времени инициирующего воздействия и сравнение полученных результатов.

За основу создания расчетной модели выбран один температурный блок проектируемой трехъярусной эстакады для технологических трубопроводов. Конструкция эстакады включает совокупность температурных блоков,

состоящих из отдельно стоящих подвижных и неподвижных опор, оснащенных траверсами для установки трубопроводов, объединенных продольными балками и фермами для кабельных конструкций. Все опоры закреплены жестко на уровне верха фундаментов. Колонны и ригели первого яруса железобетонные, связи первого яруса и все конструкции вышестоящих ярусов металлические. Класс бетона по прочности В30, применяется арматура класса А500 и металлические конструкции с маркой стали С355. В данной работе не учитываются нелинейные свойства материалов. И, соответственно, рассматривается только упругая деформация, без учета пластики. Так как это проектируемая эстакада, то есть возможность сконструировать эстакаду таким образом, чтобы избежать пластических деформаций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчеты были выполнены в соответствии с актуальными нормативными требованиями^{3,4,5} при использовании программного комплекса SCAD Office и проводились в два этапа:

1) с применением встроенного модуля «прогрессирующее обрушение» для определения расчетных характеристик в квазистатической постановке и формирования вторичной расчетной схемы;

2) последующим использованием этой схемы для проведения расчетов в динамическом режиме.

Оценка времени инициирующего воздействия осуществлена по трем методикам:

1) согласно руководству ФАУ ФЦС⁶, время воздействия t_{otk} составляет 1/10 основного периода собственных колебаний удаляемого элемента, что равно 0,044 сек;

2) по американским нормам ‘Progressive Collapse Analysis and Design Guideline’⁷ (GSA,

¹ Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ (ред. от 02.07.2013) «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» // Собрание законодательства Российской Федерации, 2002, № 52. ст.5140.

² ГОСТ 27751–2014. Межгосударственный стандарт. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения / ОАО «НИЦ «Строительство». Введ. 2015-07-01. М.: Стандартинформ, 2019. 19 с.

³ СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. Дата введения 2017-06-04 – М.: Стандартинформ, 2016. 104 с.

⁴ СП 296.1325800.2017 Здания и сооружения. Особые воздействия Дата введения 2018-02-04 – М.: Стандартинформ, 2017. –30 с.

⁵ СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Общие положения. Дата введения 2019-01-06 - М: Стандартинформ, 2018. 24 с.

⁶ Проектирование мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения: методическое пособие: ФАУ ФЦС. М., 2018.

⁷ GSA Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance. October 24, 2013 г.

2013), где указывается, что $t_{otk} \leq 0,1T$, при этом период Т равен времени колебаний конструкции без выбывшего элемента и при форме колебаний, напоминающей статическую деформацию системы, t_{otk} равно 0,039 сек;

3) согласно справочнику Коренева и Рабиновича⁸ (стр. 95) 1972 года выпуска, аналогично с расчетом на удар и при условии, что нет возможности оценить время воздействия, можно установить запас прочности и жесткости конструкции, приняв t_{otk} , равное 0,001 сек.

Произведен расчет одного температурного блока. После формирования расчетной модели (рисунок 1) и выполнения статического расчета получены следующие типы загружений (рисунок 2).

В качестве аварийного воздействия была смоделирована ситуация разрушения наиболее нагруженной колонны. Устойчивость эстакады от прогрессирующего обрушения обеспечена жесткими узлами в плоскости рамы и пролетно-связевыми конструкциями из плоскости рамы. Все узлы проектируются, в том числе с учетом нагрузок от прогрессирующего обрушения. По верхнему ярусу эстакады выполнены вертикальные связи в каждом пролете на протяжении всей эстакады (см. рисунок 1). Для увеличения жесткости узла соединения между железобетонной частью колонны и стальной выполняется заделка сдвигового упора из горячекатаного двутавра 20К5 (рисунок 3).



Рисунок 1 – Расчетная схема эстакады
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Calculation scheme of the overpass
Source: compiled by the authors.

Номер	Активное загружение	Активное загружение в РСП	Наименование	Тип загружения	Вид нагрузки	Знакопеременные	Объединение	Участвуют в групповых операциях	Сопутствия	Коэф. надежности	Доля длительности	Коэф.			
												K ₁	K ₂	K ₃	K ₄
1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Собственный вес	Постоянные нагрузки	Вес бетонных (песчаных) конструкций	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1,1	1	1	0	0	0
2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Вес оборудования	Длительные нагрузки	Вес стационарных конструкций	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1,05	1	1	0	0	0
3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Технологический горизонт	Длительные нагрузки	Вес стационарных конструкций	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1,05	1	1	0	0	0
4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Позиционная площадки	Кратковременный	Вес людей и предметов	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1,1	0	1	0	0	0
5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Ветер Y	Кратковременный	Ветровые нагрузки	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1,4	0	1	0	0	0
6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Ветер X	Кратковременный	Ветровые нагрузки	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1,4	0	1	0	0	0
7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Пульсация ветер Y	Кратковременный	Ветровые нагрузки	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1,4	0	1	0	0	0
8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Пульсация X	Кратковременный	Ветровые нагрузки	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1,4	0	1	0	0	0
9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Снег	Кратковременный	Полные снеговы	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1,4	0	1	0	0	0
10	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Ветер Y пульсация I	Кратковременный	Ветровые нагрузки	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1,4	0	1	0	0	0
11	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Ветер X пульсация I	Кратковременный	Ветровые нагрузки	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1,4	0	1	0	0	0
12	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Гололедные нагрузки	Кратковременный	Гололедные нагрузки	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1,8	0	1	0	0	0
13	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	L1+L2+L3+L4+L10	Постоянные нагрузки	Другие	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1	1	0	0	0
14	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	L1+0,5*L2+0,5*L3+L4+L10	Постоянные нагрузки	Другие	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1	1	1	0	0	0

Рисунок 2 – Типы загружений
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Load types
Source: compiled by the authors.

⁸ Коренев Б. Г., Рабинович И. М. / справочник по динамике сооружений. Стройиздат, 1972 г.

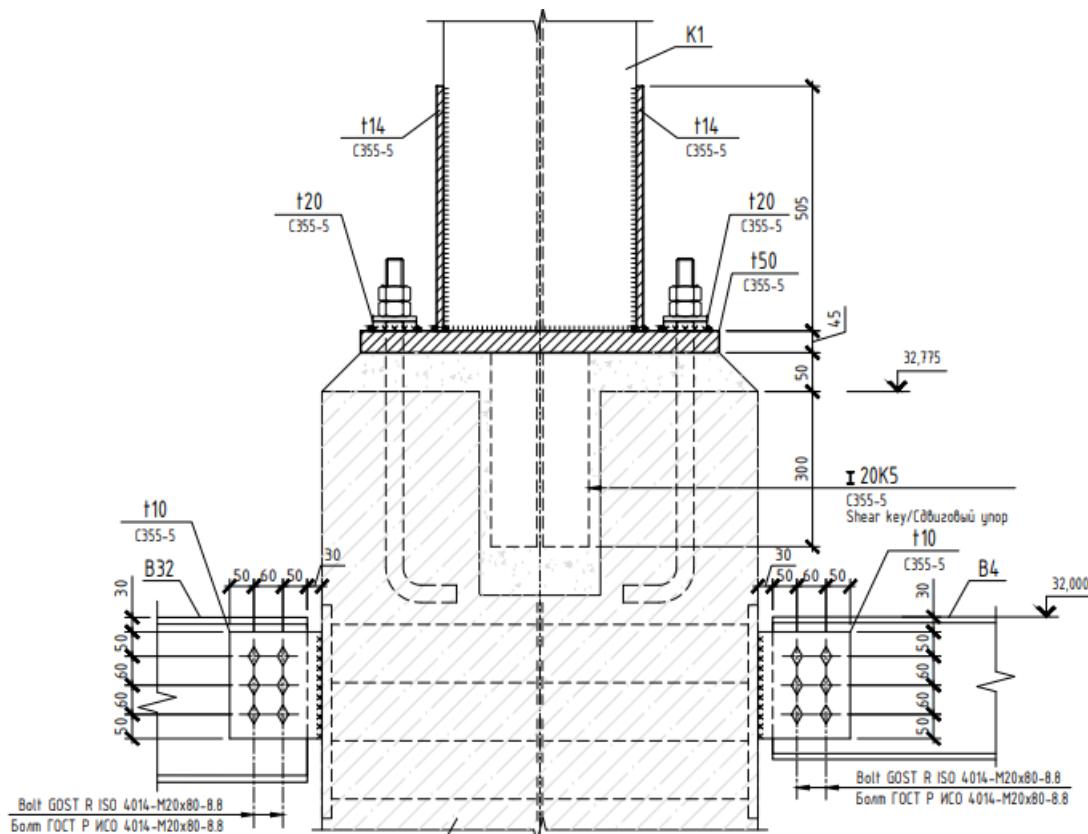


Рисунок 3 – Узел соединения железобетонной части колонны со стальной
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – The connection point between the reinforced concrete part of the column and the steel part
Source: compiled by the authors.

По вторичной расчетной модели, использованной для расчета в прямой динамической постановке, произведено исследование асимптотической сходимости. Для этого сделан расчет трех вариантов схемы с последовательным увеличением числа конечных элементов:

1) количество конечных элементов = 1989 шт.;

2) количество конечных элементов = 5595 шт.;

3) количество конечных элементов = 11004 шт.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам расчета в прямой динамике трех вариантов схемы определены напряженно-деформируемые состояния трех схем, максимальные и минимальные усилия в элементах отображены на рисунках 4, 5, 6, 7, 8, 9. Суммарные перемещения отображены на рисунках 10, 11, 12.

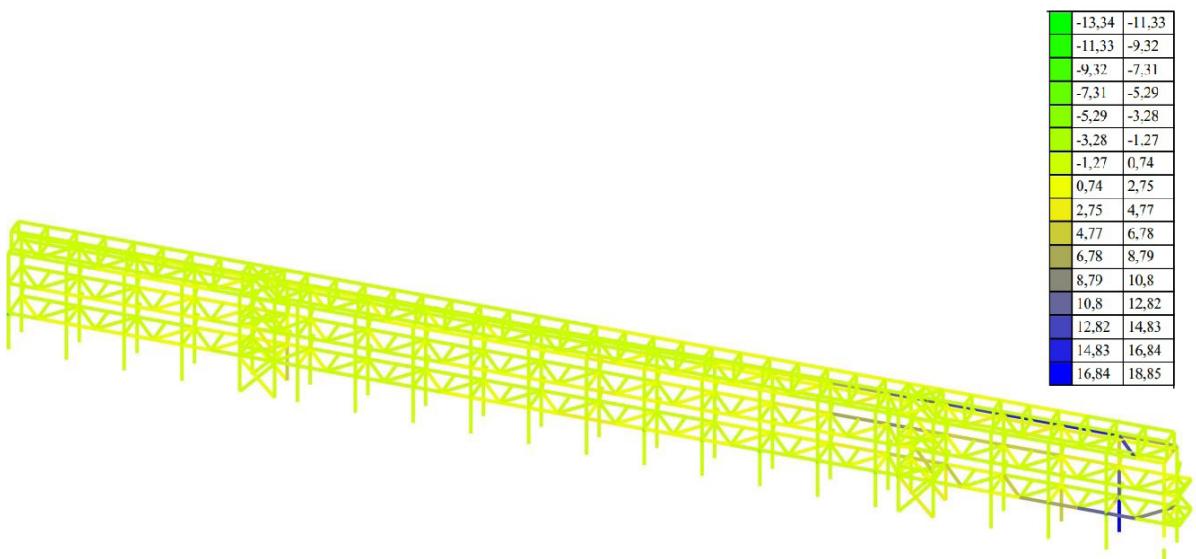


Рисунок 4 – Эпюра усилий комбинации с максимальным усилием N_{max} , т. Количество КЭ 1989 шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Combined force diagram for the maximum force N_{max} , t. Number of KE 1989 pcs.
Source: compiled by the authors.

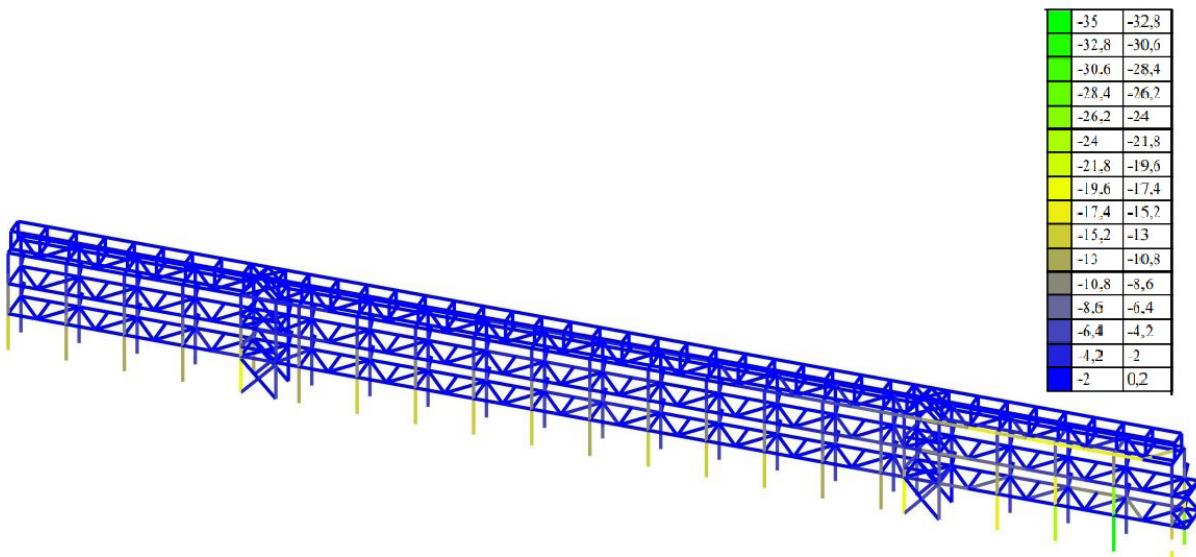


Рисунок 5 – Эпюра усилий комбинации с минимальным усилием N_{min} , т. Количество КЭ 1989 шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 5 - Combined force diagram for the minimum force N_{min} , t. Number of KE 1989 pcs.
Source: compiled by the authors.

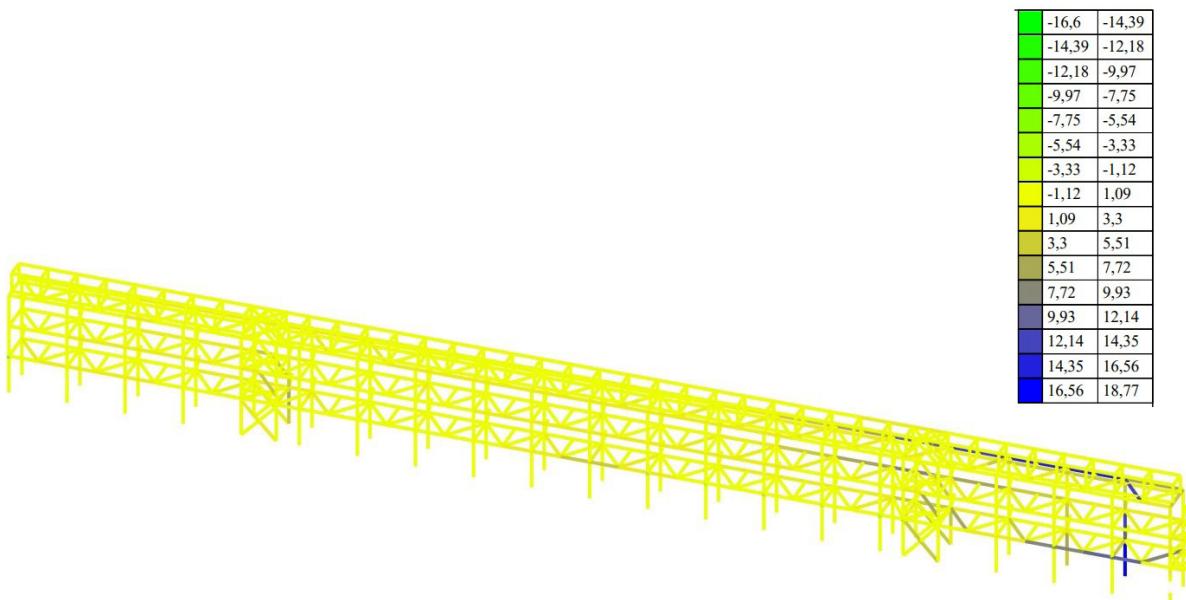


Рисунок 6 – Эпюра усилий комбинации с максимальным усилием N_{max} , т. Количество КЭ 5595 шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Combined force diagram for the maximum force N_{max} , t. Number of KE 5595 pcs.
Source: compiled by the authors.

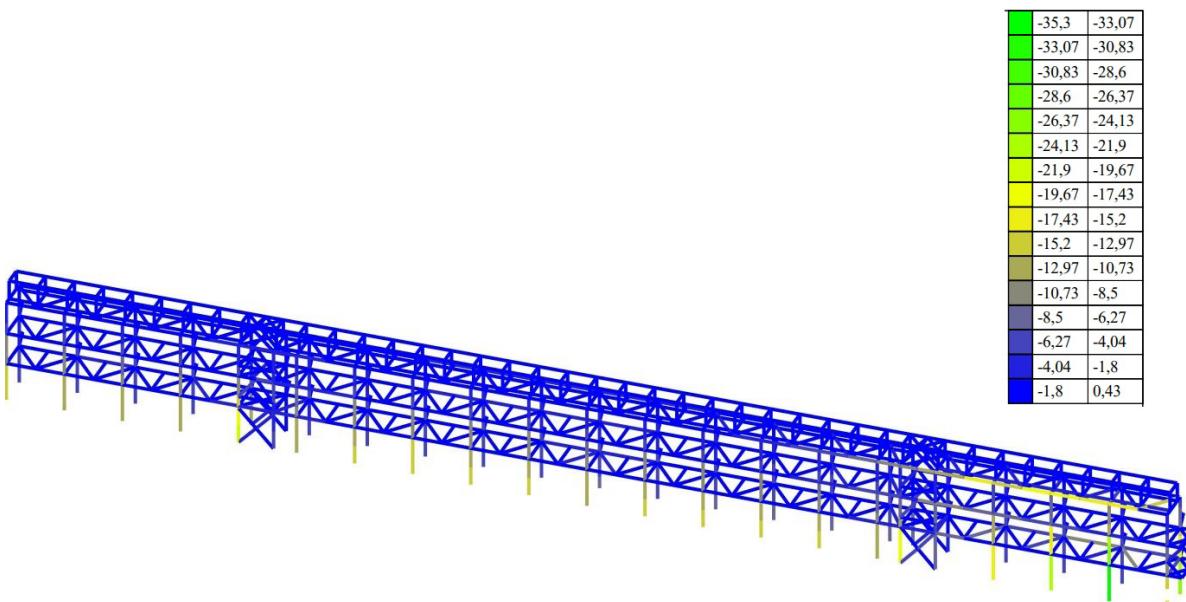


Рисунок 7 – Эпюра усилий комбинации с минимальным усилием N_{min} , т. Количество КЭ 5595 шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Combined force diagram for the minimum force N_{min} , t. Number of KE 5595 pcs.
Source: compiled by the authors.

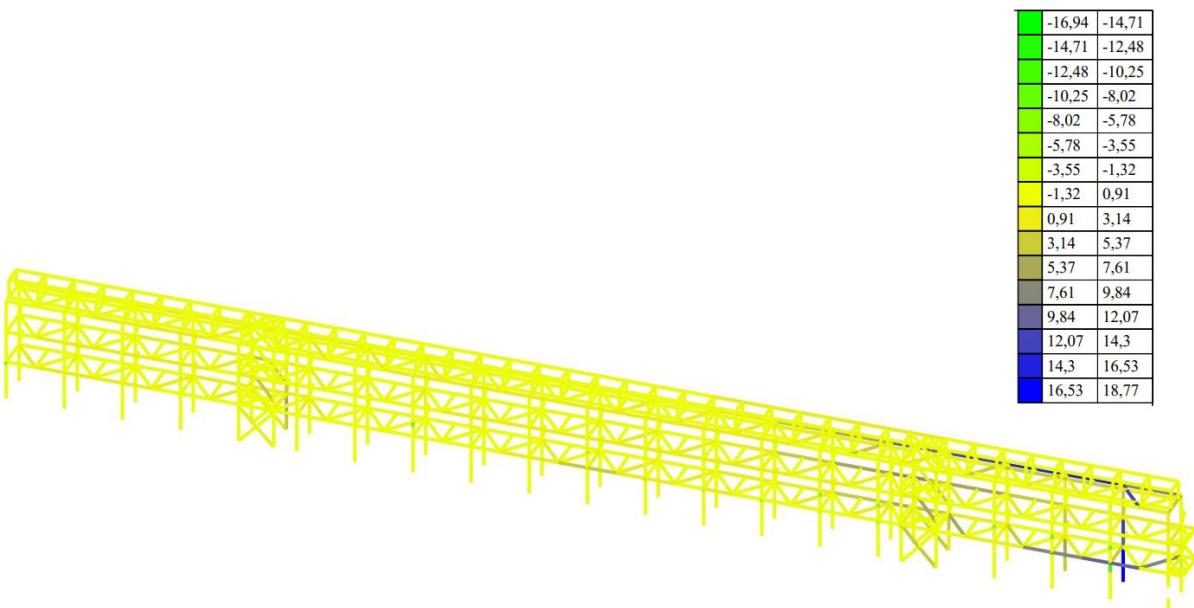


Рисунок 8 – Эпюра усилий N комбинации с максимальным усилием N_{max} , т. Количество КЭ 11004 шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Combined force diagram for maximum force N_{max} , t. Number of KE 11004 pcs.
Source: compiled by the authors.

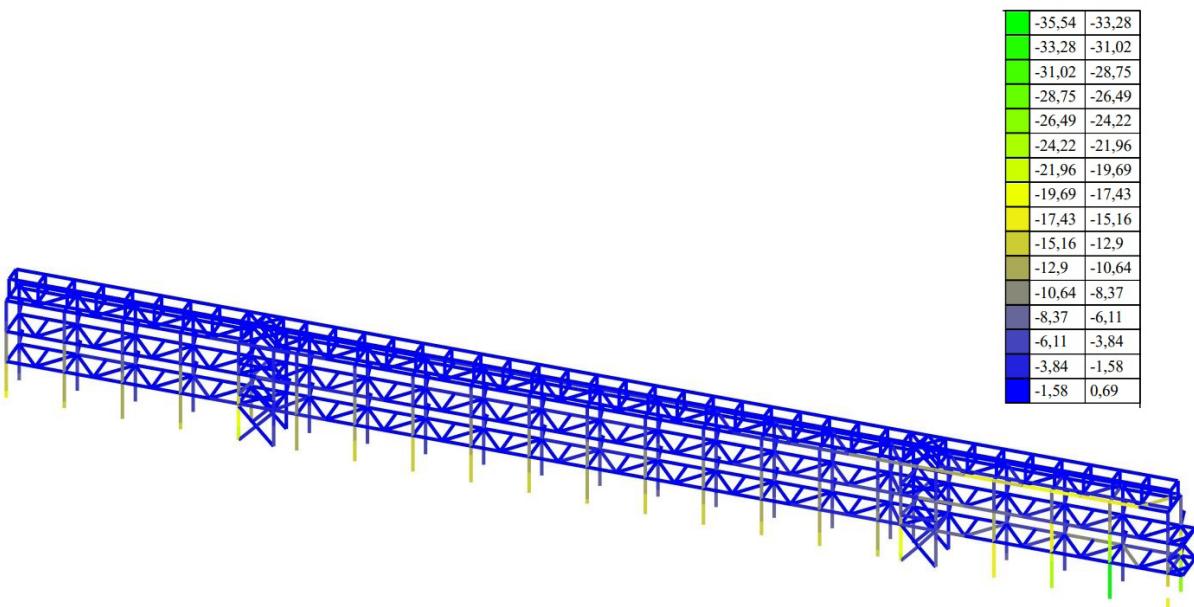


Рисунок 9 – Эпюра усилий N комбинации с минимальным усилием N_{min} , т. Количество КЭ 11004 шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Combined N force diagram for the minimum force N_{min} , t. Number of KE 11004 pcs.
Source: compiled by the authors.

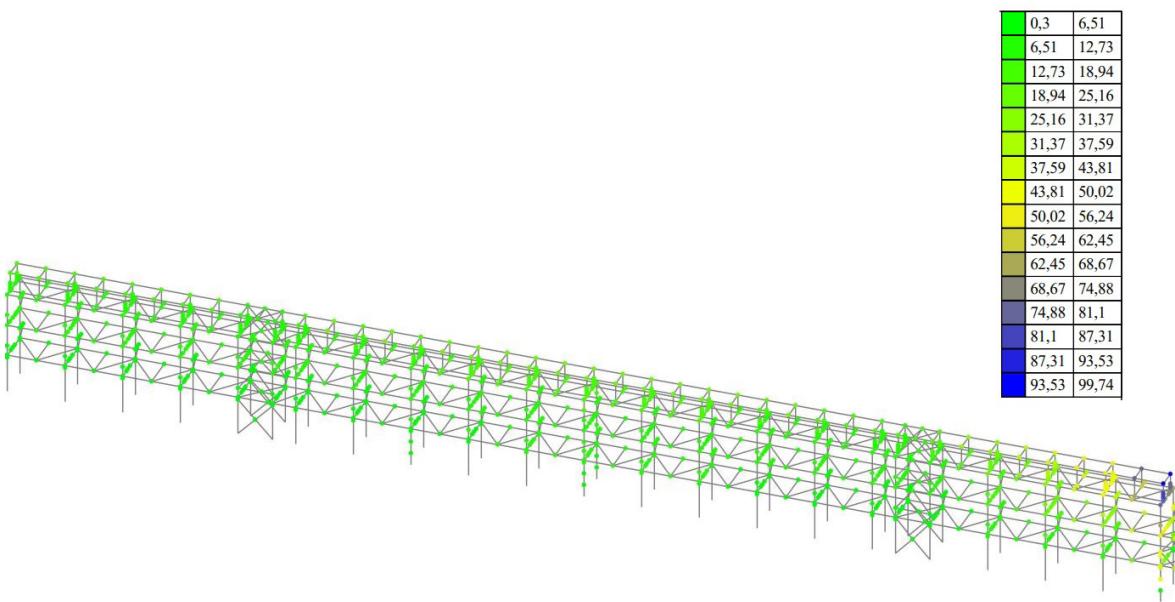


Рисунок 10 – Значения максимальных суммарных перемещений, мм. Количество КЭ 1989 шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Values of maximum total displacements, mm. Number of KE 1989 pcs.
Source: compiled by the authors.

