

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



научный рецензируемый журнал

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

“Vestnik SibADI”

Том 21, № 6. 2024
Vol.21, No. 6. 2024

наука
science

creation
творчество

образование
education

innovations
инновации

technology
технологии

tradition
традиции

ISSN 2071-7296 (Print)
ISSN 2658-5626 (Online)
DOI: 10.26518/2071-7296

ВЕСТНИК СИБАДИ

THE RUSSIAN AUTOMOBILE AND HIGHWAY INDUSTRY JOURNAL

DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-6

ТОМ 21, № 6. 2024

VOL. 21, No. 6. 2024



Учредитель и издатель:

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

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ

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

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

Founder and Publisher:

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

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

EDITORIAL POSTAL ADDRESS

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

Published since 2004
by 6 issues per year

Subscription index is 66000
in the Ural-Press catalog

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

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», 2024

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

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

- 2.5.11. – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки),
- 2.9.1. – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки),
- 2.9.4. – Управление процессами перевозок (технические науки),
- 2.9.5. – Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки),
- 2.1.1. – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки),
- 2.1.5. – Строительные материалы и изделия (технические науки),
- 2.1.7. – Технология и организация строительства (технические науки),
- 2.1.8. – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки).

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

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

Журнал индексируется и архивируется:

- в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ);
- в международной базе Dimensions;
- международной интерактивной справочно-библиографической системе EBSCO;
- международной реферативной базе периодических печатных изданий Ulrichsweb Global Serials Directory;
- международной базе открытых публикаций Google Академия;
- международной электронно-библиотечной системе The European Library;
- научном информационном пространстве «Соционет»;
- электронном каталоге научно-технической литературы ВИНТИ РАН;
- научной электронной библиотеке «Киберленинка»;
- Directory of Open Access Journals (DOAJ SEAL);
- CNKI scholar.

Журнал является членом:

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), CrossRef

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Подписано в печать 16.12.2024. Дата выхода в свет 24.12.2024. Формат 60×84 1/8 Гарнитура Arial. Печать оперативная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 27,25 Тираж 500 экз. Заказ 500 экз. Свободная цена. Отпечатано в типографии Издательско-полиграфического комплекса ФГБОУ ВО «СибАДИ», Россия, г. Омск, проспект Мира, д. 5.

Контент доступен под лицензией CC BY.

Поступившие в редакцию материалы не возвращаются.

Гонорары не выплачиваются.

Все статьи публикуются бесплатно.

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

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», 2024

"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 16.12.2024. Publication date is 24.12.2024. Format is 60 × 84 1/8.

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

Content is available under license CC BY.

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

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

© Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", 2024

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** 0000-0003-2763-0515

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

Транспорт

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

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

Строительство и архитектура

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Куприна Татьяна Васильевна редактор-ответственный секретарь, e-mail: vestnik_sibadi@sibadi.org

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

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

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

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

EDITORIAL TEAM

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

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

Transport, mining and mechanical engineering

Irina P. Troyanovskaya, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia

Scopus ID 57170706600, **Researcher ID** H-7490-2017,
ORCID 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

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

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

Sergey M. Mochalin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 6507433262, **Researcher ID** D-7301-2017, **ORCID ID** 0000-0003-3651-0961

Yuriy V. Nemirovsky, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Federal State Budgetary Institution of Science «The Institute of Theoretical and Applied Mechanics named after S.A. Khristianovich» of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia
Scopus Author ID 12759501600, **Researcher ID** M-8151-2017, **ORCID ID** 0000-0002-4281-4358

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Edwin Koźniewski, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, 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