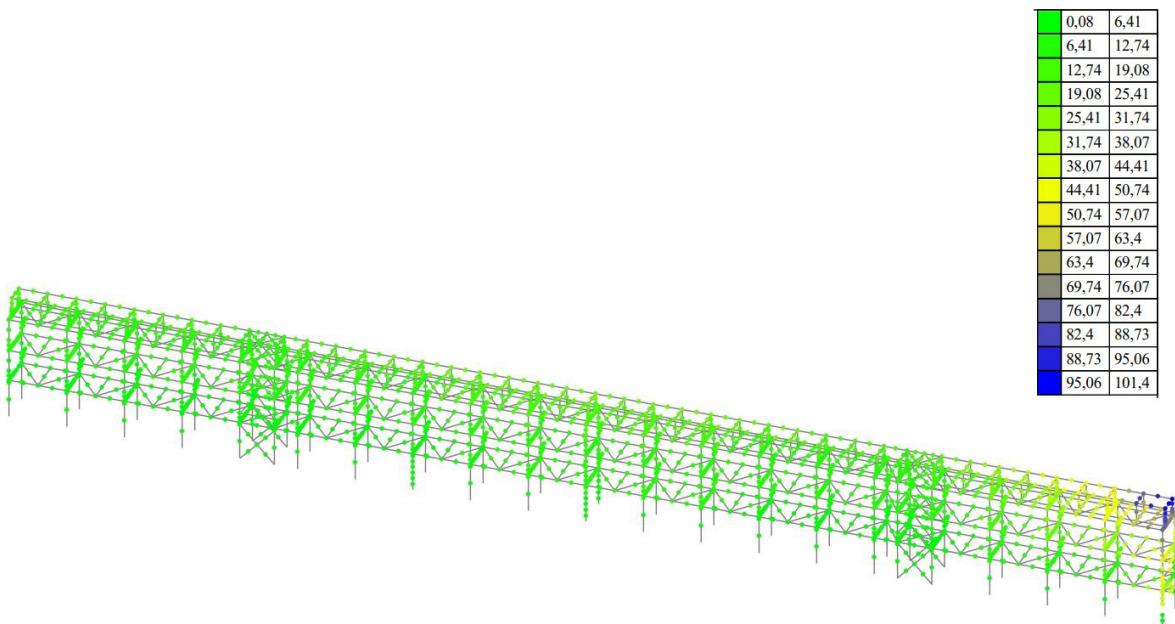


Рисунок 11 – Значения максимальных суммарных перемещений, мм. Количество КЭ 1989 шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 11 – Values of maximum total displacements, mm. Number of KE 1989 pcs.
Source: compiled by the authors.

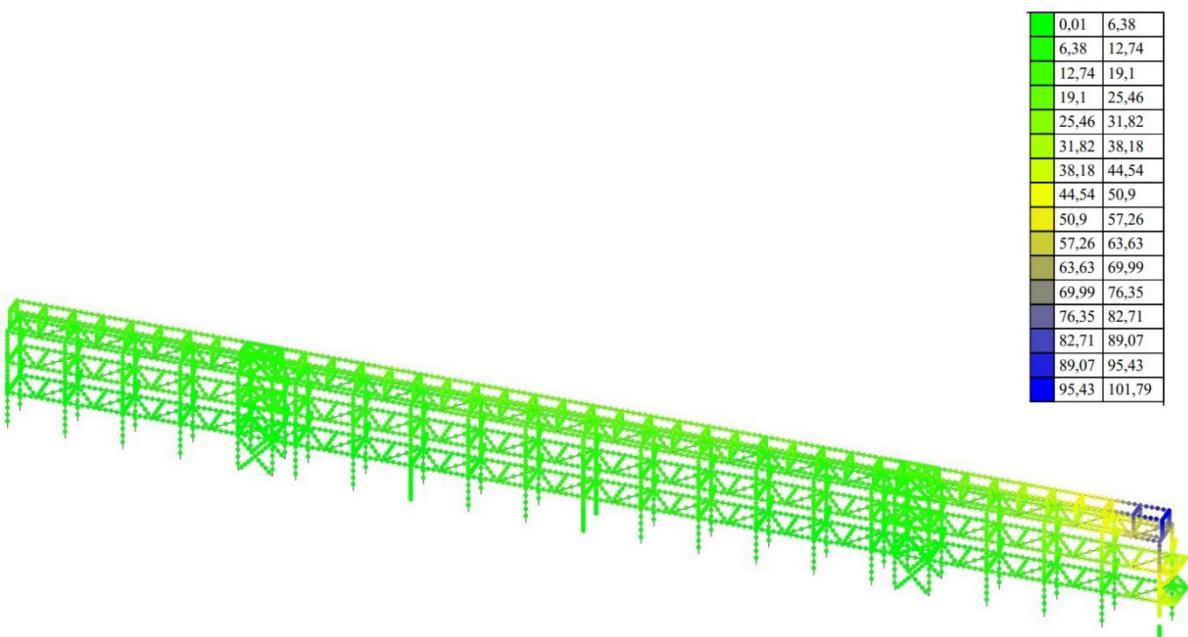


Рисунок 12 – Значения максимальных суммарных перемещений, мм. Количество КЭ 1989 шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 12 – Values of maximum total displacements, mm. Number of KE 1989 pcs.
Source: compiled by the authors.

Данные для анализа асимптотической сходимости отображены в таблице 1, асимптоты зависимости значений усилий и значений перемещений от количества конечных элементов отображены на рисунках 13, 14, 15.

Таблица 1
Результаты расчета
Источник: составлено авторами.

Table 1
Calculation results
Source: compiled by the authors.

Количество КЭ, шт.	N _{max} , τ	$\frac{N_{\max}^n - N_{\max}^{n-1}}{N_{\max}^n} * 100\%$	N _{min} , τ	$\frac{N_{\min}^n - N_{\min}^{n-1}}{N_{\min}^n} * 100\%$	Перемещения, мм	$\frac{\Delta_{\max}^n - \Delta_{\max}^{n-1}}{\Delta_{\max}^n} * 100\%$
1989	18,85		-35		99,74	
5595	18,77	-0,43	-35,3	0,85	101,4	1,64
11004	18,77	0,00	-35,54	0,68	101,79	0,38

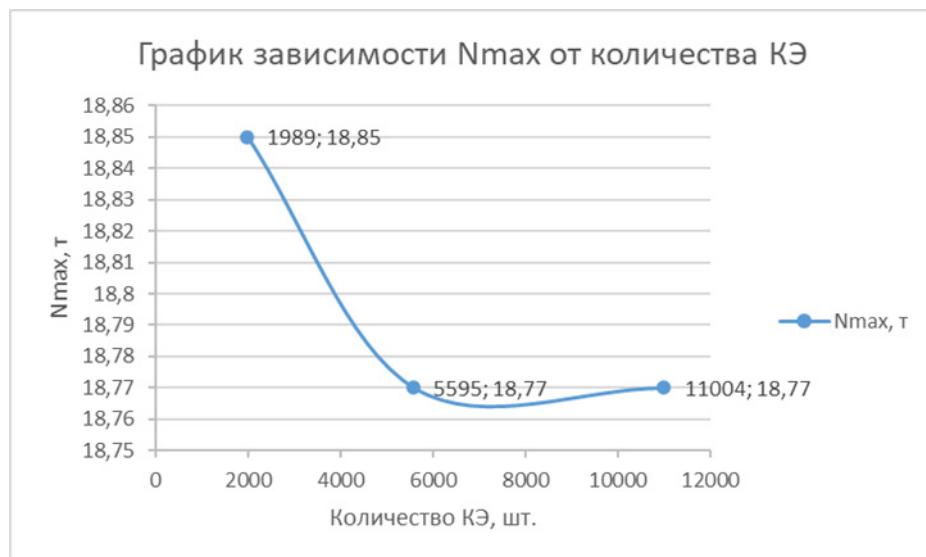


Рисунок 13 – График зависимости N_{max}, t , от количества КЭ, шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 13 – Dependence between N_{max}, t and the number of KE, pcs.
Source: compiled by the authors.

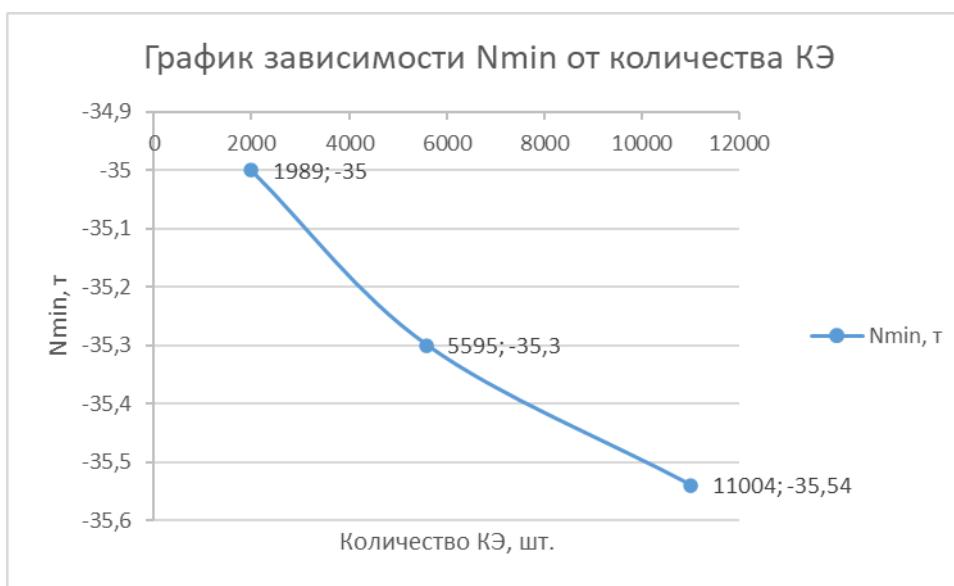


Рисунок 14 – График зависимости N_{min}, t , от количества КЭ, шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 14 – Dependence between N_{min}, t and the number of KE, pcs.
Source: compiled by the authors.

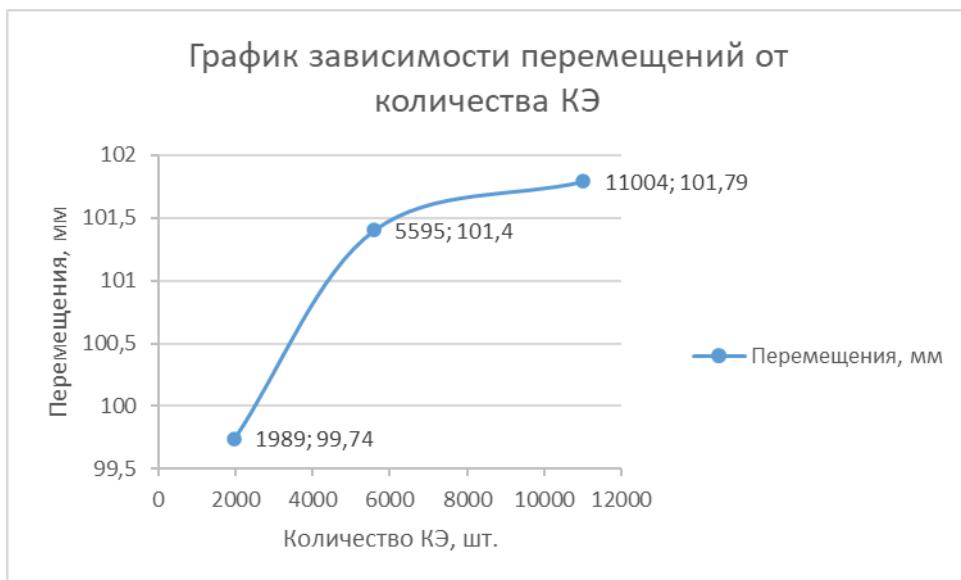


Рисунок 15 – График зависимости значений максимальных суммарных перемещений, мм, от количества КЭ, шт.
Источник: составлено авторами.

Figure 15 – Dependence between values of the maximum total displacements, mm and the number of KE, pcs.
Source: compiled by the authors.

При выполнении расчета последующие значения величин напряженно-деформированного состояния отличаются от предыдущих не более чем на 3%, соответственно размерность конечно-элементной сетки удовлетворяет поставленным задачам. Принимаем последнюю схему с количеством элементов, равным 11004 шт. для дальнейшего анализа.

На рисунке 16 отображен график перемещений узла над удаляемым элементом по оси Z во времени.

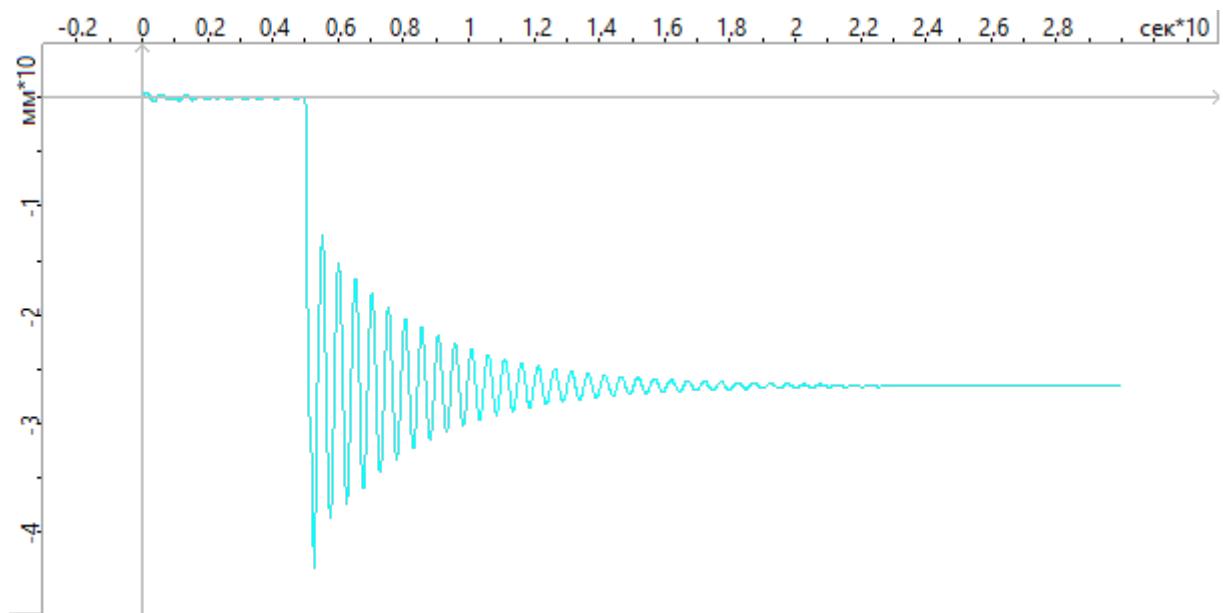


Рисунок 16 – График значений перемещений узла по оси Z в мм/сек
Источник: составлено авторами.

Figure 16 – Node displacement values along the Z axis in mm/sec
Source: compiled by the authors.

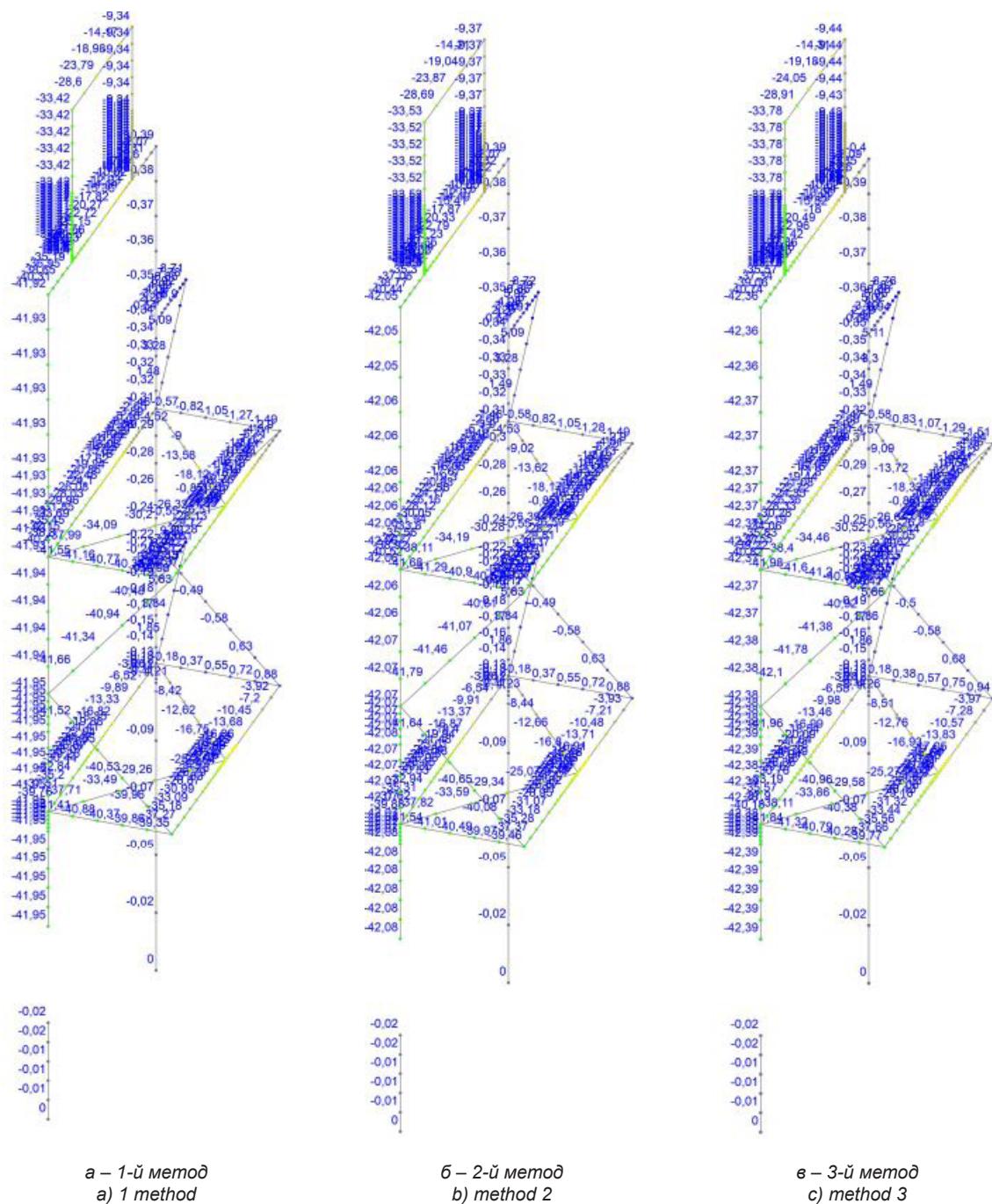


Рисунок 17 – Эпюра перемещений узла по оси Z в мм
Источник: составлено авторами.

Figure 17 – Node displacement along the Z axis in mm
Source: compiled by the authors.

При задании начальных условий для моделирования инициирующего воздействия было установлено время задержки в 5 сек для начала приложения нагрузок. Это хорошо видно на графике: в первые пять секунд система находится в состоянии равновесия; по истечении

этого времени начинается моделирование разрушения колонны с помощью динамических нагрузок, после чего прослеживается реакция системы и затухание колебаний в диапазоне 5–20 сек, а также стабилизация в новом положении на более поздних этапах (после 20 сек).

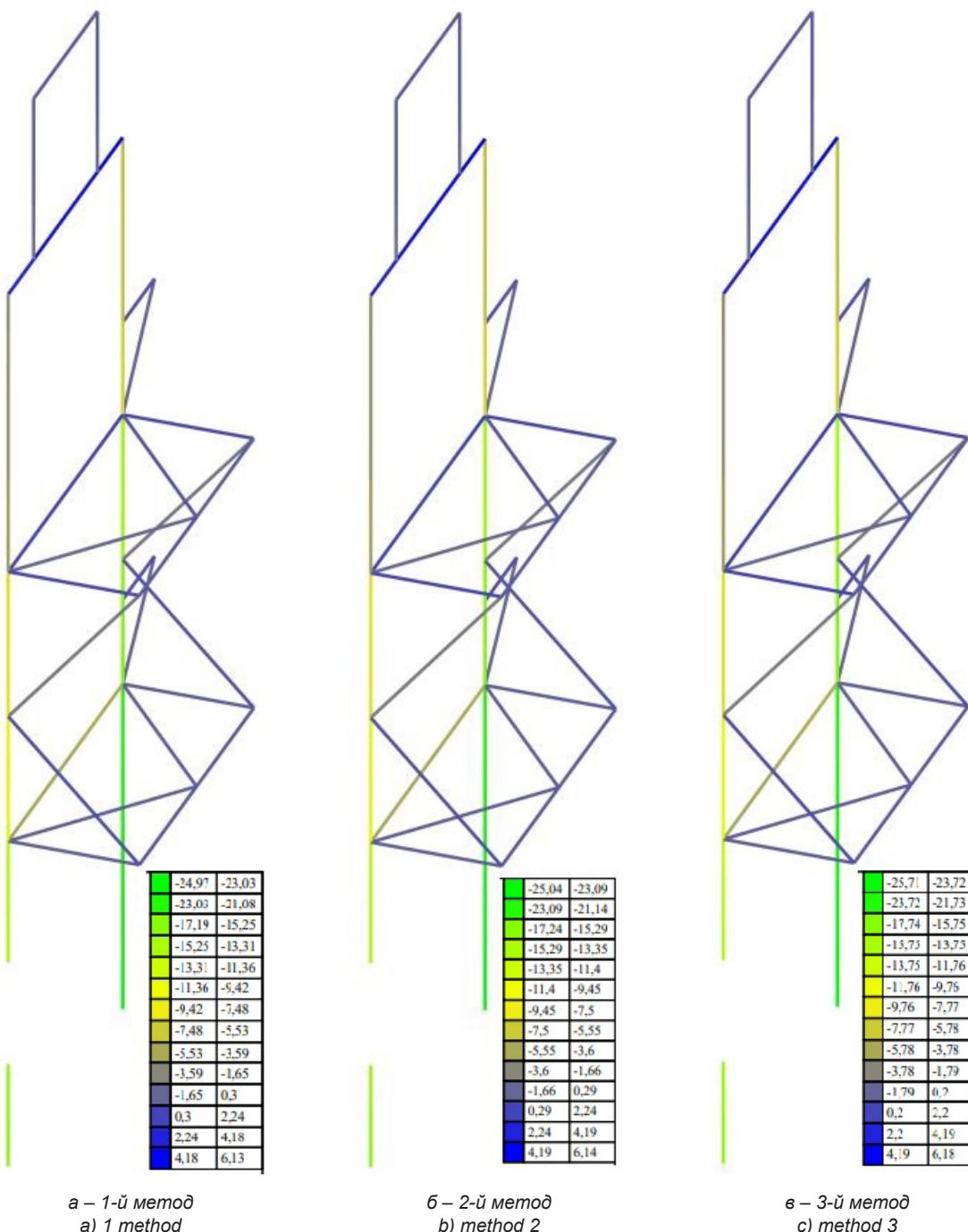


Рисунок 18 – Эпюра усилий в раме с удаляемым элементом *N*, *t*
Источник: составлено авторами.

Figure 18 – Forces in the frame with a removable element *N*, *t*
Source: compiled by the authors.

По результатам расчета тремя методами задания времени инициирующего воздействия определим перемещения в точке, расположенной над удаляемым элементом колонны, данные отображены на рисунке 17 и усилия в раме (рисунок 18).

женной над удаляемым элементом колонны, данные отображены на рисунке 17 и усилия в раме (рисунок 18).

Сравнение результатов расчетов тремя методами задания времени инициирующего воздействия отображено в таблице 2.

Таблица 2
Результаты расчета
Источник: составлено авторами.

Table 2
Calculation results
Source: compiled by the authors.

№ Метода	N, т	$\frac{N_{\max}^n - N_{\max}^{n-1}}{N_{\max}^n} * 100\%$	Перемещения, мм	$\frac{\Delta_{\max}^n - \Delta_{\max}^{n-1}}{\Delta_{\max}^n} * 100\%$
Метод 1	-24,97		-41,95	
Метод 2	-25,04	0,28	-42,08	0,31
Метод 3	-25,77	2,83	-42,39	0,73

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При выполнении расчета прямым динамическим методом необходимо проводить анализ асимптотической сходимости конечно-элементной модели, так как результаты расчетов с различной размерностью конечно-элементной сетки могут отличаться. В нашем случае результаты отличаются менее чем на 3%.

2. Из графика перемещений узла над удалаемой колонной (см. рисунок 14) наглядно видно время, необходимое для стабилизации системы в новом положении. Рекомендации по времени стабилизации дать сложно, для этого необходимо учесть риски воздействия других внешних факторов в период стабилизации системы. Очевидно, что чем быстрее стабилизируется система, тем меньше рисков, что в этот период появится другое воздействие, дестабилизирующее систему. Также стоит отметить, что на графике (см. рисунок 14) видно постепенное линейное затухание колебаний, то есть нет периодов, когда колебания увеличиваются, потом затухают и снова увеличиваются. Такое нелинейное изменение колебаний и их влияние на смежные конструкции требует отдельного изучения.

3. Сравнение значений усилий элементов и перемещений узлов по результатам расчетов на прогрессирующем обрушении тремя методами задания времени инициирующего

воздействия дает примерно одинаковые результаты.

Меньше нагружена система при использовании первого метода согласно рекомендациям ФАУ ФЦС⁹, более нагружена при использовании второго метода согласно нормам Progressive collapse analysis and design guideline (GSA.2013)¹⁰, и больше всего нагружена при использовании рекомендаций справочником Коренева и Рабиновича¹¹ от 1972 г. (стр. 95).

Также по результатам расчетов мы видим, что чем меньше длительность инициирующего воздействия (более резкое возникновение аварийной нагрузки), тем большие по модулю усилия и перемещения возникают в элементах и узлах.

4. Для определения того, какой из трех методов наиболее приближен реальному поведению строительных конструкций при аварийном воздействии рекомендуется проведение натурных испытаний.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Истомин А.Ф. Анализ статей и научных публикаций на тему прогрессирующего обрушения // Вестник ПНИПУ. 2020. № 2. С. 22–29.
- Остяко В.В. Исследование работы арочных и перекрестных арочных систем на устойчивость против прогрессирующего обрушения квазистатическим методом в линейной постановке // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 4-2. С. 141–145. – 5 с.

⁹ Методическое пособие. Проектирование мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения ФАУ ФЦС, Москва, 2018 г.

¹⁰ GSA Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance. October 24, 2013 г.

¹¹ Справочник по динамике сооружений Коренев Б. Г., Рабинович И. М. Стройиздат, 1972 г.

3. Агаханов Э.К., Кравченко Г.М., Кадомцев М.И., Труфанова Е.В., Савельева Н.А.. Цифровое моделирование прогрессирующего обрушения высотного здания // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022. Том 49, № 1. С. 87–94. – 8 с.
4. Подшивалов И.И. Моделирование напряженного состояния безригельных перекрытий экспериментального здания от прогрессирующего обрушения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 25. С. 134–141. – 8 с.
5. Митрович Б. Оценка устойчивости монолитных железобетонных несущих систем к прогрессирующему обрушению на основе принципа уровня допускаемых повреждений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 3. С. 61–72. – 10 с.
6. Терешин Ю.А., Павлов Д.А. Защита от прогрессирующего обрушения литейных дворов доменных печей // Символ науки. 2022. № 4-2. С. 25–27. – 3 с.
7. Рекунов С.С., Косова А.Ю., Иванов С.Ю., Завьялов И.С. Расчёт многоэтажного здания на прогрессирующее обрушение при сейсмическом воздействии // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2021. № 3 (36). С. 15–20. – 6 с. DOI: 10.52684/2312-3702-2021-36-2-15-20
8. Митрович Б. Верификация методики использования коэффициента редукции при расчете монолитных железобетонных систем на устойчивость к прогрессирующему обрушению // Строительство и реконструкция. 2021; (3):68–75.
9. Ведяков И.И., Соловьев Д.В. Разработка методики оценки риска прогрессирующего обрушения // Вестник НИЦ «Строительство». 2021. 28(1): 5–15.
10. Краснощеков Ю.В. Защита от прогрессирующего обрушения зданий со сборными железобетонными перекрытиями // Вестник СибАДИ. 2022; Т.19, № 2(84). С. 290–299.
11. Колчунов В.И., Московцева В.С., Бушова О.Б., Жуков Д.И. Расчетный анализ способов защиты монолитных каркасов многоэтажных зданий с плоскими перекрытиями от прогрессирующего обрушения // Строительство и реконструкция. 2021. (4): 35–44.
12. Завьялова О.Б., Куликов В.В. Особенности создания расчетных схем, расчета и конструирования многоэтажного каркасного здания с соблюдением мер защиты от прогрессирующего обрушения // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2022. № 1 (39). С. 58–65.
13. Истомин А.Ф., Кучин М.В. Оценка факторов прогрессирующего обрушения строительных конструкций // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3 (55) С. 152–158. – 7 с.
14. Лисневский А.Е. Проблемы прогрессирующего обрушения // Томский государственный архитектурно-строительный университет. 2022. С. 31–38. – 8 с.
15. Карабахян В.Б., Овчинников И.И., Баев М.А., Овчинников И.Г. Особенности прогрессирующего разрушения применительно к мостовым сооружениям // Транспортные сооружения. 2020. № 2. С. 1–20. – 20 с.
16. Подшивалов И.И. Анализ результатов моделирования напряженного состояния колонн и связей экспериментального здания от прогрессирующего обрушения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24, № 3. С. 180–190. – 11 с.
17. Foad Kiakojouri, Valerio De Biagi, Bernardino Chiaia, Mohammad Reza Sheidaii Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects // Engineering Structures. 2020, vol. 206.
18. Ibrahim M.H. Alshaikh, B.H. Abu Bakar, Emad A.H. Alwesabi, Hazizan Md Akil Experimental investigation of the progressive collapse of reinforced concrete structures: An overview // Structures. 2020, vol. 25 P. 881–900 – 20 p.
19. Foad Kiakojouri, Mohammad Reza Sheidaii, Valerio De Biagi, Bernardino Chiaia Progressive collapse of structures: A discussion on annotated nomenclature // Structures. 2021, vol. 29 P. 1417–1423 – 7 p.
20. Iftikhar Azim, Jian Yang, Sanjeev Bhatta, Feiliang Wang, Qing-feng Liu Factors influencing the progressive collapse resistance of RC frame structures // Journal of Building Engineering. 2020, vol. 27.
21. Foad Kiakojouri, Valerio De Biagi, Bernardino Chiaia, Mohammad Reza Sheidaii Strengthening and retrofitting techniques to mitigate progressive collapse: A critical review and future research agenda // Engineering Structures. 2020, vol. 262.
22. Hamzeh Shakib, Maedeh Zakersalehi, Vahid Jahangiri, Reza Zamanian Evaluation of Plasco Building fire-induced progressive collapse // Structures. 2020, vol. 28 P. 205–224 – 10 p.
23. Xiao-Huang-Can He, Tak-Ming Chan, Kwok-Fai Chung Effect of inter-module connections on progressive collapse behaviour of MiC structures // Journal of Constructional Steel Research. 2021, vol. 185.
24. Bao Meng, Liangde Li, Weihui Zhong, Zheng Tan, Qiangqiang Du Improving anti-progressive collapse capacity of welded connection based on energy dissipation cover-plates // Journal of Constructional Steel Research. 2022, vol. 188.
25. De-Cheng Feng, Hai-Rong Shi, Fulvio Parisi, Emanuele Brunesi, Chun-Lin Wang Efficient numerical model for progressive collapse analysis of prestressed concrete frame structures // Engineering Failure Analysis. 2021, vol. 129.
26. Ibrahim M.H. Alshaikh a b, B.H. Abu Bakar a, Emad A.H. Alwesabi a b, Abdullah M. Zeyad c, Hassan M. Magbool Finite element analysis and experimental validation of progressive collapse of reinforced rubberized concrete frame // Structures. 2020, vol. 33. P. 2361–2373 – 13 p.
27. De-Cheng Feng, Si-Cong Xie, Jun Xu, Kai Qian Robustness quantification of reinforced concrete structures subjected to progressive collapse via the

probability density evolution method // *Engineering Structures*. 2020, vol. 202.

28. Yun-Hao Weng, Kai Qian, Feng Fu, Qin Fang Numerical investigation on load redistribution capacity of flat slab substructures to resist progressive collapse // *Journal of Building Engineering*. 2020, vol. 29

29. Huiyun Qiao, Xinyu Xie, Yu Chen Improvement of progressive collapse resistance for a steel frame system with beam–web opening // *Engineering Structures*. 2022, vol. 256.

30. Yuan Tian, Kaiqi Lin, Xinzhen Lu, Lei Zhang, Yi Li, Hong Guan Experimental and theoretical study of seismic and progressive collapse resilient composite frames // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020, vol. 139.

31. Martina Scalvenzi, Sebastiano Gargiulo, Fabio Freddi, Fulvio Parisi Impact of seismic retrofitting on progressive collapse resistance of RC frame structures // *Engineering Failure Analysis*. 2022, vol. 131.

REFERENCES

- Istomin A.F. Analysis of articles and scientific publications on the topic of progressive collapse. *Vestnik PNRPU*. 2020; 2: 22-29 - 7 p. (in Russ.).
- Ostyanko V.V. Study of the operation of arch and cross arch systems for stability against progressive collapse by a quasi-static method in a linear formulation *Actual scientific research in the modern world*. 2021; 4-2: 141-145 - 5 p. (in Russ.).
- Agakhanov E.K., Kravchenko G.M., Kadomtsev M.I., Trufanova E.V., Savelyeva N.A. Digital modeling of progressive collapse of a high-rise building. *Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science*. 2022; 49 (1): 87-94 - 8 p. (in Russ.).
- Podshivalov I.I. Modeling the stress state of crossbarless ceilings of an experimental building from progressive collapse. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2023; 25: 134-141 - 8 p. (in Russ.).
- Mitrovic B. Evaluation of the stability of monolithic reinforced concrete bearing systems to progressive collapse based on the principle of the level of permissible damage. Seismic-resistant construction. *Safety of structures*. 2021; 3: 61-72 - 10 p. (in Russ.).
- Yu.A. Tereshin, Pavlov D.A. Protection against progressive collapse of foundry yards of blast furnaces. *International scientific journal "Symbol of Science"* 2022; 4-2: 25-27 - 3 p. (in Russ.).
- Rekunov S.S., Kosova A.Yu., Ivanov S.Yu., Zavyalov I.S. Calculation of a multi-story building for progressive collapse under seismic impact. *Inzhererno-stroitel'nyj vestnik Prikasiya*. 2021; No. 3 (36): P. 15–20. – 6 p. (in Russ.). DOI: 10.52684/2312-3702-2021-36-2-15-20
- Mitrovic B. Verification of the method of using the reduction coefficient in the calculation of monolithic reinforced concrete systems for resistance to progressive cavity. *Construction and reconstruction*. 2021; (3): 68-75. (in Russ.).
- Vedyakov I.I., Soloviev D.V. Development of a methodology for assessing the risk of progressive collapse. *Bulletin of the Research Center "Construction"*. 2021; 28(1): 5-15. (in Russ.).
- Krasnoshchekov Yu.V. Protection against progressive collapse of buildings with prefabricated reinforced concrete ceilings. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (2): 290-299. (in Russ.).
- Kolchunov V.I., Moskovtseva V.S., Bushanova O.B., Zhukov D.I. Computational analysis of protection methods for monolithic frames of multistory buildings with flat slabs from progressive collapse. *Construction and reconstruction*. 2021; (4): 35-44. (in Russ.).
- Zavyalova O.B., Kulikov V.V. Features of creating design schemes, calculation and design of a multi-storey frame building in compliance with protection measures against progressive collapse. *Astrakhan: GAOU JSC VO "AGASU"*, 2022; 1 (39): pp. 58–65. (in Russ.).
- Istomin A.F., Kuchin M.V. Evaluation of the factors of progressive collapse of building structures. *Systems Methods Technologies*. 2022; 3 (55): 152-158 - 7 p. (in Russ.).
- Lisnevsky A.E. Problems of progressive collapse. *Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2022. 31-38 - 8 p. (in Russ.).
- Karakhanyan V.B., Ovchinnikov I.I., Baev M.A., Ovchinnikov I.G. Features of progressive destruction in relation to bridge structures. *Transport facilities*. 2020; 2: 1-20 - 20 p. (in Russ.).
- Podshivalov I.I. Analysis of the results of modeling the stress state of columns and connections of an experimental building from progressive collapse. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2022; 24 (3): 180–190 – 11 p. (in Russ.).
- Foad Kiakojouri, Valerio De Biagi, Bernardino Chiaia, Mohammad Reza Sheidaii Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects. *Engineering Structures*. 2020; 206.
- Ibrahim M.H. Alshaikh, B.H. Abu Bakar, Emad A.H. Alwesabi, Hazizan Md Akil Experimental investigation of the progressive collapse of reinforced concrete structures: An overview. *Structures*. 2020; 25: 881-900 – 20 p.
- Foad Kiakojouri, Mohammad Reza Sheidaii, Valerio De Biagi, Bernardino Chiaia Progressive collapse of structures: A discussion on annotated nomenclature. *Structures*. 2021; 29: 1417-1423 – 7 p.
- Iftikhar Azi, Jian Yang, Sanjeev Bhatta, Feiliang Wang, Qing-feng Liu Factors influencing the progressive collapse resistance of RC frame structures. *Journal of Building Engineering*. 2020; 27.
- Foad Kiakojouri, Valerio De Biagi, Bernardino Chiaia, Mohammad Reza Sheidaii Strengthening and retrofitting techniques to mitigate progressive collapse: A critical review and future research agenda. *Engineering Structures*. 2020; 262.
- Hamzeh Shakib, Maedeh Zakersalehi, Vahid Jahangiri, Reza Zamanian Evaluation of Plasco Building fire-induced progressive collapse. *Structures*. 2020; 28: 205-224 – 10 p.

23. Xiao-Huang-Can He, Tak-Ming Chan, Kwok-Fai Chung Effect of inter-module connections on progressive collapse behaviour of MiC structures. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021; 185.
24. Bao Meng, Liangde Li, Weihui Zhong, Zheng Tan, Qiangqiang Du Improving anti-progressive collapse capacity of welded connection based on energy dissipation cover-plates. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022; 188.
25. De-Cheng Feng, Hai-Rong Shi, Fulvio Parisi, Emanuele Brunesi, Chun-Lin Wang. Efficient numerical model for progressive collapse analysis of prestressed concrete frame structures. *Engineering Failure Analysis*. 2021; 129.
26. Ibrahim M.H. Alshaikh a b, B.H. Abu Bakar a, Emad A.H. Alwesabi a b, Abdullah M. Zeyad c, Hassan M. Magbool Finite element analysis and experimental validation of progressive collapse of reinforced rubberized concrete frame. *Structures*. 2020; 33: 2361-2373 – 13 p.
27. De-Cheng Feng, Si-Cong Xie, Jun Xu, Kai Qian. Robustness quantification of reinforced concrete structures subjected to progressive collapse via the probability density evolution method.. *Engineering Structures*. 2020; 202.
28. Yun-Hao Weng, Kai Qian, Feng Fu, Qin Fang. Numerical investigation on load redistribution capacity of flat slab substructures to resist progressive collapse. *Journal of Building Engineering*. 2020; 29.
29. Huiyun Qiao, Xinyu Xie, Yu Chen Improvement of progressive collapse resistance for a steel frame system with beam–web opening. *Engineering Structures*. 2022; 256.
30. Yuan Tian, Kaiqi Lin, Xinzhen Lu, Lei Zhang, Yi Li, Hong Guan. Experimental and theoretical study of seismic and progressive collapse resilient composite frames. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020; 139.
31. Martina Scalvenzi, Sebastiano Gargiulo, Fabio Freddi, Fulvio Parisi. Impact of seismic retrofitting on progressive collapse resistance of RC frame structures. *Engineering Failure Analysis*. 2022; 131.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Истомин А. Ф. Исследование описанной в работе темы, разработка расчетной модели и проведение расчетов, анализ результатов, подготовка текста статьи.

Ананьев М. Ю. Общее руководство научной деятельностью, организация работы, рецензирование, подготовка текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Istomin Anton F. Research of the topic described in the work, development of the calculation model and calculations, analysis of the results, writing the manuscript.

Ananyin Mikhail Y. Concept design, general management of the research, organization of research activities, reviewing, writing the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Истомин Антон Федорович – аспирант Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ) (620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6957-2109>,

SPIN-код: 8412-5086,

Researcher ID: HGC-9578-2022,

e-mail: istomin.anton89@gmail.com

Ананьев Михаил Юрьевич – канд. техн. наук, доц. Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ) (620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5077-0834>,

SPIN-код: 2323-3614,

Scopus: 57202286491,

Researcher ID: GWZ-3221-2022,

e-mail: m.y.ananin@urfu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Istomin Anton F. – postgraduate student of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU) (620062, Yekaterinburg, Mira str., 19).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6957-2109>,

SPIN-code: 8412-5086,

Researcher ID: HGC-9578-2022,

e-mail: istomin.anton89@gmail.com

Ananin Mikhail Y. – Ph.D. (Eng.), Associate Professor of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU) (620062, Yekaterinburg, Mira str., 19).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5077-0834>,

SPIN-code: 2323-3614,

Scopus: 57202286491,

Researcher ID: GWZ-3221-2022,

e-mail: m.y.ananin@urfu.ru

Научная статья

УДК 69.034.96

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-822-831>

EDN: HWXRZV



Check for updates

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ПЕРЕДВИЖНЫХ УЧАСТКОВ СТРОИТЕЛЬНОГО ВОДООТЛИВА И ВОДОПОНИЖЕНИЯ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ, ТОННЕЛЕЙ И МЕТРОПОЛИТЕНОВ

В.И. Сологаев

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),

г. Омск, Россия

sologaev_vi@cdo.sibadi.org

АННОТАЦИЯ

Введение. Строительство подземных объектов в виде трубопроводов, тоннелей и метрополитенов в слабопроницаемых водонасыщенных грунтах, обладающих подвижностью, трудоёмко, дорогостояще и опасно. Системы строительного водопонижения удаляют значительную часть воды из таких грунтов, превращая их в устойчивые породы, пригодные для эффективного проведения земляных работ. Разработка систем передвижных участков водоотлива и строительного водопонижения для трубопроводов, тоннелей и метрополитенов может быть произведена с использованием методологии теории фильтрации воды и воздуха в городском строительстве, метода компьютерного моделирования фильтрации флюидов и производства работ с помощью электронных таблиц, с привлечением новых технологий искусственного интеллекта и обучения машин.

Методы и материалы. Рабочей гипотезой статьи является идея создания комплексного подхода для эффективного решения проблемы подтопления подземными водами в период строительства линейных строительных объектов, подземных трубопроводов, тоннелей и метрополитенов в слабопроницаемых водонасыщенных грунтах. Методы теории фильтрации, применённые в работе, подразделяются на аналитические и численные. Аналитическим операторным методом решены задачи нестационарной фильтрации подземных вод к системам строительного водопонижения. Моделирование с помощью электронных таблиц относится к нескольким процессам рассматриваемого строительного производства. Методом конечных разностей в электронных таблицах решаются фильтрационные модели водопонизительных систем, которые не поддаются аналитическому решению. Кроме того, новой особенностью является применение электронных таблиц для моделирования организации и технологии строительного водоотлива и водопонижения. Рассмотрена возможность применения самообучающихся рекурсивных компьютерных программ.

Обсуждение. Обзор отечественных и зарубежных авторов показал, что прямых публикаций по теме статьи нет. Имеются лишь отдельные вопросы, близкие к тематике представленной работы, связанные со строительством подземных трубопроводов, тоннелей и метрополитенов. При этом проанализированы особенности осушения слабопроницаемых водонасыщенных грунтов, обладающих подвижностью. Предложены к рассмотрению в качестве примера мобильные передвижные участки систем строительного водоотлива и водопонижения, скорость монтажа и демонтажа которых соизмерима со скоростью передвижения разработки траншеи при открытом способе работ или проходческого щита при закрытом способе работ, например, для перегонного тоннеля метрополитена.

Заключение. Таким образом, разработку систем передвижных участков строительного водоотлива и водопонижения для подземных трубопроводов, тоннелей и метрополитенов предложено производить новым комплексным подходом с использованием методологии теории фильтрации воды и воздуха в городском строительстве, методов компьютерного моделирования фильтрации флюидов и производства работ с помощью электронных таблиц, с привлечением новых технологий искусственного интеллекта и обучения машин.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, водоотлив, водопонижение, трубопроводы, тоннели, метрополитены, теория фильтрации, самообучающиеся программы

Статья поступила в редакцию 14.05.2025; одобрена после рецензирования 18.09.2025; принята к публикации 21.10.2025.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

© Сологаев В.И., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Сологаев В.И. Разработка систем передвижных участков строительного водоотлива и водонижения для трубопроводов, тоннелей и метрополитенов // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 5. С. 822-831. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-822-831>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-822-831>

EDN: HWXRZV

DEVELOPMENT OF MOBILE SYSTEMS FOR CONSTRUCTION DRAINAGE AND DEWATERING FOR PIPELINES, TUNNELS AND METROPOLITANS

Valery I. Sologaev

The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Russia, Omsk
sologaev_v@cd.sibadi.org

ABSTRACT

Introduction. Construction of underground facilities such as pipelines, tunnels and subways in low-permeable water-saturated mobile soils is labor-intensive, expensive and dangerous. Construction dewatering systems remove a significant portion of water from such soils, turning them into stable rocks suitable for efficient excavation works. The development of mobile drainage and construction dewatering systems for pipelines, tunnels and subways can be carried out using the methodology of water and air filtration theory in urban construction, the method of computer modeling of fluid filtration and operations based on using spreadsheets, with the involvement of new artificial intelligence technologies and machine learning.

Methods and materials. The working hypothesis of the research is the idea of creating a comprehensive approach to effectively solve the problem of groundwater flooding during the construction of linear projects, underground pipelines, tunnels and subways in low-permeable water-saturated soils. The methods of filtration theory used in the work are divided into analytical and numerical. The analytical operator method is used to solve the problems of non-stationary filtration of groundwater in construction dewatering systems. Modeling with spreadsheets applies to several processes of construction operations arrangement. The finite difference method in spreadsheets is used to solve filtration models of dewatering systems that cannot be solved analytically. In addition, a new feature is the use of spreadsheets to model organization and technology of construction drainage and dewatering. The possibility of using self-learning recursive computer programs is considered.

Discussion. A review of domestic and foreign studies has shown that there are no publications related to the topic of the article. Certain issues relevant to this paper and referred in particular to the construction of underground pipelines, tunnels and subways have been studied. At the same time, the features of drainage of low-permeable water-saturated mobile soils are analyzed. Mobile sections of construction drainage and dewatering systems are proposed for consideration as an example, their installation and dismantling time being comparable with that of building the trench during open cut construction or the shield speed during tunneling, for example, a subway.

Conclusion. Thus, it is proposed to develop systems for mobile sections of construction drainage and dewatering for underground pipelines, tunnels and subways based on the new integrated approach with the use of the methodology of the theory of water and air filtration in urban construction, methods of computer modeling of fluid filtration and construction operations based on spreadsheets, as well as new technologies of artificial intelligence and machine learning.

KEYWORDS: construction, drainage, dewatering, pipelines, tunnels, subways, filtration theory, self-learning programs

The article was submitted: 14.05.2025; approved after reviewing: 18.09.2025; accepted for publication: 21.10. 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. Sologaev V.I. Development of mobile systems for construction drainage and dewatering for pipelines, tunnels and metropolitans. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (5): 822-831. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-822-831>

© Sologaev Valery I., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Строительство подземных объектов в виде трубопроводов, тоннелей и метрополитенов в слабопроницаемых насыщенных водой грунтах, обладающих подвижностью, трудоёмко, дорогостояще и опасно [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Сложность проведения таких работ усугубляется воздействием климата в городской среде [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22]. Системы строительного водопонижения удаляют значительную часть воды из таких грунтов, тем самым превращая их в устойчивые породы, пригодные для эффективного проведения земляных работ. Разработка систем передвижных участков строительного водоотлива и водопонижения для трубопроводов, тоннелей и метрополитенов может быть произведена с использованием методологии теории фильтрации воды и воздуха в городском строительстве, метода компьютерного моделирования фильтрации флюидов и производства работ с помощью электронных таблиц, с привлечением новых технологий искусственного интеллекта и обучения машин [23, 24, 25].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Рабочей гипотезой статьи является идея создания комплексного подхода для эффективного решения проблемы подтопления подземными водами в период строительства линейных строительных объектов, подземных трубопроводов, тоннелей и метрополитенов в слабопроницаемых насыщенных водой грунтах. Методы теории фильтрации, применённые в работе, подразделяются на аналитические с формулами и численные с компьютерными моделями. Аналитический операторный метод показан в виде примера нестационарной фильтрации подземных вод к системам строительного водоотлива линейных объектов строительства. Моделирование с помощью электронных таблиц относится к нескольким процессам рассматриваемого строительного производства. Методом конечных разностей в электронных таблицах можно вычислить фильтрационные модели водопонизительных систем, когда невозможно получить аналитическое решение в виде формул. Кроме того, новой особенностью является предложение о применении электронных таблиц для моделирования организации и технологии строительного водопонижения. Дополнительно рассмотрена возможность применения самообучающихся рекурсивных компьютерных программ.

Первый вопрос, который возникает перед строительством рассматриваемых линейных объектов в слабопроницаемых насыщенных водой и подвижных грунтах – можно ли обойтись без систем водопонижения? Если можно, то достаточно предусмотреть лишь водоотлив и крепление стенок котлована или траншеи. Пример водоотлива показан на рисунке 1 со стандартными сокращениями.

Рисунок 1 свидетельствует о том, что траншеи и котлованы для линейных объектов в насыщенных водой и подвижных грунтах в стеснённых условиях городского строительства имеют сложную гидрогеологическую картину движения техногенных подземных вод. На рисунке 1 представлен открытый способ проведения земляных и строительно-монтажных работ при устройстве трубопровода большого диаметра. Прилегающие к трассе трубопровода здания и сооружения могут быть подтоплены. Техногенные подземные воды с началом земляных работ приходят в движение и устремляются по грунтовой масse к строительной выработке. По пути фильтрационного движения подземных вод могут быть искусственные препятствия в виде фундаментов, свай, шпунтовых ограждений траншей и котлованов, участков пониженной проницаемости. Эти обстоятельства искажают линии тока подземных вод. Традиционные расчётные методики для систем водоотлива и водопонижения дают слишком грубые результаты о напорах и расходах подземных вод вблизи строительных выработок. Кроме того, процессы фильтрации подземных вод имеют весьма нестационарный характер. И, наконец, процессы строительства подземных выработок тоже обладают нестационарными признаками продвижения строительного участка в пространстве. Покажем, как учесть все эти особенности, постепенно продвигаясь по пунктам комплексной методологии по разработке систем передвижных участков строительного водоотлива и водопонижения для трубопроводов, тоннелей и метрополитенов.

В стеснённых условиях города стенки траншей и котлованов с неустойчивыми мокрыми грунтами стремятся снабдить прочными креплениями. Вариантами креплений могут быть стальной шпунт, металлические профили с деревянными досками-забирками и т.д. Их задача в первую очередь сводится к удерживанию массивов грунтовых толщ от обрушения. Абсолютно герметичными их не делают.

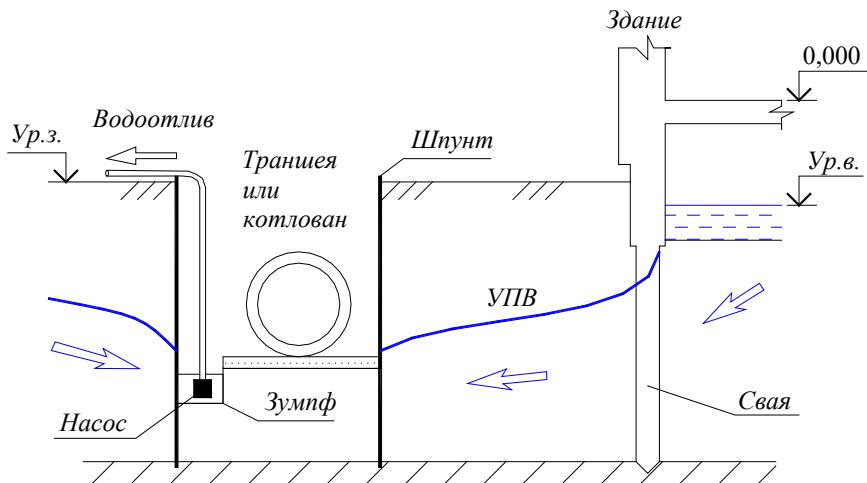


Рисунок 1 – Крепление стенок котлована или траншеи с водоотливом
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Fastening the walls of a pit or a trench with drainage
Source: completed by author.