Tatyana V. Kuprina
Executive Journal Secretary
e-mail: vestnik_sibadi@sibadi.org

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

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

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

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

**РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ
МАШИНОСТРОЕНИЕ***М.А. Афанасьев, И.С. Тюрменов***СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОХОДНЫХ
РЕВЕРСИВНЫХ ВИБРОПЛИТ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ДВИГАТЕЛЕЙ 814***А.Н. Назаров, С.Д. Иванов***РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРИБОРА БЕЗОПАСНОСТИ КРАНОВ МОСТОВОГО ТИПА.... 826***И.П. Трояновская, О.А. Гребенщикова***ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ БУЛЬДОЗЕРНОГО АГРЕГАТА
ПО ТЯГОВО-СКОРОСТНЫМ ПАРАМЕТРАМ 844***Д.В. Фурманов, Е.С. Буданова***ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ
НА ОСНОВЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНОГО
АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ГРАНУЛЯТА 852****РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ***Е.Е. Витвицкий, Е.С. Галактионова, Н.И. Юрьева***ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКРЕТНОГО ПОДХОДА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТРАНСПОРТНОЙ
СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЛОГИСТИКИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ 868***А.П. Жигадло, А.Ю. Шонин, И.А. Эйхлер***МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НАСЕЛЕНИЯ
СУБЪЕКТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ОМСКОЙ ОБЛАСТИ 882***П.А. Киселёв, А.И. Федотов, О.С. Яньков, С.Н. Кривцов***ИССЛЕДОВАНИЕ ТЯГОВО-ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОЛЁСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ
СРЕДСТВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ГИБРИДНОЙ СИЛОВЫМИ УСТАНОВКАМИ
НА СТЕНДАХ С БЕГОВЫМИ БАРАБАНАМИ..... 900***А.В. Климов***ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АЛГОРИТМА ИМПУЛЬСНОГО ПОДАВЛЕНИЯ
АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ
ТЯГОВОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА В ТОРМОЗНОМ РЕЖИМЕ МЕТОДАМИ
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ 914****РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА***А.С. Александров, Т.В. Семенова, Н.П. Александрова***РАСЧЕТНАЯ ВЛАЖНОСТЬ И ПОЛНАЯ ВЛАГОЕМКОСТЬ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ 932***Е.Р. Кирколул, И.В. Харламов***ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СТАЛЬНЫХ КАРКАСОВ ОДНОЭТАЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
ЗДАНИЙ НА ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ ОБРУШЕНИЕ КВАЗИСТАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ 948***В.И. Кочергин, С.П. Глушков, Д.Э. Абраменков***ПРИМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ГАСИТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ВИБРОЗАЩИТЫ
МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ 960***И.С. Кузнецов, В.В. Сиротюк, П.В. Орлов, В.Н. Кузнецова***ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАТОРФОВАННЫХ
ГРУНТОВ ПРИ УПЛОТНЕНИИ И ПРОМОРАЖИВАНИИ 972***В.В. Ядыкина, О.А. Михайлова, М.С. Лебедев, Е.В. Фомина***ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ВОСКОВ НА АДГЕЗИОННЫЕ
СВОЙСТВА БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО..... 984***И.А. Столетова (И.А. Черепанова), А.А. Володченко***АРХИТЕКТУРНЫЕ БЕТОНЫ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ 3D-ПЕЧАТИ..... 1002****ИСПРАВЛЕНИЯ***Н.А. Слободчикова, С.В. Ключев, К.В. Плюта***ИСПРАВЛЕНИЕ К СТАТЬЕ: ЗАВИСИМОСТЬ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ГРУНТОВ, УКРЕПЛЕННЫХ
НЕОРГАНИЧЕСКИМИ ВЯЖУЩИМИ, ОТ ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ 1017**

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Mikhail A. Afanasev, Ivan S. Tyuremnov
**STATISTICAL ANALYSIS OF TECHNICAL SPECIFICATIONS OF SELF-PROPELLED REVERSIBLE
PLATE COMPACTORS WITH DIFFERENT TYPES OF ENGINES.....** 815

Aleksandr N. Nazarov, Sergey D. Ivanov
DEVELOPING AN ADVANCED SAFETY DEVICE FOR BRIDGE-TYPE CRANES 827

Irina P. Troyanovskaya, Olga A. Grebenshchikova
**OPTIMIZATION OF TECHNICAL PRODUCTIVITY OF A BULLDOZER UNIT IN TERMS
OF TRACTION AND SPEED PARAMETERS.....** 845

Denis. V. Furmanov, Ekaterina. S. Budanova
**EFFICIENCY EVALUATION OF THE MILLING PROCESS BASED
ON THE GRANULOMETRIC ANALYSIS OF CRUSHED STONE-MASTIC ASPHALT CONCRETE
GRANULATE 853**

PART II. TRANSPORT

Evgeny E. Vitvitsky, Elena S. Galaktionova, Natalya I. Yuryeva
**APPLICATION OF A DISCRETE APPROACH TO DESIGNING THE TRANSPORT COMPONENT
OF MUNICIPAL SOLID WASTE LOGISTICS.....** 869