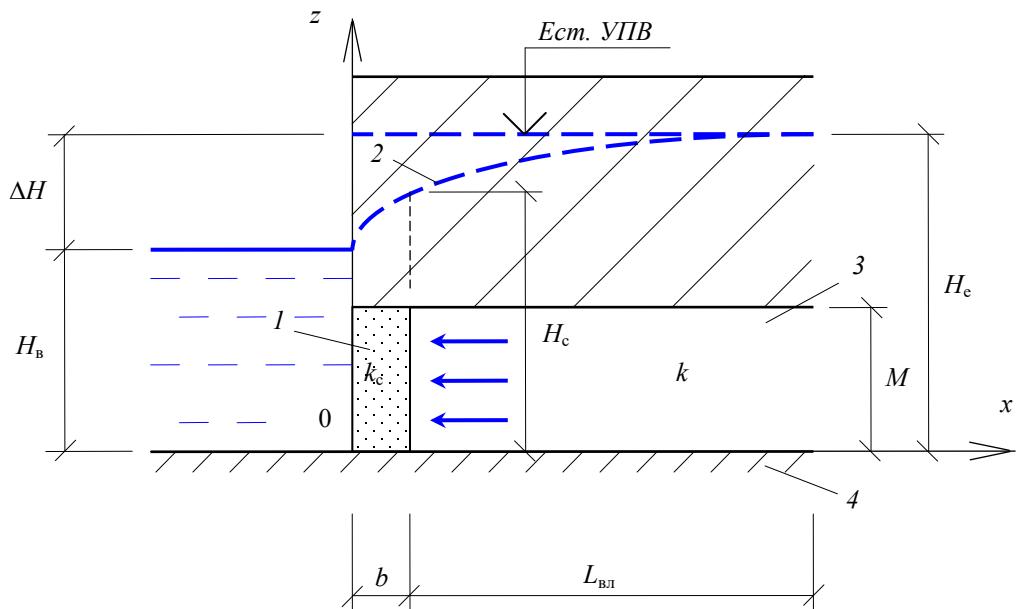


Рисунок 2 – Расчётная схема водоотлива из строительной выработки:
1 – зона пониженной проницаемости; 2 – депрессия УПВ; 3 – водоносный пласт; 4 – водоупорные породы
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Design scheme of drainage for tunnels:
1 – zone of low permeability; 2 – depression of the GWL; 3 – aquifer; 4 – impermeable rocks
Source: completed by author.

Поэтому зона грунта около строительной выработки обладает пониженной проницаемостью, соответствующей коэффициенту фильтрации k_c , м/сут. Водоносный пласт, подходящий снаружи к выработке, обладает коэффициентом фильтрации k , м/сут. Покажем эти две разные зоны грунта на рисунке 2.

На рисунке 2 показаны следующие обозначения: Ест. УПВ – уровень подземных вод в естественном состоянии до начала строительства; H_e – напор техногенных подземных вод в естественном состоянии, м; H_b – напор подземных вод в строительной выработке, м; ΔH – разность напоров, м; b – толщина зоны

крепления выработки, м; $L_{\text{вл}}$ – зона влияния водоотлива, м; остальные обозначения оговорены выше.

Применим как инструмент исследования аналитический операторный метод для решения задачи о нестационарной фильтрации подземных вод к системам водоотлива линейных объектов строительства (см. рисунок 2). Для этого составим систему из двух частных дифференциальных уравнений движения техногенных подземных вод к строительной выработке так:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H_1}{\partial x^2} &= \frac{1}{\eta \cdot a} \cdot \frac{\partial H_1}{\partial t}; \quad 0 \leq x \leq b; \quad \eta = k_c/k; \\ \frac{\partial^2 H_2}{\partial x^2} &= \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial H_2}{\partial t}; \quad b \leq x \leq \infty; \quad a = k \cdot M/\mu, \end{aligned} \quad (1)$$

где t – продолжительность земляных и строительно-монтажных работ в выработке, сут; H_1 – напор техногенных подземных вод в зоне крепления стенок выработки, м; H_2 – напор подземных вод в зоне влияния водоотлива, м; μ – коэффициент водоотдачи грунта; a – коэффициент пьезопроводности или уровнепроводности техногенного водоносного пласта для, соответственно, напорного или безнапорного движения подземных вод, $\text{m}^2/\text{сут}$; M – толщина напорного водоносного пласта, м; остальные обозначения подробно оговорены к рисунку 2, где можно увидеть начальные и граничные условия задачи.

Если строительная выработка проходит в условиях безнапорных грунтовых вод, то вместо толщины M надо подставить среднюю мощность грунтовых вод h_c , м, в виде

$$h_c = (H_e + H_b)/2. \quad (2)$$

Преобразуя систему уравнений (1) операторным методом по Лапласу, получим частное решение для интегральных изображений напоров в зоне пониженной проницаемости грунта около стенок выработки при малых значениях времени t в начале земляных работ, которое выглядит так:

$$\begin{aligned} \overline{H_1} &= \frac{H_e}{p} - \frac{H_e - H_b}{p} \cdot (1 - \beta) \cdot \\ &\cdot \exp\left(-x \cdot \sqrt{\frac{p}{\eta \cdot a}}\right); \quad \beta = \frac{1 - \sqrt{\eta}}{1 + \sqrt{\eta}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где p – параметр Лапласа.

Применяя к формуле (3) обратное преобразование Лапласа, приходим к формуле для определения напора техногенных подземных

вод в зоне пониженной проницаемости грунта около стенок строительной выработки в виде

$$\begin{aligned} H_1 &= H_e - \Delta H \cdot (1 - \beta) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{\eta \cdot a \cdot t}}\right); \\ \beta &= \frac{1 - \sqrt{\eta}}{1 + \sqrt{\eta}}; \quad \eta = \frac{k_c}{k}; \quad 0 \leq x \leq b, \end{aligned} \quad (4)$$

где все обозначения уже оговорены выше.

Кроме значений фильтрационных напоров при водоотливе для правильного подбора насосов понадобится формула водопритока техногенных подземных вод на 1 м длины строительной выработки q_b , $\text{м}^3/(\text{сут} \cdot \text{м})$. Чтобы её получить, надо зависимость (4) умножить на дробь $k_c \cdot M/B$, где B – половина ширины строительной выработки. После этого дифференцируем по координате x . После несложных выкладок найдём формулу для определения водопритока техногенных подземных вод на 1 м длины строительной выработки в виде

$$q_b = \frac{k_c \cdot M \cdot \Delta H}{B \cdot \sqrt{\eta \cdot a \cdot t}}, \quad (5)$$

где все обозначения уже оговорены выше.

Моделирование с помощью электронных таблиц относится к нескольким процессам рассматриваемого строительного производства. Методом конечных разностей (МКР) в электронных таблицах можно вычислить фильтрационные модели водопонизительных систем, когда невозможно получить аналитическое решение в виде формул. Кроме того, новой особенностью является предложение о применении электронных таблиц для моделирования организации и технологии строительного водопонижения. Методология МКР в электронных таблицах подробно рассмотрена в монографии [26].

Рассмотрим дополнительно возможность применения самообучающихся рекурсивных компьютерных программ. Эту компьютерную методологию сейчас называют такими модными терминами как «искусственный интеллект» и «машинаное обучение». Наше новое предложение по применению самообучающихся рекурсивных компьютерных программ состоит в применении для начальных проработок электронных таблиц, имеющих возможность рекурсивного выполнения повторяющихся итераций. Для начинающего исследователя в данной сфере необходимо в самом начале пошагово проследить развитие алгоритма самообучения программы.

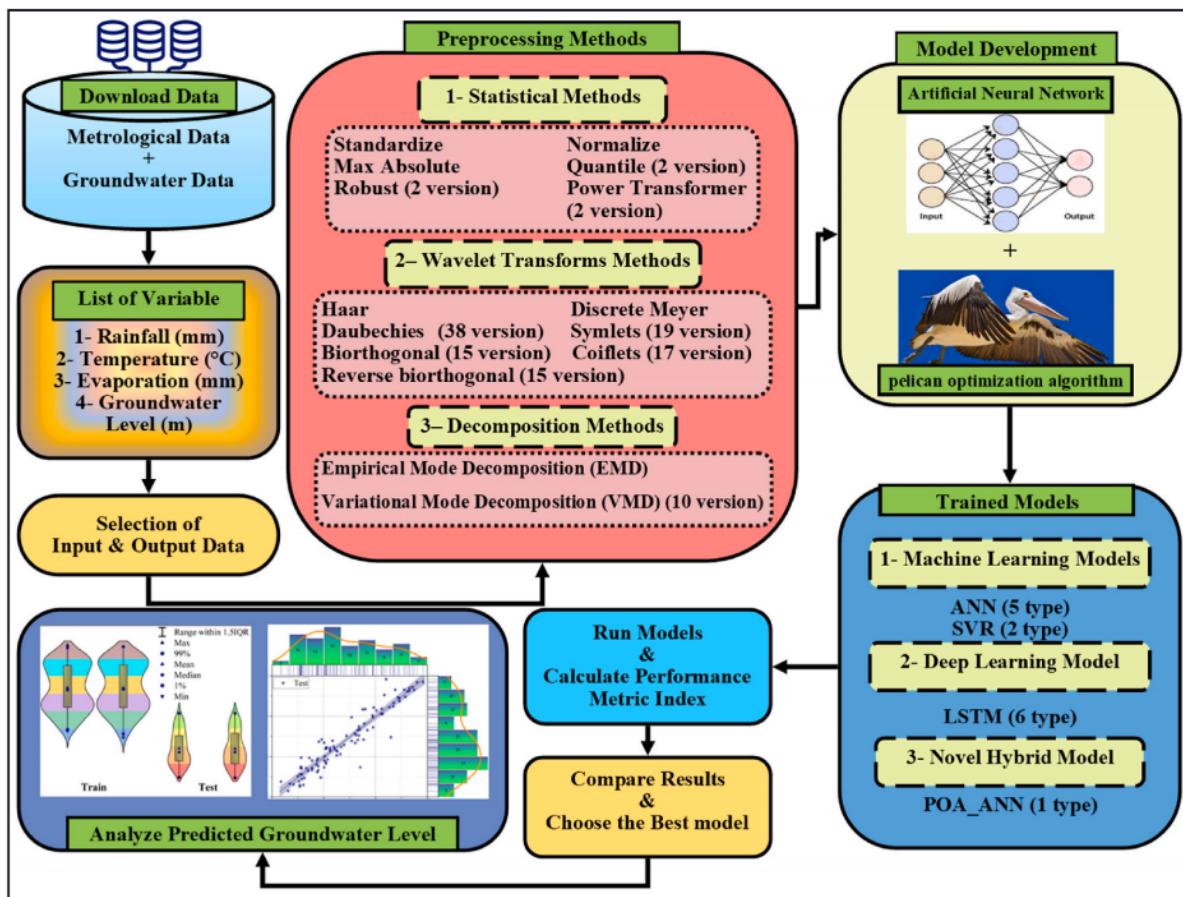


Рисунок 3 – Принципиальная схема предлагаемой методологии [27]

Figure 3 – Schematic diagram of the proposed methodology [27]

В дополнение приводим свежий пример иностранных авторов [27] с попыткой применения искусственного интеллекта и машинного обучения как методологии к исследованию режима грунтовых вод, что показано на рисунке 3.

В предлагаемой авторами работы [27] методологии используются вероятностно-статистические методы. Конкретные примеры использования данной методологии в практике гидрогеологии и строительства не приведены. Это свидетельствует о незавершенности искусственного интеллекта и машинного обучения как методологии к исследованию режима грунтовых вод. Исследования надо продолжать.

ОБСУЖДЕНИЕ

Обзор отечественных и зарубежных авторов показал, что прямых публикаций по теме статьи нет. Имеются лишь отдельные вопросы

сы, близкие к тематике представленной работы, связанные со строительством подземных трубопроводов, тоннелей и метрополитенов. При этом проанализированы особенности осушения слабопроницаемых водонасыщенных грунтов, обладающих подвижностью. Предложены к рассмотрению в качестве примера мобильные передвижные участки систем строительного водоотлива и водопонижения, скорость монтажа и демонтажа которых соизмерима со скоростью передвижения разработки траншеи при открытом способе работ или проходческого щита при закрытом способе работ, например, для перегонного тоннеля метрополитена. Коснемся также вопросов искусственного интеллекта (ИИ).

Д-р техн. наук, проф. В.К. Финн в интервью «Независимой газете» 27.06.2018 г. сформулировал 13 признаков искусственного интеллекта, интернет-адрес:

https://www.ng.ru/nauka/2018-06-27/9_7253_intelligence.html

Признаки искусственного интеллекта (ИИ) по В.К. Финну:

- 1) возможность распознавания существенного в данных;
- 2) порождение последовательности: цель—план—действие;
- 3) возможность отбора посылок, релевантных целям;
- 4) рассуждение – получение следствий из имеющихся посылок;
- 5) принятие решений посредством аргументации;
- 6) рефлексия – способность оценивать свои знания и действия;
- 7) познавательное любопытство – возможность ответить на вопрос «Что такое?»;
- 8) способность к объяснению и к ответу на вопрос «Почему?»;
- 9) синтез познавательных процедур;
- 10) способность к обучению;
- 11) рационализация идей и превращение их в понятия;
- 12) способность объединять имеющиеся знания и создавать целостную картину рассматриваемого явления – способность к интеграции знаний;
- 13) адаптация знаний при изменении условий и жизненных ситуаций или коррекция теорий.

Попробуем использовать эти признаки как инструмент в рамках тематики данной статьи. Из 1-го признака следует, что ИИ – это поиск. Из 2-го – проект. Из 3-го – оптимизация. Из 4-го – решение. Из 5-го – аргументы. Из 6-го – оценка. Из 7-го – определение. Из 8-го – объяснение. Из 9-го – синтез. Из 10-го – обучение. Из 11-го – рационализация. Из 12-го – объединение. Из 13-го – обновление с уточнением знаний.

Обобщая, дадим комплексное определение ИИ для целей нашего исследования.

Искусственный интеллект – это поиск оптимального и аргументированного проектного решения проблемы с определением самооценки и объяснением на основе анализа результатов, с объединением и синтезом принципов рационального самообучения, с последующим уточнением и обновлением знаний об изучаемом объекте исследования.

Нетрудно заметить, что такое определение ИИ очень сильно напоминает действия научно-практического работника и творчески мыслящего опытного проектировщика со стрункой изобретателя, производящих жизненно важную научёмкую продукцию. Такое определение ИИ, возможно, является идеалом ИИ, и

даже, возможно, недостижимой мечтой. Поэтому многие исследователи ИИ рано или поздно приходят к выводу о невозможности полной замены творчески мыслящего человека системами ИИ.

Попытаемся дать техническое определение ИИ как возможности применения самообучающихся рекурсивных компьютерных программ, связанных с какими угодно механизмами. В таком случае мы неизбежно приходим к механизации, автоматизации и роботизации строительного производства. Именно такую перспективу дальнейших исследований мы сейчас намечаем для нашей тематики защиты от подтопления в городском строительстве.

Напоследок покажем сравнительный пример расчёта по представленным формулам (4)-(5) для мобильного передвижного участка систем строительного водоотлива, скорость монтажа и демонтажа которых соизмерима со скоростью передвижения разработки траншеи при открытом способе работ. Основные обозначения показаны на рисунке 2.

По данным инженерно-геологических изысканий определили для водонасыщенного грунта стенок вытянутого котлована коэффициент фильтрации $k = 0,1$ м/сут, а также коэффициент водоотдачи $\mu = 0,05$. Расстояние от центра котлована до грунтовой стенки $B = 12$ м. Напор техногенных подземных вод $H_e = 16$ м. Напор воды на дне выработки $H_b = 6$ м. Дополнительно был определен коэффициент фильтрации крепления стенки котлована $k = 0,00108$ м/сут. Толщина ограждения $b = 0,6$ м. Толщина напорного водоносного слоя $M = 11$ м. Время проведения земляных работ $t = 10$ сут.

По формуле (4) определяем напор техногенных подземных вод в зоне пониженной проницаемости грунта около стенок строительной выработки по цепочке расчётов:

$$\begin{aligned} \eta &= 0,00108/0,1 = 0,0108, \\ a &= 0,1 \cdot 11/0,05 = 22 \text{ м}^2/\text{сут}, \\ \beta &= \frac{1 - \sqrt{0,0108}}{1 + \sqrt{0,0108}} = 0,8116, \\ H_1 &= 16 - 10 \cdot (1 - 0,8116) \cdot \\ &\cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{0,6}{2 \cdot \sqrt{0,0108 \cdot 22 \cdot 10}} \right) = 14,5 \text{ м}. \end{aligned}$$

По формуле (5) находим односторонний водоприток техногенных подземных вод к строительной выработке с креплением

$$q_{\text{в}} = \frac{0,00108 \cdot 11 \cdot 10}{12 \cdot \sqrt{0,0108 \cdot 22 \cdot 10}} = \\ = 0,0642 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{м}).$$

Далее для сравнения рассчитаем по формуле (4), пренебрегая наличием крепления стенки котлована.

Напор на стенке по формуле (4)

$$H_1 = 16 - 10 \cdot (1 - 0) \cdot \\ \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{0,6}{2 \cdot \sqrt{1 \cdot 22 \cdot 10}} \right) = 6,2 \text{ м.}$$

Обратим внимание, что стенка крепления необходима, прежде всего, для устойчивости грунта. Однако расчёт с учётом снижения её фильтрационных свойств показывает, что нестационарные напоры техногенных подземных вод в период проведения земляных работ уменьшаются гораздо медленнее вблизи котлована, что увеличивает опасность местных прорывов размягченного грунта. Поэтому разработанная методология расчёта по формулам (4) и (5) позволяет заблаговременно до начала земляных работ предусмотреть мероприятия по безопасности строительства в условиях техногенного подтопления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработку систем передвижных участков строительного водоотлива и водопонижения для подземных трубопроводов, тоннелей и метрополитенов предложено производить новым комплексным подходом с использованием методологии теории фильтрации воды и газа в городском строительстве, методов компьютерного моделирования фильтрации флюидов и производства работ с помощью электронных таблиц, с привлечением новых технологий искусственного интеллекта и обучения машин. Перспективой дальнейших научных исследований является углубление обозначенного комплексного подхода к защите от подтопления в городском строительстве.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hai-Min Lyu, Shui-Long Shen, Yong-Xia Wu, An-Nan Zhou . Calculation of groundwater head distribution with a close barrier during excavation dewatering in confined aquifer // Geoscience Frontiers. 2021; 12 (2): 791-803. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.08.002>
2. Shousha M.A., Basha A.M., El-enany M.A., Moghazy H.M.. Effect of using grouted vertical barrier

on seepage characteristics under small hydraulic structures // Alexandria Engineering Journal. 2020; 59 (1): 441-455. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.01.013>

3. Siacara A.T., Napa-García G.F., Beck A.T., Futai M.M. Reliability analysis of earth dams using direct coupling // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2020; 12 (2): 366-380. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.07.012>

4. El-Molla D.A, El-Molla M.A. Reducing the conveyance losses in trapezoidal canals using compacted earth lining // Ain Shams Engineering Journal. 2021; 12(3): P. 2453-2463. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.01.018>

5. Barkhordari S., Shahdany S.M.H. A systematic approach for estimating water losses in irrigation canals // Water Science and Engineering. 2022; 15(2): 161-169. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2022.02.004>

6. Mansour M.A., Aly M.M. A simulation-optimization approach for optimal design of dewatering systems in unconfined strata // Alexandria Engineering Journal. 2020; 59(2): 839-850. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.02.029>

7. Chang H., Ross A.R. Climate Change, Urbanization, and Water Resources. Portland: Springer, 2024. 198 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-49631-8>

8. Kumareswaran K., Jayasinghe G.Y. Green Infrastructure and Urban Climate Resilience. Switzerland: Springer, 2023. 410 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-37081-6>

9. Paolini R., Santamouris M. Urban Climate Change and Heat Islands. Amsterdam, Cambridge, Oxford: Elsevier, 2023. 353 p. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-04618-6>

10. Pathak B., Dubey R.S. Climate Change and Urban Environment Sustainability. Singapore: Springer, 2023. 330 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-7618-6>

11. Sharifi A., Khavarian-Garmsir A.R. Urban Climate, Adaptation and Mitigation. Amsterdam, Cambridge, Oxford : Elsevier, 2023. 378 p. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-01553-7>

12. Giannini L.M., Younsi S., Burchini B., Deiana R., Cassiani G., Ciampi P. Integrating geophysical methods, InSAR, and field observations to address geological hazards and buried archaeological features in urban landscapes // Journal of Applied Geophysics. 2025; 238. P. 105726. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2025.105726>

13. Martinez S., Vellei M., Rendu M., Brangeon B., Griffon C., Bozonnet E. A methodology to bridge urban shade guidelines with climate metrics // Sustainable Cities and Society. 2025; 124. P. 106322. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106322>

14. Shen P., Li Y., Gao X., Chen S., Cui X., Zhang Y., Zheng X., Tang H., Wang M. Climate adaptability of building passive strategies to changing future urban climate // Nexus Review. 2025; 2. I. 2. P.100061.<https://doi.org/10.1016/j.ynexs.2025.100061>

15. Shen P., Li Y., Gao X., Zheng Y., Huang P., Lu A., Gu W., Chen S. Recent progress in building energy retrofit analysis under changing future climate //

Applied Energy. 2025; 383. P. 125441. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125441>

16. Shen P., Wang M., Liu J., Ji Y. Hourly air temperature projection in future urban area by coupling climate change and urban heat island effect // Energy and Buildings. 2023; 279. P. 112676. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112676>

17. Liu S., Wang Y., Liu X., Yang L., Zhang Y., He J. How does future climatic uncertainty affect multi-objective building energy retrofit decisions? Evidence from residential buildings in subtropical Hong Kong // Sustainable Cities and Society. 2023; 92. P. 104482. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104482>

18. Fernandes M., Coutinho B., Rodrigues E. The impact of climate change on an office building in Portugal: Measures for a higher energy performance // Journal of Cleaner Production. 2024; 445. P. 141255. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141255>

19. Abdeen A., Mushtaha E., Hussien A., Gheenai C., Maksoud A., Belpoliti V. Simulation-based multi-objective genetic optimization for promoting energy efficiency and thermal comfort in existing buildings of hot climate // Results in Engineering. 2024; 21. P. 101815. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101815>

20. Li J., Zhai Z., Li H., Ding Y., Chen S. Climate change's effects on the amount of energy used for cooling in hot, humid office buildings and the solutions // Journal of Cleaner Production. 2024; 442. P. 140967. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140967>

21. Tomrukcu G., Ashrafian T. Climate-resilient building energy efficiency retrofit: Evaluating climate change impacts on residential buildings // Energy and Buildings. 2024; 316. P. 114315. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114315>

22. Shen P. Building retrofit optimization considering future climate and decision-making under various mindsets // Journal of Building Engineering. 2024; 96. P. 110422. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110422>

23. Caron C., Lauret P., Bastide A. Machine Learning to speed up Computational Fluid Dynamics engineering simulations for built environments: A review // Building and Environment. 2025; 267. P. 112229. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112229>

24. Вандер П.Д. Python для сложных задач: наука о данных. Санкт-Петербург: Питер, 2025. 592 с.

25. Куликова И.В. Нейросети на Python. Основы ИИ и машинного обучения. Наука и техника. Санкт-Петербург, 2025. 304 с.

26. Сологаев В.И. Фильтрационные расчёты и компьютерное моделирование при защите от подтопления в городском строительстве: монография. Омск: СиБАДИ, 2002. 416 с.

27. Mohsen Saroughi, Ehsan Mirzania, Mohammed Achite, Okan Mert Katipo, Nadhir Al-Ansari, Dinesh Kumar Vishwakarma, Il-Moon Chung, Maha Awjan Alreshidi, Krishna Kumar Yadav. Evaluate effect of 126 pre-processing methods on various artificial intelligence models accuracy versus normal mode to predict groundwater level // Heliyon. 2024, 10. P. e29006. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29006>

REFERENCES

1. Hai-Min Lyu, Shui-Long Shen, Yong-Xia Wu, An-Nan Zhou . Calculation of groundwater head distribution with a close barrier during excavation dewatering in confined aquifer. *Geoscience Frontiers*. 2021; 12 (2): 791-803. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.08.002>
2. Shousha M.A., Basha A.M., El-enany M.A., Moghazy H.M. Effect of using grouted vertical barrier on seepage characteristics under small hydraulic structures. *Alexandria Engineering Journal*. 2020; 59 (1): 441-455. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.01.013>
3. Siacara A.T., Napa-Garcia G.F., Beck A.T., Futai M.M. Reliability analysis of earth dams using direct coupling. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2020; 12 (2): 366-380. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.07.012>
4. El-Molla D.A., El-Molla M.A. Reducing the conveyance losses in trapezoidal canals using compacted earth lining. *Ain Shams Engineering Journal*. 2021; 12. (3): 2453-2463. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.01.018>
5. Barkhordari S., Shahdany S.M.H. A systematic approach for estimating water losses in irrigation canals. *Water Science and Engineering*. 2022; 15(2): 161-169. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2022.02.004>
6. Mansour M.A., Aly M.M. A simulation-optimization approach for optimal design of dewatering systems in unconfined strata. *Alexandria Engineering Journal*. 2020; 59 (2): 839-850. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.02.029>
7. Chang H., Ross A.R. Climate Change, Urbanization, and Water Resources. Portland, Springer, 2024. 198 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-49631-8>
8. 8. Kumareswaran K., Jayasinghe G.Y. Green Infrastructure and Urban Climate Resilience. Switzerland: Springer, 2023. 410 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-37081-6>
9. Paolini R., Santamouris M. Urban Climate Change and Heat Islands. Amsterdam, Cambridge, Oxford: Elsevier, 2023. 353 p. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-04618-6>
10. Pathak B., Dubey R.S. Climate Change and Urban Environment Sustainability. Singapore: Springer, 2023. 330 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-7618-6>
11. Sharifi A., Khavarian-Garmsir A.R. Urban Climate, Adaptation and Mitigation. Amsterdam, Cambridge, Oxford: Elsevier, 2023. 378 p. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-01553-7>
12. Giannini L.M., Younsi S., Burchini B., Deiana R., Cassiani G., Ciampi P. Integrating geophysical methods, InSAR, and field observations to address geological hazards and buried archaeological features in urban landscapes. *Journal of Applied Geophysics*. 2025; 238: P. 105726. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2025.105726>
13. Martinez S., Vellei M., Rendu M., Brangeon B., Griffon C., Bozonnet E. A methodology to bridge urban shade guidelines with climate metrics. *Sustainable Cities and Society*. 2025; 124. P. 106322. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106322>

14. Shen P., Li Y., Gao X., Chen S., Cui X., Zhang Y., Zheng X., Tang H., Wang M. Climate adaptability of building passive strategies to changing future urban climate. *Nexus Review*. 2025; 2. I. 2. P. 100061. <https://doi.org/10.1016/j.nxns.2025.100061>
15. Shen P., Li Y., Gao X., Zheng Y., Huang P., Lu A., Gu W., Chen S. Recent progress in building energy retrofit analysis under changing future climate. *Applied Energy*. 2025; 383, P. 125441. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125441>
16. Shen P., Wang M., Liu J., Ji Y. Hourly air temperature projection in future urban area by coupling climate change and urban heat island effect. *Energy and Buildings*. 2023; 279, P. 112676. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112676>
17. Liu S., Wang Y., Liu X., Yang L., Zhang Y., He J. How does future climatic uncertainty affect multi-objective building energy retrofit decisions? Evidence from residential buildings in subtropical Hong Kong. *Sustainable Cities and Society*. 2023; 92, P. 104482. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104482>
18. Fernandes M., Coutinho B., Rodrigues E. The impact of climate change on an office building in Portugal: Measures for a higher energy performance. *Journal of Cleaner Production*. 2024; 445 P. 141255. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141255>
19. Abdeen A., Mushtaha E., Hussien A., Ghenai C., Maksoud A., Belpoliti V. Simulation-based multi-objective genetic optimization for promoting energy efficiency and thermal comfort in existing buildings of hot climate. *Results in Engineering*. 2024; 21, P. 101815. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101815>
20. Li J., Zhai Z., Li H., Ding Y., Chen S. Climate change's effects on the amount of energy used for cooling in hot, humid office buildings and the solutions. *Journal of Cleaner Production*. 2024; 442, P. 140967. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140967>
21. Tomrukcu G., Ashrafiyan T. Climate-resilient building energy efficiency retrofit: Evaluating climate change impacts on residential buildings. *Energy and Buildings*. 2024; 316, P. 114315. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114315>
22. Shen P. Building retrofit optimization considering future climate and decision-making under various mindsets. *Journal of Building Engineering*. 2024; 96, P. 110422. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110422>
23. Caron C., Lauret P., Bastide A. Machine Learning to speed up Computational Fluid Dynamics engineering simulations for built environments: A review. *Building and Environment*. 2025; 267, P. 112229. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112229>
24. Vander P.D. Python dlya slozhnykh zadach: nauka o dannykh. Sankt-Peterburg: Piter, 2025; 592 p (in Russ.).
25. Kulikova I.V. Neyroseti na Python. Osnovy II i mashinnogo obucheniya. Sankt-Peterburg: Nauka i tekhnika, 2025; 304 p (in Russ.).
26. Sologaev V.I. Fil'tratsionnye raschoty i komp'yuternoye modelirovaniye pri zashchite ot podtopleniya v gorodskom stroitel'stve: monografiya. Omsk: Izd-vo SibADI, 2002. 416 p. (in Russ.).
27. Mohsen Saroughi, Ehsan Mirzania, Mohammed Achite, Okan Mert Katipo, Nadhir Al-Ansari, Dinesh Kumar Vishwakarma, Il-Moon Chung, Maha Awjan Alreshidi, Krishna Kumar Yadav. Evaluate effect of 126 pre-processing methods on various artificial intelligence models accuracy versus normal mode to predict groundwater level *Helijon*. 2024; 10 P. e29006. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29006>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сологаев Валерий Иванович – д-р техн. наук, проф. ВАК РФ, проф. кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ), (644050, г. Омск, пр. Мира 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2553-9892>,

SPIN-код: 1614-0440,

e-mail: sologaev_vi@cdo.sibadi.org

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Sologaev Valery I. – Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Higher Attestation Commission (HAC, RF), Professor of the Department of Industrial and Civil Construction, the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), (644050, Russia, Omsk, Mira St., 5)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2553-9892>,

SPIN-code: 1614-0440,

e-mail: sologaev_vi@cdo.sibadi.org

Научная статья

УДК 625.7.004.9

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-832-843>

EDN: KRQKWI



Check for updates

НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КАРТ К РЕАЛЬНЫМ УСЛОВИЯМ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА ИНСТРУМЕНТАМИ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Т.В. Боброва **В.А. Уткин**Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия ответственный автор
bobrova.tv@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Вектор технологий информационного моделирования в дорожной отрасли (ТИМ АД) постепенно смещается из области проектирования объектов в область непосредственного управления строительством. Элементы ТИМ пока слабо используются в сфере производства из-за отсутствия необходимых инструментов и методик для управления ходом работ в условиях строительной площадки. Повысить результативность оперативного управления технологическими процессами может применение электронных технологических карт (ЭТК). Для этого технологические карты должны адекватно отражать реальные условия строительства: параметры техники, объемы работ по длине автомобильной дороги, свойства материалов, учитывать погодные факторы. Эти проблемы и актуальность применения ТИМ на стадии строительства определили цель данной статьи: разработать модель и алгоритм привязки параметров технологических карт в дорожном строительстве к реальным условиям производства для оперативного управления организационными и технологическими процессами с использованием ТИМ и компьютерных программ календарно-сетевого планирования.

Модели и методы. В статье представлен метод настройки функциональных, временных и пространственных параметров ЭТК с применением технологий информационного моделирования. На первом этапе базовую модель ЭТК строят в виде потоковой структуры технологического процесса (ТП). Модель включает элементы системы и связи между ними в виде выполняемых операций преобразования элементов из одного состояния в другое. На втором этапе формируют пространственную структуру модели с декомпозицией фронта работ на сменные участки (захватки) с оценкой длительности операций при заданном ресурсном обеспечении. Реализацию ТИМ выполняют в среде компьютерных программ по управлению проектами.

Результаты. Использование метода продемонстрировано на примере разработки цифровой модели типовой ТК в программе MS Project и трансформации её параметров к условиям реального производства при строительстве земляного полотна автомобильной дороги.

Заключение. Применение электронных ТК в условиях строительной площадки повышает точность и оперативность текущего планирования, обеспечивает актуальной информацией производителей работ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорожное строительство, технологический процесс, информационная модель технологической карты, параметрическое моделирование, сменный почасовой график, интегрированная информационная среда

Статья поступила в редакцию 03.08.2025; одобрена после рецензирования 16.09.2025; принята к публикации 21.10.2025.

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: Боброва Т.В., Уткин В.А. Настройка параметров технологических карт к реальным условиям дорожно-строительного производства инструментами информационного моделирования // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 5. С. 832-843. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-832-843>

© Боброва Т.В., Уткин В.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-832-843>

EDN: KRQKWI

SETTING UP PROCESS CHARTS' PARAMETERS TO REAL ROAD CONSTRUCTION CONDITIONS WITH THE USE OF INFORMATION MODELING TOOLS

Tatyana V. Bobrova , **Vladimir A. Utkin**
Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia

 Corresponding author
bobrova.tv@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. The focus of information modeling technologies in the road industry is gradually shifting from the design of facilities to the management of construction. Elements of information modeling technologies are currently underutilized in production due to the lack of necessary tools and methodologies for managing work progress under construction site conditions. The use of electronic technological maps can improve the efficiency and fasten operational process management. To achieve this, process charts must adequately reflect actual construction conditions: equipment parameters, volumes of work along the road length, material properties, and must take into account weather factors. These challenges and the relevance of using information modeling technologies during the construction phase determined the purpose of this article: to develop a model and algorithm for linking process chart parameters in road construction to actual production conditions to optimize the organizational and technological process operational management with the use of information modeling technologies and calendar-network planning computer programs.

Models and Methods. This article presents a method for setting the functional, temporal, and spatial parameters of electronic process charts using information modeling technologies. At the first stage, the basic process map model is constructed as a flow structure of the technological process. The model includes system elements and the relationships between them in the form of the performed operations of element transformation from one state to another. At the second stage, the spatial structure of the model is formed by decomposing the front of work into replaceable sections (segments), with the estimation of operation duration with a determined resource provision. The information modeling technologies have been implemented with the use of project management software.

Results. Method's application has been demonstrated by the example of developing a digital model of the typical technological process flow chart in "MS Project" and by transforming its parameters to real conditions for the highway roadbed construction.

Conclusion. The use of electronic process charts, on a construction site improves the accuracy and efficiency of the current planning and provides contractors with up-to-date information.

KEYWORDS: road construction, technological process, information model of the process chart, parametric modeling, hourly shift schedule, integrated information environment

The article was submitted: August 3, 2025; **approved after reviewing:** September 16, 2025; **accepted for publication:** October 21, 2024.

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. Bobrova T.V., Utkin V.A. Setting up process charts' parameters to real road construction conditions with the use of information modeling tools. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (5): 832-843. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-832-843>

© Bobrova Tatyana V., Utkin Vladimir A., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

В дорожной отрасли за последние годы много делается для создания благоприятных условий в области цифровой трансформации: упорядочение нормативной базы, создание машиночитаемых технических регламентов, развитие специального программного обеспечения, обучение специалистов. Новые информационные технологии должны восприниматься не только как умение работать в компьютерных программах, но и как возможность более эффективно управлять реальными объектами. Авторы [1, 2, 3] обращают внимание на необходимость создания «антропогенной среды обитания в цифровом формате», чтобы цифровая информационная модель (ЦИМ) стала привычным способом обмена информацией между участниками инвестиционных проектов для принятия решений на всех уровнях. В этом ключе цикл PDCA (Деминга): «Планируй – Делай – Проверяй – Действуй»¹ звучит особенно актуально и может быть применен ко всем процессам в системе управления сроками и качеством дорожного строительства.

Основная информационная модель автомобильной дороги создается на стадии проектирования объекта, когда формируются принципиальные конструктивные решения. Создание цифровой информационной модели автомобильной дороги (ЦИМ АД) на стадии проектирования позволяет в дальнейшем обрабатывать эту информацию в автоматизированном режиме, в том числе для проектирования организационно-технологических способов производства работ [4, 5, 6].

Системы автоматизированного проектирования (САПР АД), используемые при обработке результатов инженерных изысканий и проектировании дорожной части, в России развиваются давно. Такие САПР конкурируют как с зарубежными аналогами, так и друг с другом. Еще до возникновения острой необходимости в импортозамещении они занимали весомую долю отечественного рынка. Основными преимуществами отечественных САПР АД перед зарубежными аналогами яв-

ляются высокая адаптированность программных продуктов под российские нормативные требования и методы проектирования, а также поддержка и учет пожеланий пользователей².

В настоящее время вектор информационных технологий постепенно смещается из области проектирования объектов в область непосредственного управления строительством. Исследователи обозначают это направление как «информационный менеджмент в строительстве». По мнению специалистов, совершенствование взаимодействия этих областей должно быть направлено на повышение интероперабельности (совместимости) моделей, создаваемых в разных системах³. Опыт создания такой интегрированной среды в промышленном производстве продемонстрировал возможности совмещения этапов проектирования изделия и отдельных стадий технологического процесса его изготовления [7]. Метод основан на создании библиотеки параметрических моделей конструктивных элементов (деталей, изделий) и организации единого информационного пространства технологической подготовки производства [8, 9].

Исследования связности параметров цифровых моделей объектов на стадиях жизненного цикла ведутся и в строительном производстве. В работах [10, 11, 12] рассмотрены вопросы развития интегрированной среды на базе информационных моделей, содержащих необходимую геометрическую, физическую и техническую информацию для реализации параметрического моделирования в строительстве. На базе этой информации предполагается формирование и пополнение базы знаний отраслевых экспертных систем для управления технологическими процессами, контролем качества работ и обеспечением безопасных условий на строительной площадке [13, 14, 15].

Крупные заказчики и подрядчики в разных строительных направлениях используют в своей деятельности отечественные и зарубежные программные продукты для управления производством на основе календарно-сетевого планирования: *Renga*, *Model Studio CS*, Адепт,

¹ ГОСТР ИСО 9001–2015. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 сентября 2015 г. № 1391-Система менеджмента качества.

² Дамир Ильясов. Информационное моделирование автомобильных дорог: российские решения и перспективы импортозамещения [Электронный ресурс]: <<https://bim-info.ru/articles/informatsionnoe-modelirovaniye-avtomobilnykh-dorog-rossiyskie-resheniya-i-perspektivy-importozameshch/>> (дата обращения: 24.02.2025).

³ Олейников А.Я. Обеспечение интероперабельности информационных систем [Электронный ресурс]: <https://www.itweek.ru/upload/iblock/6c4/oleynikov.pdf> (дата обращения: 20.07.2025).

Spider, *Plan-R*, *MS Project* и др. В последние годы увеличилось количество исследований, связанных с применением ТИМ в дорожной отрасли [16, 17, 18]. Консалтинговая компания «Айбим» провела экспресс-обследование текущих процессов управления проектом при строительстве крупного промышленного объекта. В качестве инструмента управления сроками выбрали российское ПО *Plan R*. Для повышения качества и точности планирования, формирования корректных отчетов была разработана система на основе связности цифровых моделей графиков на организационно-технологическом, функциональном и операционном уровнях, что соответствовало интегрированному графику на уровне генподрядчика, локальным графикам подрядных и субподрядных организаций, рабочим планам непосредственных исполнителей работ. Методологической основой планирования и актуализации графиков выступил практико-ориентированный подход. Каждому графику соответствовали определенные организационно-технологические решения в зависимости от степени детализации работ. На рисунке 1 представлена схема взаимосвязи графиков

при управлении экспериментальным объектом⁴.

Анализ взаимосвязи плановых графиков показал преимущества использования совместной унифицированной базы данных для оптимизации производственных процессов в масштабе строительного проекта на разных стадиях его жизненного цикла. В то же время выявились определенные сложности увязки графиков верхнего уровня с рабочими графиками производителей работ на строительной площадке. Причины несогласованности часто связаны с недостаточным учетом в технологических процессах структурных изменений производственных факторов: материально-технических, организационных, климатических. В интегрированном графике 3-го уровня (см. рисунок 1) план производства работ должен учитывать состав парка машин подрядной организации, т.е. уже на этом уровне должна выполняться привязка типовых технологических карт к производственным условиям. Далее на уровне исполнителей работ карты технологических процессов и рабочие графики 4-го уровня необходимо оперативно актуализировать с учетом реальных условий строительства.



Рисунок 1 – Схема взаимосвязи цифровых моделей графиков в интегрированной среде⁴

Figure 1 – Scheme of relationship between digital models of graphs in an integrated environment⁴

⁴ Игорь Саенко. Внедрение Plan-R на строительстве крупного промышленного объекта. <https://bim-info.ru/projects/vnedrenie-plan-r-na-stroitelstve-krupnogo-promyshlennogo-objekta/> Дата обращения 20.07.2025).

Указанные обстоятельства обусловили проведение исследований по применению современных информационных технологий для формирования технологических карт и нормирования трудовых процессов при строительстве зданий на основе пространственно-временного моделирования [19, 20]. В то же время при внедрении технологий информационного моделирования (ТИМ) в строительстве автомобильных дорог и других линейных объектов возникают трудности, незнакомые промышленному и гражданскому строительству. Уже на этапе проектирования большая протяженность, сильная зависимость от существующих условий местности, необходимость в точной географической привязке и сложная, изменяющаяся геометрия, делают привычные методы моделирования, пришедшие из промышленно-гражданского строительства, практически неприменимыми. Разработчик типовых технологических карт ОАО «ПКТИпромстрой»⁵ указывает, что «привязка технологической карты к конкретным объектам и местным условиям строительства заключается в уточнении объемов работ, средств механизации и потребности в материально-технических ресурсах, а также в уточнении схемы организации строительного процесса соответственно фактическим габаритам строящегося объекта, калькуляции и календарного плана производства работ». При выполнении в ручном режиме в полевых условиях эта работа является достаточно трудоемкой. Разработка моделей технологических процессов в дорожном строительстве и обеспечение их параметрической связи с конструктивными решениями в меняющейся природной и производственной среде являются актуальными научными задачами.

Сменные графики технологических процессов чаще всего отражаются в виде традиционных линейных схем на типовых технологических картах без необходимой детализации при корректировке для оперативного управления ходом работ и промежуточного контроля качества. Элементы новых информационных технологий пока слабо используются непосредственно в сфере производства дорожных работ из-за отсутствия необходимых инструментов и методик для их применения в ус-

ловиях строительной площадки. Пользу для управления производством могут принести только такие технологические карты, которые адекватно отражают реальные условия строительства: погодные факторы, реальную технику и её производительность, меняющиеся объемы работ по длине автомобильной дороги. Эти проблемы и актуальность применения ТИМ на стадии строительства определили цель данной статьи: разработать модель и алгоритм привязки параметров технологических карт в дорожном строительстве к реальным условиям производства для оперативного управления организационными и технологическими процессами с использованием ТИМ и компьютерных программ календарно-сетевого планирования.

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

Базовая модель строительного технологического процесса (ТП) чаще всего строится в виде потоковой структуры в составе технологической карты (ТК). Модель включает элементы системы и связи между ними в виде выполняемых операций преобразования элементов из одного состояния в другое до получения конечного результата.

По аналогии с математической моделью параметрического моделирования зданий [21], но с учетом специфики объекта, модель технологического процесса сооружения элементов дорожной конструкции представим множеством компонентов этого процесса M_i :

$$M_i = \langle K. P. V_r. C. R. F_s. D \rangle, \quad (1)$$

где K – набор операций в составе ТП $\{k_{i1}, \dots, k_{in}\}$; P – набор параметров (способов) выполнения операций $\{p_1, \dots, p_l\}$; V_r – набор параметров для выполнения операций определенным способом $\{V_{i1}, \dots, V_{in}\}$, где $V_i = \{v_{ri1}, \dots, v_{rin}\}$ – набор значений каждого r -го параметра; C – набор ограничений на значения $\{c_1, \dots, c_n\}$; R – набор требований, предъявляемых к ТП и его результату $\{r_1, \dots, r_n\}$; F_s – значения параметров внешней среды $\{F_1, \dots, F_n\}$, где $\{f_{s1}, \dots, f_{sn}\}$ – набор значений каждого параметра; D – интегральная функция предпочтения варианта ТП.

⁵ Технологическая карта на уплотнение грунта I-II группы самоходными катками 69-04 ТК / <https://meganorm.ru/Data2/1/4293854/4293854055.htm> (дата обращения: 20.07.2025).

В сложных технологических процессах могут рассматриваться варианты отдельных рабочих процессов (РП), входящих в состав ТП. Модель формулы применима и для описания РП входящего в структуру комплексного технологического процесса. В качестве примера на рисунке 2 изображена структурно-модульная схема рабочего процесса послойного уплотнения земляного полотна насыпи. Компоненты, представленные в блоках на рисунке 2, ис-

пользуют в качестве атрибутов для формирования вариантов математической модели рабочего процесса и создания его компьютерной версии. Включение дополнительных связей между рабочими процессами позволяет перейти к модели комплексно-технологического процесса, результатом которого является законченный конструктивный элемент сооружения (земляное полотно автомобильной дороги на определённом участке).

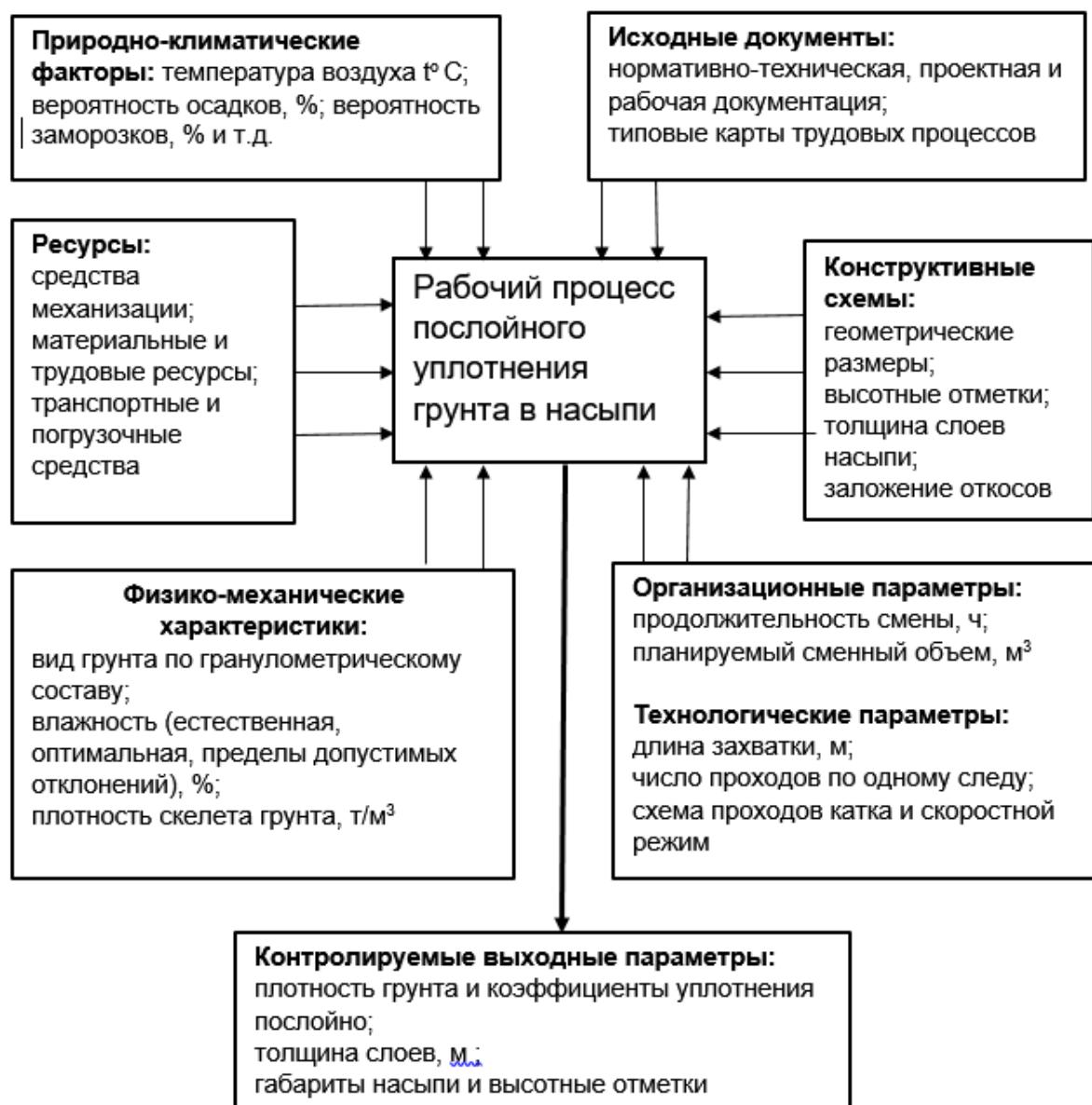


Рисунок 2 – Структурно-модульная схема рабочего процесса послойного уплотнения грунта в насыпи автомобильной дороги
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Structural and modular diagram of the working process of layer-by-layer soil compaction process in the road embankment
Source: compiled by the authors.

В технологической карте, как основной модели ТП в условиях строительной площадки, рассматривают производство работ в нескольких аспектах: функциональном, временном и пространственном. Разные программы управления проектами (*MS Project-Professional, plan-R* и др.) позволяют перейти к сменному

планированию процессов с любой длительностью смены и любой временной детализацией.

На рисунке 3 представлен алгоритм формирования обобщенной модели технологического процесса для линейного дорожного строительства с реализацией в программе календарно-сетевого планирования.

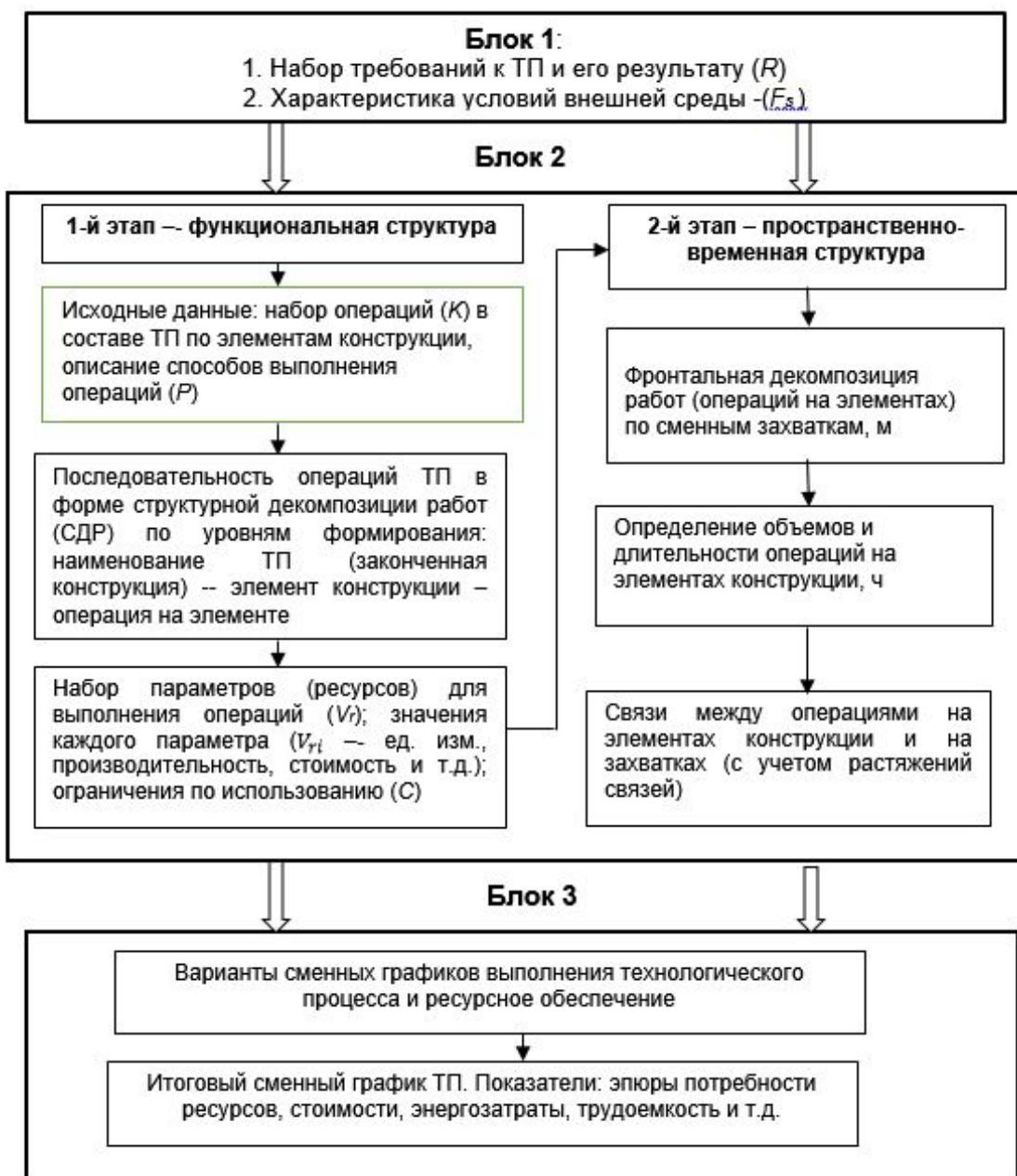


Рисунок 3 – Блок-схема формирования сменного графика ТП в среде календарно-сетевого планирования*
 *Описания показателей: R , F_s , K , P , V_r , C приведены в модели ТП (формула 1)
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Flowchart of shift schedule generation of technological process in the calendar-network planning environment*
 *Descriptions of the indicators: R , F_s , K , P , V_r , C are given in the technological process model (1-st formula)
 Source: compiled by the authors.

В первом блоке модели формируют основные показатели в виде нормативных требований к рабочим процессам и операциям ТП, а также характеристики состояния окружающей среды в период производства работ. На схеме рабочего процесса (см. рисунок 2) эта атрибутивная информация представлена в отдельных блоках, входящих в структуру рабочего процесса. Информацию первого блока целесообразно структурировать в виде «базы данных» для использования при актуализации различных технологических карт в дорожном строительстве.