Alexander P. Zhigadlo, Anatoly Yu. Shonin, Ivan A. Eychler
**METHODOLOGY FOR ASSESSING THE STATE OF TRANSPORT SERVICES
FOR THE POPULATION OF THE SUBJECT OF THE RUSSIAN FEDERATION
ON THE EXAMPLE OF THE OMSK REGION 883**

Pavel Al. Kiselyov, Alexander I. Fedotov, Oleg S. Yan'kov, Sergey N. Krivtsov
**INVESTIGATION OF TRACTION AND DYNAMIC PROPERTIES OF WHEELED VEHICLES WITH
ELECTRIC AND HYBRID POWER PLANTS ON THE TEST STANDS WITH RUNNING DRUMS 901**

Alexander V. Klimov
**ALGORITHM PERFORMANCE STUDY OF IMPULSE SUPPRESSION OF AUTO-OSCILLATION
PHENOMENA IN THE ELECTROMECHANICAL SYSTEM OF ELECTRIC TRACTION DRIVE
IN BRAKING MODE BY METHODS OF SIMULATION MODELING.....** 915

PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Anatoly S. Aleksandrov, Tatiana V. Semenova, Nataliya P. Aleksandrova
**DESIGNED MOISTURE AND TOTAL MOISTURE CAPACITY
OF SOILS OF THE EARTHBED OF MOTOR ROADS 933**

Evgenij R. Kirkolup, Ivan V. Kharlamov
**CALCULATION OF STEEL FRAMES IN SINGLE-STOREY INDUSTRIAL BUILDINGS
FOR PROGRESSIVE COLLAPSE BY THE QUASI-STATIC METHOD 949**

Victor I. Kochergin, Sergey P. Glushkov, Dmitriy E. Abramnikov
**APPLICATION OF DYNAMIC VIBRATION DAMPERS
FOR VIBRATION PROTECTION OF BRIDGE STRUCTURES 961**

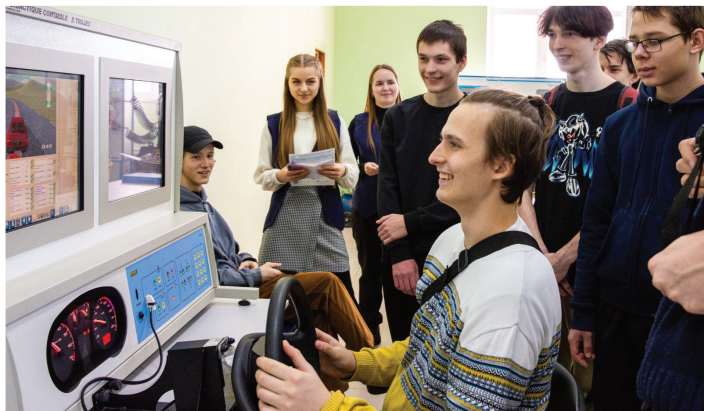
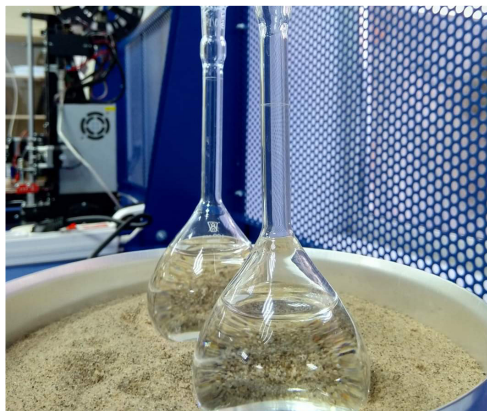
Ilya S. Kuznetsov, Viktor V. Sirotiuk, Pavel V. Orlov, Viktoria N. Kuznetsova
**CHANGES IN THE THERMOPHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BLOCKED SOILS
DURING COMPACTION AND THE PROMOTION 973**

Valentina V. Yadykina, Olga A. Mikhailova, Mikhail S. Lebedev, Ekaterina V. Fomina
**THE EFFECT OF SYNTHETIC WAX ADDITIVES
ON ADHESIVE PROPERTIES OF BITUMEN BINDERS.....** 985

Irina A. Stoletova (I.A. Cherepanova), Alexander A. Volodchenko
ARCHITECTURAL CONCRETES FOR 3D CONSTRUCTION PRINTING 1003