Во втором блоке показан порядок ввода информации для разработки сменного графика производства работ в соответствии с технологическим процессом. На первом этапе формируют состав операций в виде структурной декомпозиции работ (СДР) на нескольких уровнях. На 2-м этапе создают пространственную структуру модели с декомпозицией фронта работ на сменные участки (захватки), с установлением связей между работами, оценкой длительности операций при заданном ресурсном обеспечении. Итогом расчета модели в 3-м блоке является сменный график развернутого специализированного потока при выполнении рабочих процессов и операций в течение смены на захватках. В процессе информационного моделирования график корректируют с целью равномерной загрузки ресурсов в автоматическом режиме.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для демонстрации предложений по актуализации технологических карт в дорожном строительстве методами информационного моделирования в качестве исходной информации приняты ранее разработанные технологические планы потоков в составе типовых технологических карт. В качестве примера рассмотрен технологический процесс возведения насыпи земляного полотна автомобильной дороги высотой до 1,5 м при разработке грунта II группы в карьере экскаваторами типа ЭО-4225 с вместимостью ковша 1,25 м³ и транспортировкой автомобилями-самосвалами. Календарный график 3-го уровня (см. рисунок 1) разработан на основе типовой технологической карты⁶ (карта № 3) в среде автоматизированного проектирования *MS Project*. Продолжительность смены 8 ч, сменная захватка

при возведении насыпи – 200 м. Длина потока 1 км. Заключительные планировочные работы (верха земляного полотна и откосов) выполняют с организационным разрывом и длиной захватки 800 м. Эти работы не включены в пример. Сменный почасовой график в форме диаграммы Ганта (*MS Project*), отображающий технологию по типовой карте представлен на рисунке 4. СДР включает три уровня: суммарную задачу проекта (наименование карты); фронт работ – номер захватки; перечень операций на захватке.

Реальные условия производства работ по возведению насыпи данной конструкции требуют определенной привязки типовой технологической карты. В суточный график производства работ внесены изменения. Длительность рабочей смены вахтовым методом в северных условиях составила 10 ч. Длина захватки с учетом продолжительности смены принята 250 м. Для послойного уплотнения земляного полотна принят каток ДУ-29 (вместо катка ДУ 101 по типовой карте). Исключена операция увлажнения грунта, так как грунт имеет оптимальную влажность. Количество проходов катка определялось на основе пробного уплотнения. Работы выполняют на 5 сменных захватках, длина фронта работ 1,25 км.

В цифровую модель графика включены точки контроля и приемки работ в течение смены (вехи). На основе составленного суточного графика автоматически в программе рассчитываются все плановые показатели: почасовые эпюры всех видов ресурсов, плановые стоимости работ. Установленные связи между операциями и переходы машин для рациональной загрузки на захватках позволяют эффективно использовать ресурсы, оптимизировать состав отряда и сменную захватку при изменении плановых объемов работ по длине дороги. Рабочая технологическая карта с привязкой параметров к условиям реального строительного участка разработана в программе *MS Project* и представлена на рисунке 5. В примере набор корректируемых параметров типового графика ограничен для лучшего восприятия внесенных изменений.

Сменные графики (см. рисунок 4 и 5) отображают работу развернутого специализированного потока по строительству земляного полотна.

⁶Технологические карты на устройство земляного полотна и дорожной одежды. Введены в действие распоряжением Минтранса России от 23.05.2003 г. № ОС-468-р. Изд-во РОСАВТОДОР. М., 2004. 357 с.

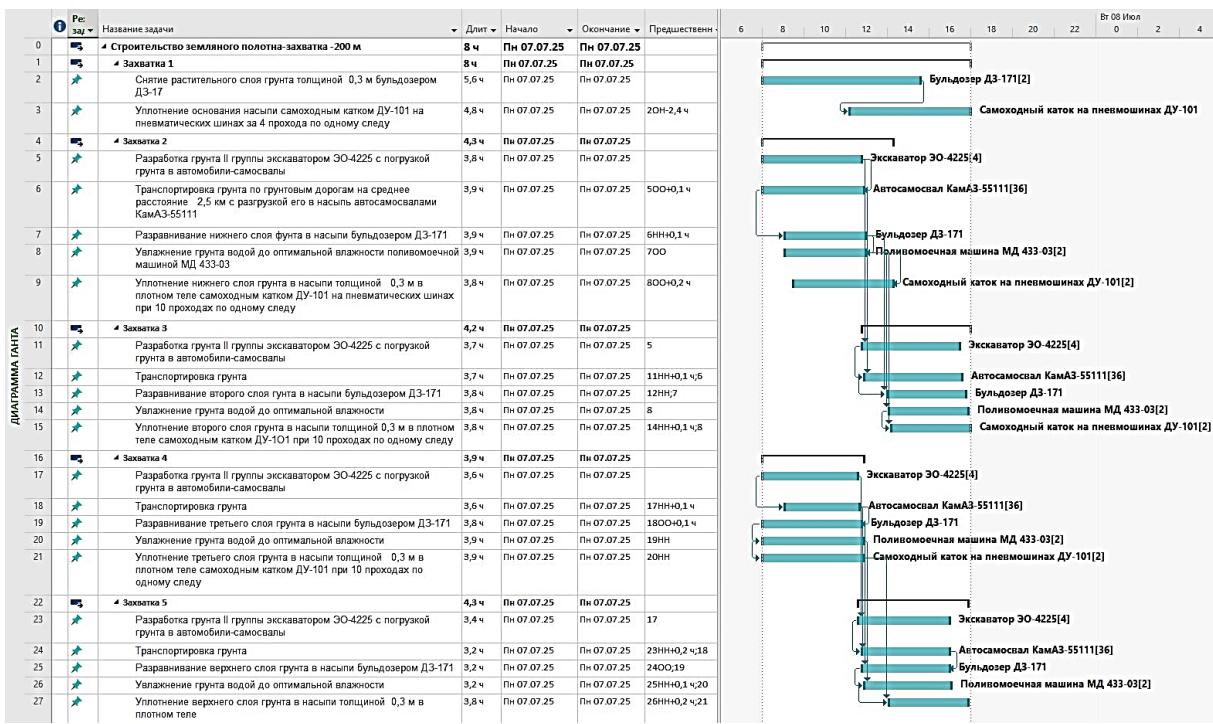


Рисунок 4 – Расчет сменного графика строительства земляного полотна в программе MS Project по типовой технологической карте (захватка 200 м)

Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Calculation of the shift schedule for the roadbed construction in the “MS Project” program according to a typical process chart (200 m coverage)
Source: compiled by the authors.

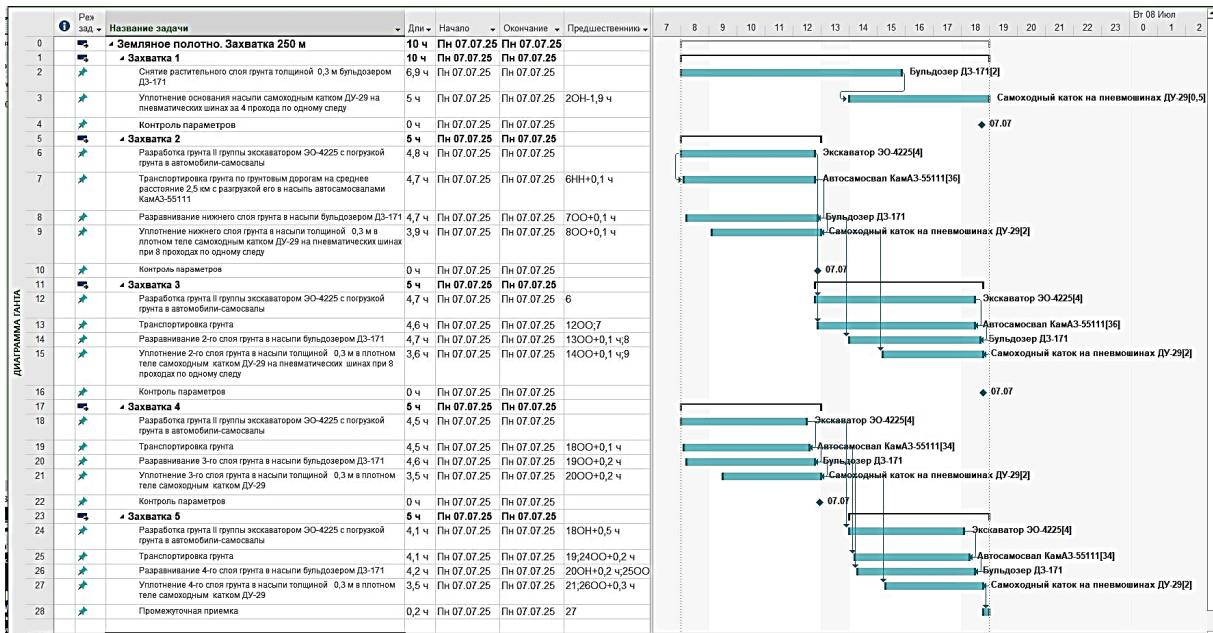


Рисунок 5 – Расчет сменного графика строительства земляного полотна в программе MS Project с привязкой параметров технологической карты к реальным условиям производства работ (захватка 250 м)

Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Calculation of the shift schedule for the roadbed construction in the “MS Project” program with the link of the electronic process chart parameters to the real work conditions (250 m coverage)
Source: compiled by the authors.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный способ актуализации технологических процессов в дорожном строительстве в производственных условиях с использованием методов информационного моделирования позволяет при оперативном планировании учесть состояние и виды используемых машин, свойства материалов, климатические факторы, реальные сроки доставки материальных ресурсов, меняющиеся объемы работ по длине линейного объекта. Наличие информационной модели позволяет также добиться рациональной загрузки машин, оптимизации сменной захватки, планирования сроков промежуточного контроля и приемки работ в течение рабочей смены. Применение электронных ТК повышает точность и оперативность текущего планирования, обеспечивает актуальной информацией производителей работ.

Дальнейшее развитие методов информационного моделирования на всех уровнях управления дорожным строительством предполагает создание интегрированной библиотеки конструктивных элементов дорог, материальных и технических ресурсов, ведение «банка данных» о моделях технологических процессов, а также «базы знаний» о построенных объектах в разных природных условиях. Особого внимания заслуживает применение ТИМ для разработки новых ТК и оптимизации инновационных технологических процессов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Семенова Д.М. Управление проектами в рамках концепции устойчивого развития: вызовы и проблемы // Вестник проектного управления. 2025. Т. 1, № 1. С. 54-61.
- Baghazadeh Shishehgarkhaneh M., Keivani A., Moehler R.C., et al. Internet of Things (IoT), Building Information Modeling (BIM), and Digital Twin (DT) in Construction Industry: A Review, Bibliometric, and Network Analysis. *Buildings*. 2022. 12 (10): 1503. DOI: 10.3390/buildings12101503 EDN: XQAACS
- Возгомент Н.В. Современные вызовы и перспективы развития BIM-моделирования в России в эпоху цифровизации // E-Management. 2020. Т. 3, № 3. С. 20–27. DOI: 10.26425/2658-3445-2020-3-3-20-27
- Сарычев Д.С. Информационное моделирование при разработке проектной и рабочей документации // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2015. № 2(5). С. 20–24. DOI: 10.17273/CADGIS.2015.2.3
- Скворцов А.В. Общая среда данных как ключевой элемент информационного моделирования автомобильных дорог // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2015. № 2(5). С. 37–41. DOI: 10.17273/CADGIS.2015.2.6
- Pentury Ch., Karsaman R. H., Rahman H., Rosmansyah Yu. Application of digitalization and computerization technology in road construction // *Automation in Construction*. 2025. Vol. 171. P. 106018. DOI 10.1016/j.autcon.2025.106018. EDN PGMDTV
- Куликов Д.Д., Яблочников Е.И., Чукичев А.В., Абышев О.А. Методика формирования параметрических моделей деталей для автоматизированного проектирования технологических процессов // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 2. С. 155–161. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-155-161
- Баговрин В.К., Гуляев Ю.В., Олейников А.Я. Обеспечение интероперабельности – основная тенденция в развитии открытых систем // Информационные технологии и вычислительные системы. 2009. № 5. С. 7–15.
- Яблочников Е.И. Организация единого информационного пространства технической подготовки производства с использованием PDM SmarTeam // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2001. № 3. С. 22–29.
- Khodabandeh A., Park J. W. Agent-based modeling and simulation in construction // *Automation in Construction*. 2021. Vol. 131. P. 103882. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103882
- Tripathi A., Dadi G.B., Nassereddine H., et al. Assessing Technology Implementation Success for Highway Construction and Asset Management. *Sensors* 2023. Vol. 23 (7): 3671. DOI: 10.3390/s23073671 EDN: PYKIOE
- Пучков М.В., Бутенко А.А. Параметрическое моделирование архитектурно пространственной среды города на основе информационных технологий // Архитектон: Известия вузов. 2015. № 49. ISSN 1990-4126 <https://archvuz.ru/files/N49pp73-82Putchkov&Butenko.pdf>
- Doukari O., Greenwood D. Automatic generation of building information models from digitized plans // *Automation in Construction*. 2020. Vol. 113. P. 103129. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103129
- Lu Y., Gong P., Tang Y. [et al.] BIM-integrated construction safety risk assessment at the design stage of building projects // *Automation in Construction*. 2021. Vol. 124. P. 103553. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103553
- Ogunrinde O., Nnaji C., Amirkhanian A. Developing Automation Adoption Readiness Index for Quality Management Focused on Highway Construction. *Journal of Infrastructure Systems*. 2021. Vol. 27 (1). DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000595. EDN: SDZBFL
- Razyapov R.V. Application of AR technologies in the building industry // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2559. No 04001. <https://doi.org/10.1063/5.0100069>
- Perkinson C.L., Bayraktar M.E., Ahmad I. The use of computing technology in highway construction as a total jobsite management tool. *Automation in Construction*. 2010. Vol. 19 (7). Pp. 884–897. DOI: 10.1016/j.autcon.2010.06.002.

18. Черняго А.Б. Технология реализации интеллектуального поиска данных в проектной документации автомобильной дороги на этапе строительства // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2022. № 7(63). С. 86–91. DOI: 10.17084/20764359-2022-63-86. EDN SDFYMG
19. Синенко С.А. Применение современных информационных технологий для формирования технологических карт выполнения строительных процессов // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). 2015. № 5 (14). С. 149–151.
20. Bobrova T.V., Panchenko P.M. Technical Normalization of Working Processes in Construction Based on Spatial-Temporal Modeling // Magazine of Civil Engineering. 2017. № 08 (76). С.84-97. DOI: 10.18720/MCE.76.8
21. Барабаш М.С., Киевская Е.И. Принципы параметрического моделирования строительных объектов // Современное строительство и архитектура. 2016. № 1 (01) DOI: 10.18454/mca.2016.01.4
- REFERENCES**
1. Semenova D.M. Upravlenie proektami v ramkah koncepcii ustojchivogo razvitiya: vyzovy i problem. *Vestnik proektnogo upravlenija*. 2025; 1. S. 54-61. (In Russ.).
 2. Baghazadeh Shishehgarkhaneh M., Keivani A., Moehler R.C., et al. 2022. Internet of Things (IoT), Building Information Modeling (BIM), and Digital Twin (DT) in Construction Industry: A Review, Bibliometric, and Network Analysis. *Buildings*. 2022; 12 (10): 1503. DOI: 10.3390/buildings12101503. EDN: XQAACS
 3. Vozgoment N.V. Sovremennye vyzovy i perspektivnye razvitiya BIM modelirovaniya v Rossii v jeporu cifrovizacii. *E-Management*. 2020; 3(3): 20–27 p. (In Russ.). DOI 10.26425/2658-3445-2020-3-3-20-27
 4. Sarychev D.S. Informacionnoe modelirovaniye pri razrabotke proektnoj i rabochej dokumentacii. *SAPR i GIS avtomobil'nyh dorog*. 2015; 2(5): 20–24. (In Russ.). DOI: 10.17273/CADGIS.2015.2.3.
 5. Skvorcov A.V. Obshchaja sreda dannyh kak kljuchevoj jelement informacionnogo modelirovaniya avtomobil'nyh dorog. *SAPR i GIS avtomobil'nyh dorog*. 2015; 2(5): 37-41. (In Russ.). DOI: 10.17273/CADGIS.2015.2.6
 6. Pentury Ch., Karsaman R. H., Rahman H., Rosmansyah Yu. Application of digitalization and computerization technology in road construction. *Automation in Construction*. 2025; 171: 106018. DOI 10.1016/j.autcon.2025.106018. EDN PGMDTV
 7. Kulikov D.D., Jablochnikov E. I., Chukichev A.V., Abyshev O.A. Metodika formirovaniya parametricheskikh modelej detalej dlja avtomatizirovannogo proektirovaniya tehnologicheskikh processov. *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2023; 66 (2): 155–161 (In Russ.). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-155-161
 8. Bagovrin V.K., Guljaev Ju. V., Olejnikov A. Ja. Obespechenie interoperabel'nosti — osnovnaja tendencija v razvitiu otkrytyh system. *Informacionnye tehnologii i vychislitel'nye sistemy*. 2009; 5: 7-15. (In Russ.).
 9. Jablochnikov E.I. Organizacija edinogo informacionnogo prostranstva tehnicheskoy podgotovki proizvodstva s ispol'zovaniem PDM SmarTeam. *Informacionnye tehnologii v proektirovaniu i proizvodstve*. 2001; 3: 22–29. (In Russ.).
 10. Khodabandelu A., Park J. W. Agent-based modeling and simulation in construction. *Automation in Construction*. 2021; vol. 131: 103882. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103882
 11. Tripathi A., Dadi G.B., Nassereddine H., et al. Assessing Technology Implementation Success for Highway Construction and Asset Management. *Sensors*. 2023; 23 (7): 3671. DOI: 10.3390/s23073671. EDN: PYKIOE
 12. Puchkov M.V., Butenko A.A. Parametricheskoe modelirovaniye arhitekturno prostranstvennoj sredy goroda na osnove informacionnyh tehnologij. *Arhitekton: Izvestija vuzov*. 2015; 49. ISSN 1990-4126 (In Russ.). <https://archvuz.ru/files/N49pp73-82Puchkov&Butenko.pdf>
 13. Doukari O., Greenwood D. Automatic generation of building information models from digitized plans. *Automation in Construction*. 2020; 113: P. 103129. DOI 10.1016/j.autcon.2020.103129
 14. Lu Y., Gong P., Tang Y. [et al.] BIM-integrated construction safety risk assessment at the design stage of building projects. *Automation in Construction*. 2021; 124: P. 103553. DOI 10.1016/j.autcon.2021.103553.
 15. Ogunrinde O., Nnaji C., Amirkhanian A. Developing Automation Adoption Readiness Index for Quality Management Focused on Highway Construction. *Journal of Infrastructure Systems*. 2021; 27 (1). DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000595. EDN: SDZBFL
 16. Razyapov R.V. Application of AR technologies in the building industry. *AIP Conference Proceedings*. 2022; 2559. No 04001. <https://DOI.org/10.1063/5.0100069>.
 17. Perkinson C.L., Bayraktar M.E., Ahmad I. The use of computing technology in highway construction as a total jobsite management tool. *Automation in Construction*. 2010; 19 (7): 884–897. DOI: 10.1016/j.autcon.2010.06.002
 18. Chernjago A.B. Tehnologija realizacii intellektual'nogo poiska dannyh v proektnoj dokumentacii avtomobil'noj dorogi na etape stroitel'stva. *Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta*. 2022; 7(63): 86-91. (In Russ.). DOI 10.17084/20764359-2022-63-86. EDN SDFYMG
 19. Sinenko S.A. Primenenie sovremennoj informacionnyh tehnologij dlja formirovaniya tehnologicheskikh kart vypolnenija stroitel'nyh processov. *Evraziskij Sojuz Uchenyh (ESU)*. 2015; 5 (14): 149-151. (In Russ.).
 20. Bobrova T.V. Technical Normalization of Working Processes in Construction Based on Spatial-Temporal Modeling. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 08 (76): 84-97. DOI: 10.18720/MCE.76.8
 21. Barabash M.S., Kievskaja E.I. The principles of parametric modeling of construction projects. *Sovremennoe stroitel'stvo i arhitektura*. 2016; 1 (01): 16-22. (In Russ.). DOI: 10.18454/mca.2016.01.4

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Боброва Т.В. Анализ научной и нормативно-правовой литературы по изучаемой проблеме, формулирование цели и поставленных задач, разработка модели и алгоритмов реализации строительных технологий в компьютерной среде календарно-сетевого планирования; выполнение экспериментальных расчетов ЭТК с использованием информационного моделирования.

Уткин В.А. Подбор источников по исследуемой тематике, формирование общих подходов к проведению исследования, контроль корректности используемой терминологии и полученных результатов, выполнение и анализ экспериментальных расчетов.

COAUTHORS' CONTRIBUTIONS

Bobrova Tatyana V. *Analysis of scientific and regulatory literature on the problem under study, formulation of the goal and objectives, development of the model and algorithms for implementing construction technologies in a computerized calendar-network planning environment, experimental calculations of the electronic process charts with the use of information modeling.*

Utkin Vladimir A. *Selection of scientific literature sources on the research theme, development of the common approach to the study, verification of the used terminology correctness and the obtained results, execution and analysis of the experimental calculations.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Боброва Татьяна Викторовна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Проектное управление и информационное моделирование в строительстве» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 5).

ORCID: <http://orsid.org/0000-0002-0292-4421>,
SPIN-код: 8670-8576,
Author ID: 57201362187,
Researcher ID: Y-3916-2018,
Author ID: 505056,
e-mail: bobrova.tv@gmail.com

Уткин Владимир Александрович – д-р техн. наук, доц. кафедры «Мосты и транспортные тоннели» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 5).

ORCID: <http://orsid.org/0000-0002-2044-3242>,
SPIN-код: 4216-7640,
Researcher ID: AAS-8400-2022
Author ID: 119185,
e-mail: prof.utkin@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bobrova Tatyana V. – Doctor of Technical Sciences (Engineering), Professor, Project Management and Information Modeling in Construction Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <http://orsid.org/0000-0002-0292-4421>,
SPIN-code: 8670-8576,
Author ID: 57201362187,
Researcher ID: Y-3916-2018,
Author ID: 505056,
e-mail: bobrova.tv@gmail.com

Utkin Vladimir A. – Doctor of Engineering Sciences (Engineering), Associate Professor, Bridges and Transport Tunnels Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <http://orsid.org/0000-0002-2044-3242>,
SPIN-code: 4216-7640,
Researcher ID: AAS-8400-2022,
Author ID: 119185,
e-mail: prof.utkin@mail.ru

Научная статья

УДК 624.046.3

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-844-857>

EDN: VCASDS



Check for updates

УЧЁТ ЖЁСТКОСТИ ОПОРНЫХ УЗЛОВ В РАСЧЁТАХ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ СИММЕТРИЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ С КРУЧЕНИЕМ

М.А. Ступин¹ С.А. Макеев², А.А. Комлев²¹АО «Судостроительный завод им. Б.Е. Бутомы»,
г. Керчь, Россия²Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия ответственный автор
misha.stupin2014@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена вопросам механики тонкостенных стержней. В статье приводится решение уравнения В.З. Власова для изгиба с кручением тонкостенного стержня с двумя осями симметрии, учитывающее влияние жёсткости (податливости) опорных узлов.

Введение. Определяется текущее состояние вопроса расчётов тонкостенных стержней при поперечном изгибе с кручением.

Материалы и методы. Приводится решение системы дифференциальных уравнений устойчивости плоской формы изгиба В.З. Власова для тонкостенных стержней при поперечном изгибе с кручением с учётом влияния жёсткости (податливости) опорных узлов. Исходные уравнения В.З. Власова для изгиба с кручением тонкостенного стержня с двумя осями симметрии преобразуются в правую систему координат. Далее из двух дифференциальных уравнений В.З. Власова получается система из 12 уравнений для всех расчётных усилий и деформаций в тонкостенном стержне. Также получены граничные условия, учитывающие связь между усилиями и деформациями в опорном сечении. Далее в работе приведены результаты решения указанной системы уравнений методом Эйлера.

Результаты. Получено решение системы уравнений В.З. Власова для устойчивости тонкостенных стержней при поперечном изгибе с учётом жёсткости (податливости) опорных узлов методом Эйлера и общий вид функции угла поворота поперечного сечения. Решение получено для стержней с любыми опорными узлами, от чистого шарнира до абсолютно жёстких узлов. В разделе приведены результаты численной верификации и сделаны выводы о точности полученного решения. При верификации рассмотрен частный случай балок различного сечения с абсолютно жёсткими опорными узлами. Разница между численным решением в ПК «ЛИРА-САПР» и решением, предлагаемым в статье, находится в пределах 12%.

Обсуждение и заключение. Сделаны выводы о точности разработанной математической модели. Разница вызвана точностью определения моментов инерции сечения на чистое кручение и жёсткости опорных узлов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: общая устойчивость, механика тонкостенных стержней, математическое моделирование, общая устойчивость балок, расчёт балок, изгиб с кручением

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

Статья поступила в редакцию 23.08.2025; одобрена после рецензирования 08.10.2025; принята к публикации 21.10.2025.

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: Ступин М.А., Макеев С.А., Комлев А.А.. Учёт жёсткости опорных узлов в расчётах тонкостенных стержней симметричного сечения при поперечном изгибе с кручением // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 5. С. 844-857. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-844-857>

© Ступин М.А., Макеев С.А., Комлев А.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-844-857>

EDN: VCASDS

BEARING JOINT RIGIDITY IN DESIGNING THIN-WALLED BEAMS WITH TWO AXES OF SYMMETRY WHEN BENDING WITH TORSION

Mikhail A. Stupin¹ , Sergey A. Makeev², Andrey A. Komlev²

¹B.E.Butoma Shipbuilding Plant JSC,
Kerch, Russia

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

 corresponding author
misha.stupin2014@yandex.ru

ABSTRACT

The article is devoted to the mechanics of thin-walled beams. A solution to the Vlasov equation for bending with torsion of a thin-walled beam with two axes of symmetry is provided, the effect of bearing joint rigidity being taken into account.

Introduction. The current state of the issue of designing thin-walled beams subjected to transverse bending with torsion is described.

Materials and methods. The solution of the system of differential equations of stability of the plane bending form of V.Z. Vlasov for thin-walled beams under transverse bending with torsion is presented, the effect of bearing joint rigidity being taken into account. The original equations of V.Z. Vlasov for bending and torsion of a thin-walled beam with two axes of symmetry are transformed into a right-hand coordinate system. Next, from two differential equations of V.Z. Vlasov, a system of 12 equations is obtained for all calculated forces and deformations in a thin-walled beam. Boundary conditions were also obtained that take into account the relationship between forces and deformations in the support section. The results of solving the specified system of equations using the Euler method are presented.

Results. The solution of Vlasov system of equations for the stability of thin-walled beams under transverse bending is obtained, taking into account the rigidity (malleability) of the support nodes by the Euler method and the general form of the function of the angle of rotation of the cross section. The solution is obtained for beams with any support nodes, from a pure hinge to absolutely rigid nodes. The paper presents the results of numerical verification and draws conclusions on the accuracy of the obtained solution. During verification, a special case of beams of various cross-sections with absolutely rigid support units was considered. The difference between the numerical solution in the LIRA-CAD PC and the solution proposed in the article is within 12 per cent.

Discussion and conclusions. Conclusions have been drawn on the accuracy of the developed mathematical model. The difference is caused by the accuracy in determining the moments of inertia of the section for pure torsion and the stiffness of the support units.

KEYWORDS: general stability, thin-walled beam mechanics, mathematical modeling, general stability of beams, beam calculation, bending with torsion

The article was submitted: August 23, 2025; **approved after reviewing:** October 08, 2025; **accepted for publication:** October 21, 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. Stupin M.A., Makeev S.A., Komlev A.A. Bearing joint rigidity in designing thin-walled beams with two axes of symmetry when bending with torsion. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (5): 844-857. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-5-844-857>

© Stupin Mikhail A., Makeev Sergey A., Komlev Andrey A., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы общей устойчивости балок при изгибе в плоскости максимальной жёсткости впервые рассмотрены А.Г. Мичеллом в 1899 г.¹ При этом Мичелл рассматривал балки, длина которых намного больше высоты сечения, и влиянием жёсткости полок из плоскости изгиба на общую устойчивость можно пренебречь.

Л. Прандтль в работе² также рассматривал отличные от большинства применяемых в строительстве профилей, а именно – тонкие пластиинки.

Однако большинство тонкостенных балок, используемых в реальных конструкциях, имеют такие размеры, при которых длину нельзя считать бесконечно большой, а влиянием полок невозможно пренебречь.

Впервые вопросы общей устойчивости тонкостенных стержней, и в частности двутавровых балок, рассмотрены С.П. Тимошенко³. В работе С.П. Тимошенко «Об устойчивости плоской формы изгиба двутавровой балки под влиянием сил, действующих в плоскости её наибольшей жёсткости»². С.П. Тимошенко получены выражения, позволяющие определить критическую силу для частных случаев (консольная балка, случай чистого изгиба, равномерно распределённая нагрузка).

В работе⁵ В.З. Власов обобщает представления С.П. Тимошенко на все тонкостенные стержни. В.З. Власовым получена система уравнений для равновесия тонкостенного стержня с несимметричным сечением при одновременном сжатии и изгибе в двух плоскостях внешней нагрузкой [с. 369 в работе⁵], а также система уравнений для изгиба с кручением тонкостенного стержня с двумя осями симметрии.

Работы [1, 2] посвящены исследованию механики холодногнутых тонкостенных стержней. В статье [3] рассматривается конечно-элементный расчёт тонкостенных стержней в рамках полусдвиговой теории В.И. Сливкера. Статьи [4]-[5] посвящены расчёту НДС тонкостенных стержней методом асимптотического расщепления. В работе [6] рассматривается

расчёт изгиба и стеснённого кручения тонкостенных стержней произвольного сечения.

В работе [7] исследуются вопросы расчёта композиционных тонкостенных стержней. В статье [8] изучаются вопросы расчёта тонкостенных стержней с учётом сдвига, в [9] – методы расчёта перфорированных тонкостенных стержней. Статья [10] посвящена вопросам моделирования разрушения тонкостенных элементов при изгибе в упругопластической постановке.

В статье [11] авторами представлена уточнённая стержневая модель расчёта балок на общую устойчивость. Работа [12] посвящена исследованию стесненного изгиба с кручением тонкостенных стержней при неравномерно распределённой нагрузке. В статье [13] рассматриваются вопросы прочности композиционных тонкостенных балок. В статье [14] авторы проводят сравнение стержневой и оболочечной моделей расчёта тонкостенных балок. В работе [15] рассматриваются вопросы параметрической оптимизации конструкций из тонкостенных стержней.

В статье [16] авторами описывается эксперимент, посвященный образованию трещин в композиционных тонкостенных стержнях. Статья [17] посвящена вопросам расчёта НДС тонкостенных стержней, выполненных из анизотропных материалов.

Статья [18] посвящена уточнению методик расчёта напряжений при стеснённом изгибе с кручением балок швеллерного сечения, статья [19] – вопросам численного моделирования стержней из композиционных материалов.

В работе [20] исследуется упругость и прочность тонкостенных стержней, изготовленных с применением аддитивных технологий.

В качестве обобщения приведенных материалов сделан вывод о том, что вопросы влияния жёсткости опорных узлов на общую устойчивость тонкостенных стержней остаются не вполне изученными в современной строительной механике.

Существующие российские нормы предписывают проверять общую устойчивость балок по методикам, основанным на теории тонко-

¹ Michell A.G. Elastic stability of elastic beams under transverse forces // Philosophic magazine and journal of science, London-Edinburg-Dublin, Series 5. 1899; 48 (292): 298-309.

² Prandtl L. Kipperscheinungen. Ein Fall von instabilen elastischen Gleichgewicht. Dissertation der Universität München / L. Prandtl. Nürnberg. 1900. 75

³ Тимошенко С.П. Устойчивость упругих систем. Л., М.: Гостехиздат, 1946. 532 с.

⁴ Тимошенко С.П. Устойчивость стержней пластин и оболочек. М.: Наука, 1971. 810 с.

⁵ Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. М.: Физматгиз, 1959. 586 с.

стенных стержней В.З. Власова и С.П. Тимошенко. При этом методика, приведённая в СП 16.13330.2017⁶, представляет собой проверку напряжений в балке при действующих нагрузках с учётом влияния начальных несовершенств (начальной погиби и эксцентричности приложения нагрузки) и геометрической нелинейности⁷ (п. 7.2.3 СП 294.1325800.2017 с изм. № 1, 2, 3).

Так как система уравнений В.З. Власова для изгиба с кручением тонкостенного стержня не имеет общего аналитического решения, действующие нормы содержат ограниченное число вариантов схем закрепления и загружений балок. Так, в приложении Ж к СП 16.13330.2017 с Изм. 1, 2, 3, 4 содержится 9 вариантов загружения для двутавровой балки симметричного сечения с консольным и шарнирным опиранием.

Однако в существующих нормах не рассматриваются балки с жёсткими опорными узлами, а также не учитывается жёсткость опорных узлов как таковых.

В данной работе рассматривается решение системы уравнений устойчивости плоской формы изгиба В.З. Власова тонкостенного стержня, учитывающее угловую жёсткость опорных узлов. Полученная система уравнений позволяет определять НДС стержней с возможностью варьирования угловых жесткостей опорных узлов от нуля (шаровой/цилиндрический шарнир) до бесконечности (жесткое закрепление). Также в работе приведены результаты расчёта для частного случая (абсолютно жёстких опорных узлов) и сопоставление полученных результатов с расчётом в ПК «ЛИРА-САПР».

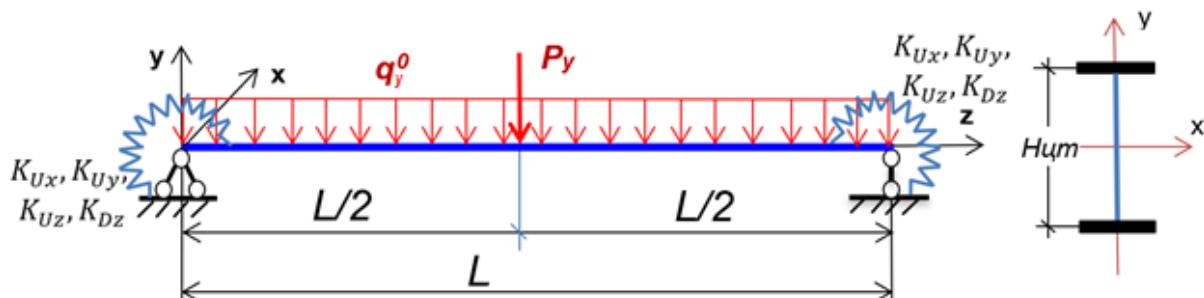
В статье задача общей устойчивости тонкостенного стержня рассматривается как задача расчёта на изгиб с кручением с учётом геометрической нелинейности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В статье задача общей устойчивости тонкостенного стержня рассматривается как задача расчёта на изгиб с кручением с учётом геометрической нелинейности.

Рассмотрим однопролётную балку с опорными узлами, имеющими компоненты угловой жёсткости K_{Ux} , K_{Uy} , K_{Uz} и сопротивление деформации K_{Bz} (рисунок 1). На рисунке 1 опорные узлы показаны условно и включают в себя четыре компоненты жёсткости. Неподвижные оси обозначены как X , Y , Z . При этом ось, проходящую через центры масс сечений стержня, обозначена как z , а главные оси сечений как и x и y . Моменты инерции сечения обозначены как I_x , I_y , I_z , I_{ω} , модуль упругости материала как E , а модуль сдвига как G .

В недеформированном состоянии (рис. 2(а)) оси x , y и z параллельны неподвижным осям X , Y , Z , а в деформированном (рис. 2(б)) между парами осей $X-x$, $Y-y$, $Z-z$ образуются углы UX , UY , UZ . При этом сечения поворачиваются вокруг местных осей x , y , z на угол U_x , U_y , U_z . Перемещения центра тяжести сечения стержня обозначим как Δx , Δy .



$$M_x(0) = K_{Ux}U_x(0), M_y(0) = K_{Uy}U_y(0), \\ H_z(0) = K_{Uz}U_z(0), B_z(0) = K_{Dz}D_z(0)$$

Рисунок 1 – Расчётная схема балки в правой системе координат
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Graphical representation of a beam in the right-hand coordinate system
Source: compiled by the authors.

⁶ СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*» (с Поправкой, с изменением № 1,2,3,4).

⁷ СП 294.1325800.2017 с изм. № 1,2,3 «Конструкции стальные. Правила проектирования».

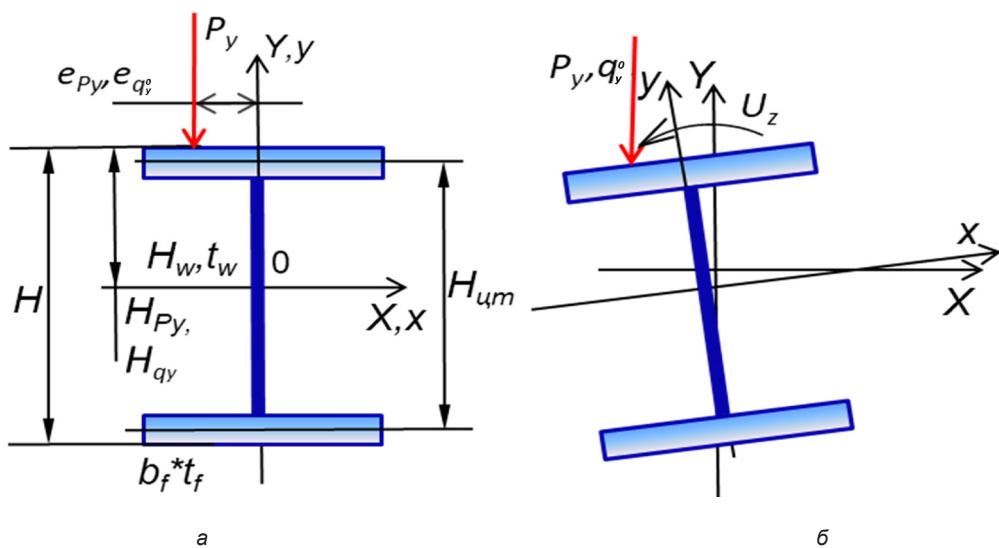


Рисунок 2 – Поперечное сечение тонкостенного стержня в середине пролёта:
а – недеформированное состояние; б – деформированное состояние
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Thin-walled beam cross-section in the middle part of the span
a – unstrained state; b – under deformation
Source: compiled by the authors.

Обозначим как K_{Ux} , K_{Uy} , K_{Uz} угловые жесткости опорных узлов (изгибающие и крутящий моменты, которые нужно приложить для поворота опорных сечений на единичный угол). Обозначим как K_{Dz} бимомент, который возникает в опорном сечении при единичной депланации.

Обозначим как P_y , q_y^0 сосредоточенную и равномерно распределённую поперечную нагрузки вдоль оси Y , e_{Py} , e_{qy} – эксцентрикитеты приложения соответствующей нагрузки, H_{Py} , $H_{qy} = \pm H/2$ – высота приложения соответствующей нагрузки. При этом за положительное направление нагрузки q_y^0 , P_y принято $-Y$.

Для балок, нагруженных только поперечной нагрузкой в плоскости максимальной жёсткости, математическая модель устойчивости плоской формы изгиба В.З. Власова в левой системе координат имеет следующий вид [с. 375 в работе⁵], система уравнений (3.3)):

$$\left\{ \begin{array}{l} EI_y \Delta X^{IV} + (M_x U_z(z))'' = 0, \\ EI_w U_z(z)^{IV} - GI_t U_z(z)'' + q_y^0 H_{qy} U_z(z) + e_{qy} q_y^0 + M_x \Delta X'' = 0. \end{array} \right. \quad (1)$$

$$(2)$$

Чтобы перевести систему уравнений (1)-(2) для записи в правой системе координат, необходимо произвести следующие преобразования:

$$\begin{aligned} \Delta X^{IV}_{\text{прав.}} &= \Delta X^{IV}_{\text{лев.}}, \\ \Delta X''_{\text{прав.}} &= \Delta X''_{\text{лев.}}, \\ M_x_{\text{прав.}} &= -M_x_{\text{лев.}}, \\ U_z(z)_{\text{прав.}} &= -U_z(z)_{\text{лев.}}, \\ U_z(z)^{IV}_{\text{прав.}} &= U_z(z)^{IV}_{\text{лев.}}, \\ U_z(z)''_{\text{прав.}} &= U_z(z)''_{\text{лев.}}. \end{aligned}$$

Тогда система уравнений (1)-(2) примет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} EI_y \Delta X^{IV} + (M_x U_z(z))'' = 0, \\ EI_w U_z(z)^{IV} - GI_t U_z(z)'' - q_y^0 H_{qy} U_z(z) - e_{qy} q_y^0 + M_x \Delta X'' = 0. \end{array} \right. \quad (3)$$

$$(4)$$

Проинтегрировав дважды уравнение (3), получим следующее выражение:

$$EI_y \Delta X(z)'' = -M_x(z) \cdot U_z(z) - C_1 z - C_2, \quad (5)$$

$$M_y(z) = M_x(z) \cdot U_z(z) + C_1 z + C_2. \quad (6)$$

Для определения констант интегрирования C_1 и C_2 необходимо 2 граничных условия. Первым условием запишем для изгибающего момента в опорном узле:

$$M_y(0) = M_x(0) \cdot U_z(0) + C_2, \quad (7)$$

$$C_2 = M_y(0) - M_x(0) \cdot U_z(0). \quad (8)$$

Для определения параметра C_1 необходимо задать условие для поперечной силы Q_x . Поперечная сила Q_x определяется как

$$Q_x = M_y(z)' = Q_y(z) \cdot U_z(z) + M_x(z) \cdot U_z(z)' + C_1. \quad (9)$$

В принятой расчётной схеме на балку в середине пролёта воздействует сила $P_y \sin\left(U_z\left(\frac{L}{2}\right)\right) = P_y U_z\left(\frac{L}{2}\right)$. Так как усилия в левой и правой частях балки распределяются одинаково относительно середины пролёта, поперечные силы $Q_x\left(\frac{L}{2} - dz\right)$ и $Q_x\left(\frac{L}{2} + dz\right)$ отличаются только знаком. Поэтому усилие $Q_x\left(\frac{L}{2} - dz\right)$ определится как

$$Q_x\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{P_y}{2} U_z\left(\frac{L}{2}\right), \quad (10)$$

$$\frac{P_y}{2} U_z\left(\frac{L}{2}\right) = Q_y\left(\frac{L}{2}\right) \cdot U_z\left(\frac{L}{2}\right) + M_x\left(\frac{L}{2}\right) \cdot U_z\left(\frac{L}{2}\right)' + C_1. \quad (11)$$

Отметим, что так как в середине пролёта достигается максимальный угол поворота U_z , производная $U_z\left(\frac{L}{2}\right)'$ равна 0.

$$\frac{P_y}{2} U_z\left(\frac{L}{2}\right) = Q_y\left(\frac{L}{2}\right) \cdot U_z\left(\frac{L}{2}\right) + C_1. \quad (12)$$

В используемой расчётной схеме усилие $Q_y\left(\frac{L}{2}\right)$ определится как

$$Q_y\left(\frac{L}{2}\right) = Q_y(0) + q_y \frac{L}{2} = -\frac{P_y}{2} - q_y \frac{L}{2} + q_y \frac{L}{2} = -\frac{P_y}{2}. \quad (13)$$

Подставим (12) в (13) и получим

$$\frac{P_y}{2} U_z\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{P_y}{2} \cdot U_z\left(\frac{L}{2}\right) + C_1. \\ C_1 = 0. \quad (14)$$

В итоге уравнение (3) примет вид

$$M_y(z) = M_x(z) \cdot U_z(z) + (M_y(0) - M_x(0) U_z(0)). \quad (15)$$

Поперечная сила $Q_x(z)$ выразится как

$$Q_x(z) = M_y(z)' = Q_y(z) \cdot U_z(z) + M_x(z) \cdot U_z(z)'. \quad (16)$$

Далее в уравнении (4) заменим $\Delta X(z)''$ на $-\frac{M_y(z)}{EI_y}$:

$$EI_w U_z(z)^{IV} - GI_t U_z(z)'' - q_y^0 H_{q_y^0} U_z(z) - e_{q_y^0} q_y^0 - \frac{M_x M_y(z)}{EI_y} = 0. \quad (17)$$

Система уравнений (3)-(4) принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_y(z) = M_x(z) \cdot U_z(z) + (M_y(0) - M_x(0)U_z(0)), \\ EI_w U_z(z)^{IV} - GI_t U_z(z)'' - q_y^0 H_{q_y^0} U_z(z) - e_{q_y^0} q_y^0 - \frac{M_x M_y(z)}{EI_y} = 0. \end{array} \right. \quad (18)$$

$$(19)$$

Подставив в уравнение (15) в уравнение (17), можно получить однородное дифференциальное уравнение 4-го порядка относительно угла закручивания:

$$\begin{aligned} [EI_\omega] U_z(z)^{IV} - [GI_t] U_z(z)'' - \frac{M_x(z)^2}{EI_y} U_z(z) - \frac{M_x(z)}{EI_y} (M_y(0) - M_x(0)U_z(0)) - \\ - q_y^0 H_{q_y^0} U_z(z) - e_{q_y^0} q_y^0 = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Обозначим производную угла поворота $U_z(z)'$ как $D_z(z)$, внутренний бимомент $-EI_\omega U_z(z)''$ как $B_z(z)$, внутренний крутящий момент как $H_z(z)$.

В соответствии с принятыми обозначениями выразим из уравнения (20) $H_z(z)'$:

$$H_z(z) = GI_t \cdot U_z(z)' - EI_\omega U_z(z)''', \quad (21)$$

$$H_z(z)' = GI_t \cdot U_z(z)'' - EI_\omega U_z(z)^{IV}, \quad (22)$$

$$\begin{aligned} -EI_\omega U_z(z)^{IV} = -[GI_t] U_z(z)'' + \frac{M_x(z)^2}{EI_y} U_z(z) + \frac{M_x(z)}{EI_y} (M_y(0) - M_x(0)U_z(0)) - \\ - q_y^0 H_{q_y^0} U_z(z) - e_{q_y^0} q_y^0, \end{aligned} \quad (23)$$

$$H_z(z)' = -\left(\frac{M_x(z)^2}{EI_y} + q_y^0 H_{q_y^0}\right) U_z(z) - \frac{M_x(z)}{EI_y} (M_y(0) - M_x(0)U_z(0)) + e_{q_y^0} q_y^0. \quad (24)$$

Далее запишем выражения для определения $D_z(z)$, $B_z(z)$, $H_z(z)$:

$$dH_z(z) = H_z(z)' dz, \quad (25)$$

$$dB_z(z) = (H_z(z) - GI_t U_z(z)') dz, \quad (26)$$

$$dD_z(z) = \frac{-B_z(z)}{EI_\omega} dz, \quad (27)$$

$$dU_z(z) = D_z(z) dz. \quad (28)$$

Далее запишем выражения для прогиба стержня по оси Y:

$$\frac{Y'''}{EI_x} = Q_y(z) = Q_y(0) + q_y z = -\frac{(q_y L + P_y)}{2} + q_y z, \quad (29)$$

$$\frac{Y''}{EI_x} = M_x(z) = M_x(0) - \frac{(q_y L + P_y)}{2} z + \frac{q_y z^2}{2}, \quad (30)$$

$$-Y' = U_x(z) = U_x(0) + \frac{M_x(0)}{EI_x}z - \frac{(q_yL + P_y)}{4EI_x}z^2 + \frac{q_yz^3}{6EI_x}, \quad (31)$$

$$Y = -U_x(0)z + \frac{M_x(0)z^2}{2EI_x} - \frac{(q_yL + P_y)}{12EI_x}z^3 + \frac{q_yz^4}{24EI_x}. \quad (32)$$

Тогда полная система уравнений для изгиба с кручением тонкостенного стержня (далее – система I) запишется как:

$$\frac{Y'''}{EI_x} = Q_y(z) = Q_y(0) + q_yz = -\frac{(q_yL + P_y)}{2} + q_yz, \quad (27)$$

$$\frac{Y''}{EI_x} = M_x(z) = M_x(0) - \frac{(q_yL + P_y)}{2}z + \frac{q_yz^2}{2}, \quad (28)$$

$$-Y' = U_x(0) + \frac{M_x(0)}{EI_x}z - \frac{(q_yL + P_y)}{4EI_x}z^2 + \frac{q_yz^3}{6EI_x}, \quad (29)$$

$$Y = -U_x(0)z + \frac{M_x(0)z^2}{2EI_x} - \frac{(q_yL + P_y)}{12EI_x}z^3 + \frac{q_yz^4}{24EI_x}, \quad (30)$$

$$q_x(z) = q_y(z) \cdot U_z(z) + 2Q_y(z) \cdot U_z(z)', \quad (31)$$

$$Q_x(z) = Q_y(z) \cdot U_z(z) + M_x(z) \cdot U_z(z)', \quad (16)$$

$$M_y(z) = M_x(z) \cdot U_z(z) + (M_y(0) - M_x(0)U_z(0)), \quad (15)$$

$$dU_y(z) = \frac{M_y(z)}{EI_y}dz, \quad (32)$$

$$dX = -U_y(z)dz, \quad (33)$$

$$H_z(z)' = -\left(\frac{M_x(z)^2}{EI_y} + q_y^0 H_{q_y^0}\right)U_z(z) - \frac{M_x(z)}{EI_y}(M_y(0) - M_x(0)U_z(0)) + e_{q_y^0}q_y^0, \quad (22)$$

$$dH_z(z) = H_z(z)'dz, \quad (23)$$

$$dB_z(z) = (H_z(z) - GI_t U_z(z)')dz, \quad (24)$$

$$dD_z(z) = -\frac{B_z(z)}{EI_\omega}dz, \quad (25)$$

$$dU_z(z) = D_z(z)dz. \quad (26)$$

Для решения системы I необходимо определить следующие начальные параметры:

$$M_x(0), U_x(0), M_y(0), U_y(0), D_z(0), B_z(0), H_z(0), U_z(0).$$

Опорные узлы рассматриваемой балки имеют 4 вращательных степени свободы: $U_x(0), U_y(0), U_z(0), D_z(0)$. Связь между усилиями и деформациями в опорном узле выразится следующим образом:

$$M_x(0) = K_{Ux}U_x(0), \quad (27)$$

$$M_y(0) = K_{Uy}U_y(0), \quad (28)$$

$$U_z(0) = \frac{H_z(0)}{K_{Uz}}, \quad (29)$$

$$B_z(0) = K_{Dz}D_z(0). \quad (30)$$

С учётом уравнений (27) - (30) для решения системы необходимо определить четыре независимых начальных параметра:

$$U_x(0), U_y(0), D_z(0), H_z(0).$$

Для однозначного определения начальных параметров необходимо 4 условия. Для 1 формы потери устойчивости по условиям симметрии запишем следующие условия:

$$\Delta X(L) = 0, \quad (32)$$

$$U_z(L) = U_z(0) = \frac{H_z(0)}{K_{Uz}}, \quad (33)$$

$$D_z(L) = -D_z(0). \quad (34)$$

Начальный угол $U_x(0)$ можно однозначно определить из условия (32):

$$\begin{aligned} U_x(0) &= - \int_0^{\frac{L}{2}} M_x(z) dz = - \int_0^{\frac{L}{2}} \left(M_x(0) - \frac{(q_y L + P_y)}{2} z + \frac{q_y z^2}{2} \right) dz = \\ &= - \frac{K_{Ux} U_x(0) L}{2} + \frac{(q_y L + P_y)}{16} L^2 - \frac{q_y L^3}{48} \\ U_x(0) &= - \frac{K_{Ux} U_x(0) L}{2} + \frac{(q_y L + P_y)}{16} L^2 - \frac{q_y L^3}{48}, \\ U_x(0) \left(1 + \frac{K_{Ux} L}{2} \right) &= \frac{(q_y L + P_y)}{16} L^2 - \frac{q_y L^3}{48}, \\ U_x(0) &= \frac{L^2}{48} (2q_y L + P_y) / \left(1 + \frac{K_{Ux} L}{2} \right). \end{aligned} \quad (35)$$

Таким образом, граничные условия $U_x(0)$, $U_y(0)$, $D_z(0)$, $H_z(0)$ определяются из условий (32), (33), (34), (35).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Решение системы I проводилось методом Эйлера в табличном процессоре MS Excel. В ходе расчёта была определена критическая сила потери устойчивости для серии прокатных балок, представленных в таблице. Расчёты проводились для балок пролётом 6,0 м с жёсткими опорными узлами. Также были проведены проверочные расчёты в ПК «ЛИРА-САПР». В расчёте определялась критическая сила для балок, нагруженных без эксцентричности и начальных несовершенств (критическая сила по Эйлеру), т.е. такая сила, при которой возможен резкий переход балки из плоской формы изгиба в состояние изгиба с кручением.

На рисунках 3, 4, 5, 6 показаны графики усилий и деформаций при изгибе с кручением для балки 10Б1 (строка 1 таблицы). Результаты приведены для усилия $P_y = 0,55$ т приложенного с эксцентричностью $e_{Py} = 5$ мм. Значения приведены для усилия меньшего, чем $P_{kp} = 0,64$ т, т.к. при $e_{Py} > 0$ и $P_y = P_{kp}$ перемещения и усилия стремятся к бесконечности.

Таблица
Результаты расчёта
Источник: составлено авторами.

Table
Calculation results
Source: compiled by the authors.

№	Сечение	P_{kp} ЛИРА, т	P_{kp} расчёт, т	Погрешность расчёта ϵ , %
1	10Б1	0,63	0,64	-2,08
2	20Б2	5,25	5,72	-9,03
3	30Б2	13,77	14,56	-5,77
4	40Б2	57,68	59,97	-3,98
5	50Б2	68,98	76,90	-11,48

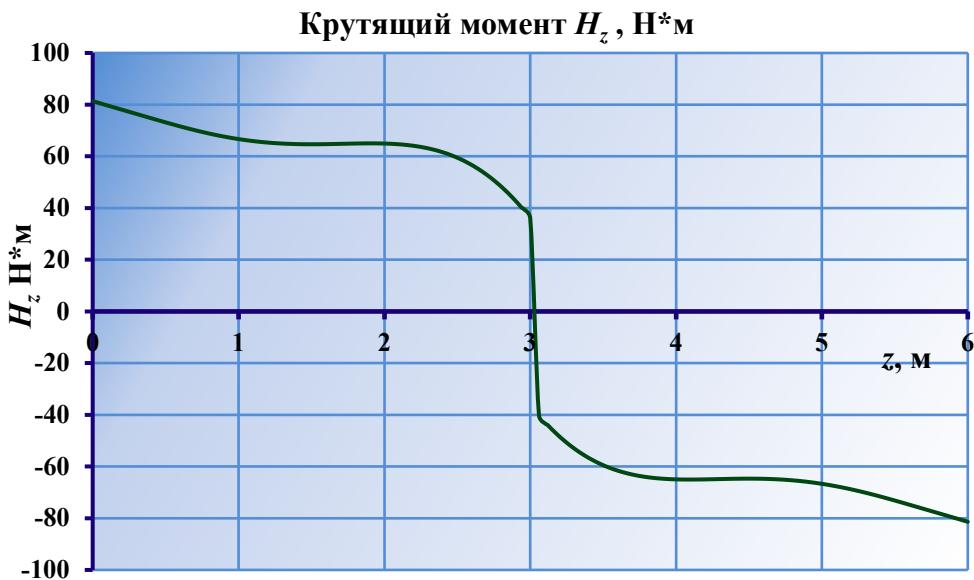


Рисунок 3 – График функции внутреннего крутящего момента в сечении
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Internal torque function for section
Source: compiled by the authors.

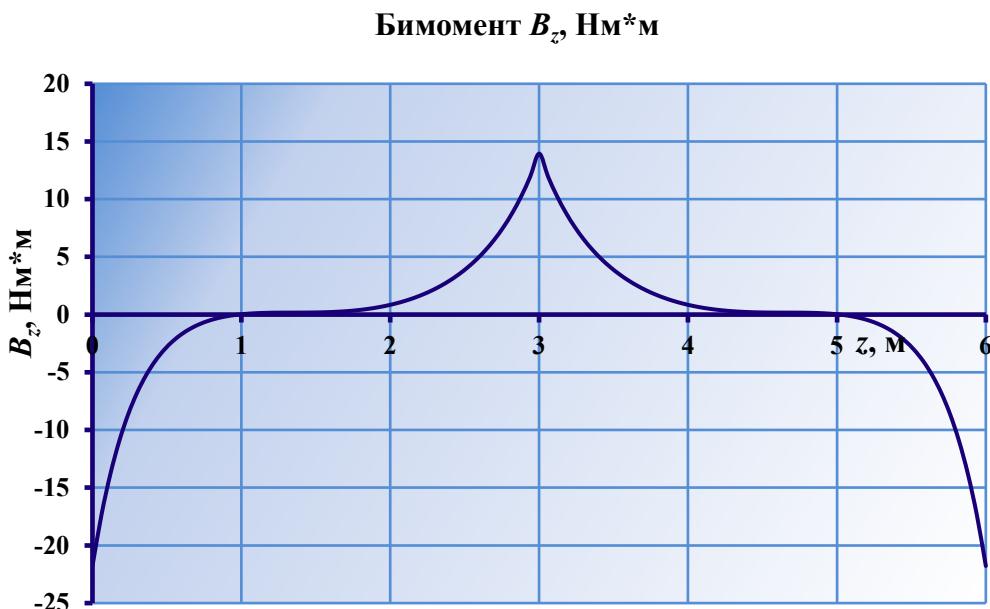


Рисунок 4 – График функции бимомента в сечении
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Graphical representation of bimoment function
Source: compiled by the authors.

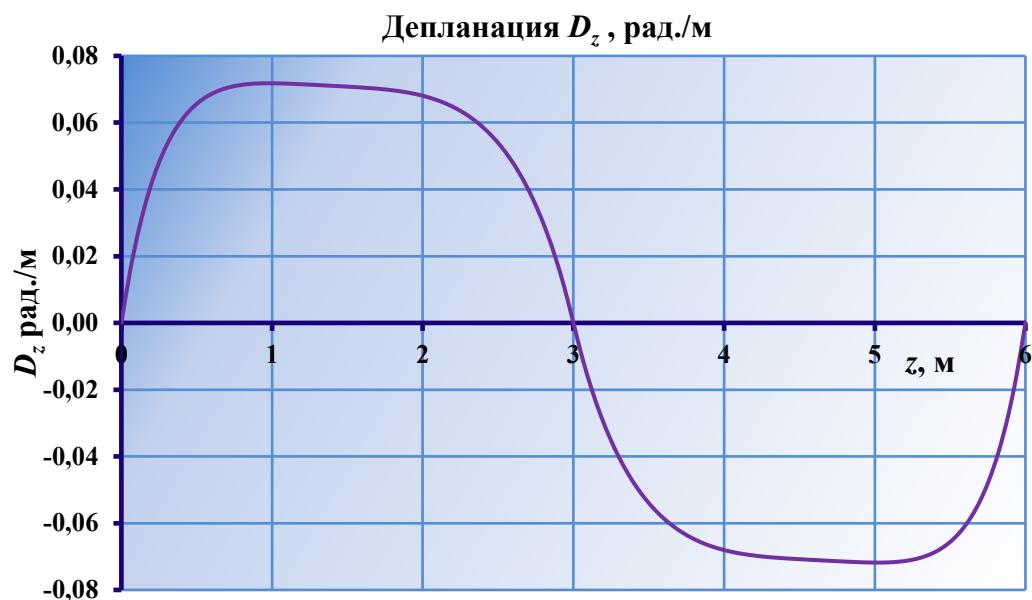


Рисунок 5 – График функции депланации сечения
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Function of cross-section distortion
Source: compiled by the authors.

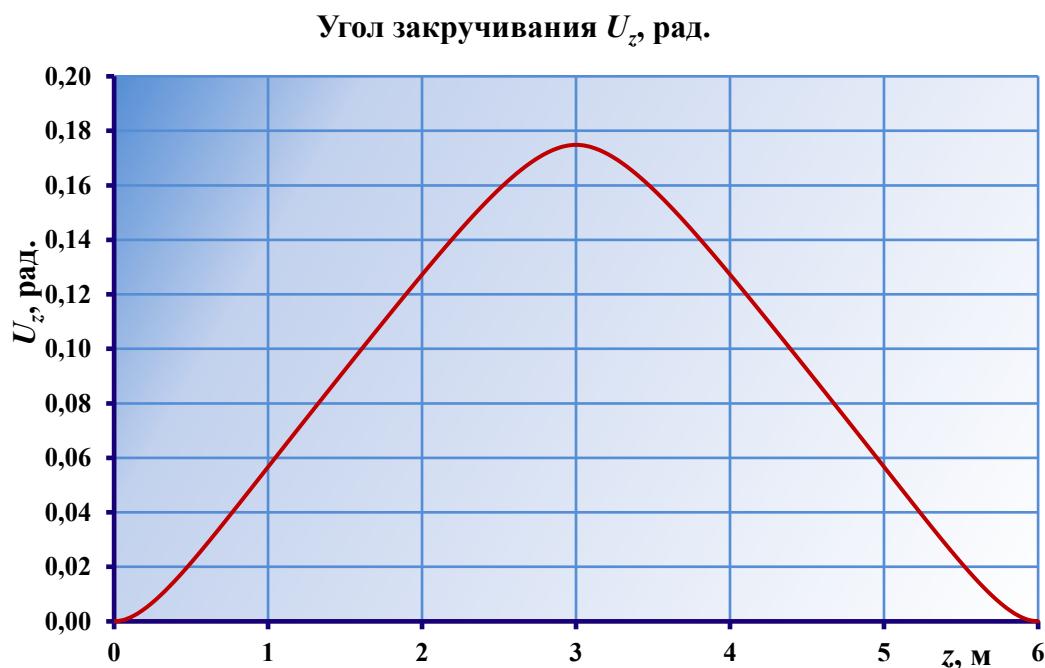


Рисунок 6 – График функции угла закручивания сечения
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Function of section angular twist
Source: compiled by the authors.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведено решение системы дифференциальных уравнений устойчивости плоской формы изгиба В.З. Власова для тонкостенных стержней, учитывающее угловые жесткости опорных узлов с возможностью варьирования жесткостей опор от нуля (шаровой/цилиндрический шарнир) до бесконечности (жесткое закрепление).

Получено дифференциальное уравнение четвёртого порядка для угла поворота попечного сечения тонкостенного стержня при изгибе с кручением, учитывающее жесткость опорных узлов.

Также получена система уравнений, описывающая деформации тонкостенного стержня при изгибе с кручением.

Полученная система уравнений решена для частного случая (жесткие опоры) численно методом Эйлера в табличном процессоре MS Excel для представленной серии прокатных балок с вычислением критической силы в середине пролета – погрешность вычислений в Excel в сравнении с решениями в ЛИРА-СА-ПР находятся в пределах точности и инженерных расчетов.

Дальнейшие задачи исследования:

- решение полученной системы уравнений более точными методами;
- экспериментальная проверка адекватности полученной математической модели с разработкой и изготовлением испытательного стенда, образцов балок с подготовкой программы проведения работ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Йордановска Д., Смирнов О.М. Расчет коэффициентов потери общей устойчивости стальных холодногнутых профилей методом конечных элементов // Инженерный вестник Дона. 2023. № 10 (106). С. 32.
2. Серпик И.Н., Школьренко Р.О. Расчет систем тонкостенных стержней корытообразного профиля с учетом стесненного кручения // Строительство и реконструкция. 2018. № 4. С. 31-41.
3. Лалин В.В., Кудинов В.В. Реализация метода конечных элементов в задачах устойчивости тонкостенных стержней для полусдвиговой теории ВИ Сливкера // Синергия Наук. 2017. № 1. С. 858-877.
4. Горынин А.Г., Горынин Г.Л., Голушко С.К. Исследование стесненного кручения тонкостенных стержней открытого профиля методом асимптотического расщепления // Прикладная механика и техническая физика. 2024. № 65(3). С. 123-141.
5. Горынин Г. Л., Голушко С. К., Горынин А. Г. Метод асимптотического расщепления в задачах расчета тонкостенных стержней произвольной формы // Сборник тезисов XXVIII Всероссийской конференции по численным методам решения задач теории упругости и пластичности. 2023.
6. Присекин В. Л., Растиргуев Г.И. Изгиб и стесненное кручение тонкостенных стержней // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2019. № 5. С. 45-58. DOI: 10.1134/S0572329919050155
7. Zhang W. et al. Experimental study of a composite beam externally bonded with a carbon fiber-reinforced plastic plate // Journal of Building Engineering. 2023. 71: 106522. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106522>
8. Rees D.W.A., Alsheikh A.M.S. Theory of Flexural Shear, Bending and Torsion for a Thin-Walled Beam of Open Section // World Journal of Mechanics. 2024. № 14 (3). С. 23-53. DOI: 10.4236/wjm.2024.143003
9. Duan L., Zhao J., Zou J. Generalized beam theory-based advanced beam finite elements for linear buckling analyses of perforated thin-walled members // Computers & Structures. 2022. 259: 106683. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2021.106683>
10. Zhang X., Fu X. New theoretical models for the bending moment of thin-walled beams under three-point bending // Applied Mathematical Modelling. 2023. 121: 21-42. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2023.04.015>
11. Vieira R.F., F.B.E. Virtuoso, E.B.R. Pereira. Buckling of thin-walled structures through a higher order beam model // Computers & Structures. 2017. 180: 104-116. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2016.01.005>
12. Galishnikova Vera, Tesfaldet Gebre. The behaviour of thin-walled beam with restrained torsion // Magazine of Civil Engineering. 2022. 110(2): 11009. DOI:10.34910/MCE.110.9
13. Yao Yu-hang, et al. Bending performance of cold-formed thin-wall steel-glulam composite beams using finite element analysis. 2022. 111-116. DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2022.04.017
14. Ajdukiewicz Cezary, Marcin Gajewski. Verification of the thin-walled beam theory with application of FEM and shell modeling // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 661(1). DOI 10.1088/1757-899X/661/1/012005
15. Kibkalo Anton, Lebedeva Maria, Volkov Mikhail. Methods of parametric optimization of thin-walled structures and parameters which influence on it // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. 2016. Vol. 53. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20165301051>
16. Pacheco-Chérrez Josué, Diego Cárdenas and Oliver Probst. Experimental detection and measurement of crack-type damage features in composite thin-wall beams using modal analysis // Sensors. 2021. 21.23: 8102. <https://doi.org/10.3390/s21238102>
17. Nguyen Tan-Tien, Pham Toan Thang and Jaehong Lee. Flexural-torsional stability of thin-walled functionally graded open-section beams // Thin-Walled Structures. 2017.110: 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.09.021>

18. Rees David WA. A Stress Analysis of a Thin-Walled, Open-Section, Beam Structure: The Combined Flexural Shear, Bending and Torsion of a Cantilever Channel Beam // *Applied Sciences*. 2025; 15 (15): 8470. <https://doi.org/10.3390/app15158470>
19. Zeng Lingqi. Static finite element analysis of three-closed box thin-wall beam based on Pseudo-elastic SMA hybrid composite material ANSYS // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; Vol. 1802(2). DOI 10.1088/1742-6596/1802/2/022095
20. Wu Yan and Li Yang. Elastic and failure characteristics of additive manufactured thin wall lattice structures with defects // *Thin-Walled Structures*. 2021; 161: 107493. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107493>

REFERENCES

1. Yordanovska D., Smirnov O.M. Calculation of the coefficients of loss of general stability of cold-bent steel profiles by the finite element method. *Engineering Bulletin of the Don*. 2023; 10 (106): 32.
2. Serpik I. N., Shkolyarenko R.O. Calculation of systems of thin-walled rods of a trough-shaped profile, taking into account constrained torsion. *Construction and Reconstruction*. 2018; (4): 31-41.
3. Lalin V.V., Kudinov V.V. Implementation of the finite element method in problems of stability of thin-walled rods for the semi-displacement theory of V. Slicker. *Synergy of Sciences*. 2017; (11): 858-877.
4. Gorynin A.G., Gorynin G.L., Golushko S.K. Study of Constrained Torsion of Thin-Walled Rods of Open Profile by the Asymptotic Splitting Method. *Applied Mechanics and Technical Physics*. 2024; 65(3): 123-141.
5. Gorynin G.L., Golushko S.K., Gorynin A.G. Asymptotic splitting method in problems of calculating thin-walled rods of arbitrary shape. *Collection of abstracts of the XXVIII All-Russian Conference on Numerical Methods for Solving Problems of Elasticity and Plasticity Theory*. 2023.
6. Prisekin V.L., Rastorguev G.I. Bending and constrained torsion of thin-walled rods. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Solid State Mechanics*. 2019; (5): 45-58. DOI: 10.1134/S0572329919050155
7. Zhang W. et al. Experimental study of a composite beam externally bonded with a carbon fiber-reinforced plastic plate. *Journal of Building Engineering*. 2023; 71: 106522. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106522>
8. Rees D.W. A., Alsheikh A.M.S. Theory of Flexural Shear, Bending and Torsion for a Thin-Walled Beam of Open Section. *World Journal of Mechanics*. 2024; 14(3): 23-53. DOI: 10.4236/wjm.2024.143003
9. Duan L., Zhao J., Zou J. Generalized beam theory-based advanced beam finite elements for linear buckling analyses of perforated thin-walled members. *Computers & Structures*. 2022; 259: 106683. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2021.106683>
10. Zhang X., Fu X. New theoretical models for the bending moment of thin-walled beams under three-point bending. *Applied Mathematical Modelling*. 2023; 121: 21-42. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2023.04.015>
11. Vieira R.F., Virtuoso F.B.E., Pereira E.B.R. Buckling of thin-walled structures through a higher order beam model. *Computers & Structures*. 2017; (180): 104-116. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2016.01.005>
12. Galishnikova Vera, Tesfaldet Gebre. The behaviour of thin-walled beam with restrained torsion. *Magazine of Civil Engineering*. 2022; 110 (2): 11009. DOI: 10.34910/MCE.110.9
13. Yao Yu-hang, et al. Bending performance of cold-formed thin-wall steel-glulam composite beams using finite element analysis. 2022; 111-116. DOI: 10.13759/j.cnki.dlx.2022.04.017
14. Ajdukiewicz Cezary, Gajewski Marcin. Verification of the thin-walled beam theory with application of FEM and shell modelling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 661(1). IOP Publishing. DOI 10.1088/1757-899X/661/1/012005
15. Kibkalo Anton, Lebedeva Maria, Volkov Mikhail. Methods of parametric optimization of thin-walled structures and parameters which influence on it. *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2016; 53. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20165301051>
16. Pacheco-Chérrez Josué, Diego Cárdenas, Oliver Probst. Experimental detection and measurement of crack-type damage features in composite thin-wall beams using modal analysis. *Sensors*. 2021; 21 (23): 8102. <https://doi.org/10.3390/s21238102>
17. Nguyen Tan-Tien, Pham Toan Thang, Jae-hong Lee. Flexural-torsional stability of thin-walled functionally graded open-section beams. *Thin-Walled Structures*. 2017; (110): 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.09.021>
18. Rees David WA. A Stress Analysis of a Thin-Walled, Open-Section, Beam Structure: The Combined Flexural Shear, Bending and Torsion of a Cantilever Channel Beam. *Applied Sciences*. 2025; 15 (15): 8470. <https://doi.org/10.3390/app15158470>
19. Zeng Lingqi. Static finite element analysis of three-closed box thin-wall beam based on Pseudo-elastic SMA hybrid composite material ANSYS. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. 2021; 1802 (2). DOI 10.1088/1742-6596/1802/2/022095
20. Wu Yan, Li Yang. Elastic and failure characteristics of additive manufactured thin wall lattice structures with defects. *Thin-Walled Structures*. 2021; (161): 107493. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107493>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Ступин М.А. Описание материалов и методов для расчета исследуемых конструкций, проведение расчётов, анализ результатов.

Макеев С.А. Формирование направления исследования, формулировка цели и задач, обозначение алгоритма исследований, обоснование и структурирование методики расчета.

Комлев А.А. Проведение расчётов, анализ результатов, оформление материалов.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Stupin Mikhail A. Description of materials and methods for designing structures under the study, providing calculations, data analysis.

Makeev Sergey A. Research concept design, determining the research goals and objectives, selecting and structuring the research methods.

Komlev Andrey A. Providing calculations, data analysis, writing the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ступин Михаил Александрович – ведущий инженер АО «Судостроительный завод им. Б. Е. Бутомы» (298313, г. Керчь, ул. Танкостров, 4).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9892-150X>,
e-mail: 79620503150@yandex.ru

Макеев Сергей Александрович – д-р техн. наук, доц. Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2915-982X>,
SPIN-код: 6262-3790,
Author ID: 374540,
e-mail: makeev608079@mail.ru

Комлев Андрей Александрович – канд. техн. наук, доц. Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, 5)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6919-3686>,
e-mail: komlev-12@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Stupin Mikhail A. – Leading Engineer, B. E. Buto-
ma Shipbuilding Plant JSC (4, Tankistov Str., Kerch,
298313).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9892-150X>,
e-mail: 79620503150@yandex.ru

Makeev Sergey A. - Doctor of Technical Science,
Associate Professor, the Siberian State Automobile
and Highway University (SibADI) (5, Ave. Mira, Omsk,
644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2915-982X>,
e-mail: makeev608079@mail.ru

Komlev Andrey A. – PhD in Engineering, Associate
Professor, the Siberian State Automobile and Highway
University (SibADI) (5, Ave. Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6919-3686>,
e-mail: komlev-12@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются рукописи по направлениям: Транспорт. Транспортные и технологические машины; Строительство. Строительные материалы и изделия; Редакция принимает к рассмотрению **оригинальные научные статьи** объемом 8–10 стр. машинописного текста через 1 интервал, 5–8 рисунков и (или) таблиц, 20–40 ссылок; **обзорные статьи** – (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – от 10 и более страниц, от 5 и более рисунков, до 80 ссылок.

Статья должна быть неопубликованной ранее в других изданиях, написана в контексте современной литературы, обладать новизной и соответствовать профилю журнала. Автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирования и ссылок на официальные документы и другие источники. Редакция принимает на себя обязательство ограничить круг лиц, имеющих доступ к присланной в редакцию рукописи, сотрудниками редакции, членами редколлегии, а также рецензентами данной работы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий статья будет **ретрагирована** (отозвана из печати).

Следует уделить особенное внимание качеству перевода. Недопустимо при переводе пользоваться машинами-переводчиками. Перевод должен быть выполнен профессиональными переводчиками, а лучше – носителем английского языка. Необходимо учесть, что законодательство охраняет права переводчиков авторским правом наравне с правами авторов оригинальных произведений. Перевод текста – творческий процесс, производный объект авторского права, т.е. переводчик – соавтор нового произведения.

1 УДК. На первой странице, слева в верхнем углу без отступа, указываются индекс по универсальной десятичной классификации (**УДК**) (размер шрифта 10 пт).

2. Заглавие статьи. Заголовок (максимально 10-12 слов) должен быть информативным, лаконичным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы. Приводится на русском и английском языках, по центру полужирным шрифтом размером 12 пт. прописными буквами.

3. Фамилии авторов. Количество авторов не должно превышать четырех. Для англоязычных метаданных важно соблюдать вариант написания сведений об авторе в последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия (Anna V. Ivanova). При латинизации фамилии можно воспользоваться системой 1 BSI – Британский Институт Стандартов (British Standards Institution) транслитерации на сайте <https://translit.ru>, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи обычным шрифтом (размер шрифта 12 пт.).

4. Аннотация. Аннотация включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе научная статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению, объем от 200 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Приводится на русском и английском языках. Начинается словом «Аннотация» с прописной буквы (шрифт полужирный, курсив, 10 пт); точка; затем с прописной буквы текст (курсив, 10 пт).

5. Ключевые слова служат ориентиром для читателя и используются для поиска статей в электронных базах, поэтому должны отражать дисциплину (область науки, в рамках которой написана статья), тему, цель и объект исследования.

Рекомендуемое количество ключевых слов – 10–12, количество слов внутри ключевой фразы – не более трех.

Размещаются после аннотации, на русском и английском языках.

6. Благодарности. Раздел включен в требования всеми крупными издательствами. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

7. Основные положения. Отражают ключевые результаты исследования, основное содержание статьи, изложенные тезисно и оформленные в виде 3–5 пунктов маркированного списка.

8. Основной текст статьи излагается на русском или английском языках, в электронном и бумажном виде (шрифт «Arial» (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный), в следующей последовательности:

Введение (1–4 стр.) В этом разделе описываются общая тема исследования, цели и задачи планируемой работы, теоретическая и практическая значимость, приводятся наиболее известные и авторитетные публикации по изучаемой теме, обозначаются нерешенные проблемы. Данный раздел должен содержать обоснование необходимости и актуальности исследования. Информация во Введении должна быть организована по принципу «от общего к частному».

Подразделы введения представлены на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Методы и материалы (от 2 стр. и более) В этом разделе в деталях описываются методы, которые использовались для получения результатов. Обычно сначала дается общая схема экспериментов/исследования, затем они представляются настолько подробно и с таким количеством деталей, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, организационных или структурных диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. Если было получено много похожих зависимостей, представляемых в виде графиков, то приведите только один типичный график, а данные об имеющихся количественных отличиях между ними, представьте в таблице.

Способы представления результатов представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Обсуждение и заключение. Раздел содержит интерпретацию полученных результатов исследования, предположения о полученных фактах, сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

9. Список источников (References)

В список источников включаются только те источники, которые автор использовал при подготовке статьи. Оформление библиографического списка регламентируется ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Ссыльаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 20–40 источников, но не более 50. Из них за последние 3 года – рекомендуется указать не менее 20, иностранных – не менее 15. Важно правильно оформить ссылку на источник.

Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет.

Источники указываются в конце статьи в алфавитном порядке либо в порядке упоминания в тексте статьи.

Приводится на русском языке и в латинице по образцу, представленному на сайте журнала.

Аффилиация. Фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, ORCID i, Scopus Author ID, ResearcherID, далее указать все места работы, должность, название организации, служебный адрес, электронная почта, телефон, e-mail.

Приводится на русском и английском языках.

Технические требования к оформлению.

Формат А4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом употреблении должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики представляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подписью, и отдельными файлами с расширением (JPEG, GIF, BMP). Должны быть пронумерованы (Таблица 1 – Заголовок, Рисунок 1 – Наименование), озаглавлены (таблицы должны иметь заглавие, выравнивание по левому краю, а иллюстрации – подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы представляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

ОБЩИЙ ПОРЯДОК ОПУБЛИКОВАНИЯ

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятими редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

- с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;
- согласие на обработку персональных данных в научном периодическом издании;

При регистрации присваивается дата поступления и регистрационный номер статьи. Статьи регистрируются через электронную редакцию. Регистрация осуществляется бесплатно.

Первичная экспертиза на соответствие требованиям и профилю журнала (модерация). Зарегистрированные рукописи статей проходят первичную экспертизу на соответствие требованиям и профилю журнала. Началом для экспертизы рукописи статьи редакцией является дата регистрации статьи. Редакция журнала оставляет за собой право отбора присыпаемых материалов. Только прошедшие первичную экспертизу рукописи статей, полностью соответствующие требованиям редакции журнала, соответствующие профилю журнала, получают статус «Принята к рассмотрению». Для них отдельно регистрируется дата приема рукописи статьи к рассмотрению.

Рецензирование. Принятые к рассмотрению рукописи статей направляются на слепое рецензирование для оценки их научного содержания нескольким специалистам соответствующего профиля, членам редакционной коллегии и/или редакционного совета. Экспертиза и рецензирование осуществляются бесплатно.

Решение о принятии к публикации основывается на поступивших рекомендациях рецензентов журнала. Если принято решение «рекомендовать с учетом исправления отмеченных недостатков», то автору направляются рекомендации и вопросы для исправления. Рукопись статьи, скорректированная автором, повторно направляется на рецензирование. Рукописи статей, не рекомендованные к публикации, повторно не рассматриваются. Автору рукописи направляется мотивированный отказ в публикации.

Редакционная подготовка. Рукописи статей, принятые к публикации, проходят редакционную подготовку к публикации – литературное редактирование и сверку данных, корректуру, форматирование, макетирование. Общий срок редакционной подготовки статьи, успешно прошедшей рецензирование, составляет 2 месяца в соответствии с периодичностью и графиком публикации выпусков. Корректура статей авторам не высылается, тем не менее вопросы, возникающие в процессе редактирования 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.