ERRATUM

Nadezhda A. Slobodchikova, Sergey V. Klyuev, Kseniya V. Plyuta
**ERRATUM TO: DEPENDENCE OF THE SOILS' ELASTIC MODULUS REINFORCED
WITH INORGANIC BINDERS ON COMPRESSIVE STRENGTH.....** 1018



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



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

Научная статья

УДК 625.76.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-814-825>

EDN: RBLXHW



Check for updates

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОХОДНЫХ РЕВЕРСИВНЫХ ВИБРОПЛИТ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ДВИГАТЕЛЕЙ

М.А. Афанасьев ✉, И.С. Тюремнов

Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия

✉ ответственный автор

afanasiev.m.a2016@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Реверсивные виброплиты – грунтоуплотняющие машины с плоским рабочим органом, оснащенные двумя и более дебалансными валами и обладающие возможностью реверсирования направления и скорости передвижения. Для привода реверсивных виброплит могут применяться бензиновые, дизельные или электрические двигатели. Эффективная работа реверсивных виброплит возможна только при рациональном подборе технических характеристик, а именно: частоты колебаний и вынуждающей силы вибровозбудителя, ширины основания, мощности двигателя и т.д. Чтобы установить взаимосвязь между техническими характеристиками реверсивных виброплит, оценить влияние типа двигателя на основные параметры, а также выявить направления совершенствования данного вида техники, был выполнен статистический анализ.

Материалы и методы. Были рассмотрены 484 модели реверсивных виброплит. Информация о моделях взята с официальных сайтов производителей и дилеров. Обработка данных выполнена в программе Microsoft Excel.

Результаты. Определены диапазоны изменения основных параметров, а также получены уравнения регрессии взаимосвязей частоты колебаний вибровозбудителя, вынуждающей силы, ширины основания, мощности двигателя, относительной вынуждающей силы и массы реверсивных виброплит. Для каждой регрессионной зависимости получены коэффициенты детерминации. Исследовано влияние типа двигателя на диапазоны изменения основных параметров реверсивных виброплит.

Заключение. Тип двигателя практически не влияет на значения параметров реверсивных виброплит в соответствующих диапазонах масс. Относительно невысокие значения коэффициентов детерминации позволяют сделать предположение о том, что производители не обладают достоверными методиками для обоснования технических характеристик реверсивных виброплит. Полученные зависимости могут быть рекомендованы для обоснования некоторых технических характеристик реверсивных виброплит. В последние десятилетия существенно возросли значения частоты колебаний и относительной вынуждающей силы, что оказывает влияние на характер взаимодействия реверсивных виброплит с грунтом.

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

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

Статья поступила в редакцию 30.12.2023; одобрена после рецензирования 11.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Афанасьев М.А., Тюремнов И.С. Статистический анализ технических характеристик самоходных реверсивных виброплит с различными типами двигателей // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 814-825. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-814-825>

© Афанасьев М.А., Тюремнов И.С., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-814-825>

EDN: RBLXHW

STATISTICAL ANALYSIS OF TECHNICAL SPECIFICATIONS OF SELF-PROPELLED REVERSIBLE PLATE COMPACTORS WITH DIFFERENT TYPES OF ENGINES

Mikhail A. Afanasev ✉, Ivan S. Tyuremnov

Yaroslavl State Technical University,

Yaroslavl, Russia

✉ corresponding author

afanasiev.m.a2016@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Reversible plate compactors are soil compaction machines with a flat operating device, having two or more unbalanced shafts and ability to reverse the direction and movement speed.

Reversible plate compactors may be driven by gasoline, diesel or electric engines.

The efficient operation of reversible plate compactors is only possible with the rational selection of technical specifications, such as oscillation frequency and driving force of the vibration exciter, base plate width, engine power, etc. To establish correlations between the technical specifications of reversible plate compactors, to assess the influence of the engine type on the main parameters and to identify the areas for improving this type of equipment, the statistical analyses was conducted.

Materials and methods. 484 models of reversible plate compactors were scrutinized. The information on the models were obtained from official websites of plate compactors manufacturers and their dealers. Data processing was performed in Microsoft Excel.

Results. The variation ranges of the main parameters were determined and regression equations for correlations between the oscillation frequency of the vibration exciter, the driving force, the width of the base plate, the relative exciting force and the mass of reversible plate compactors were derived. Correlation coefficients were obtained for each regression dependence. The influence of the engine type on the variation range of reversible plate compactors' main parameters was analyzed.

Conclusion. The type of engine has almost no effect on the parameters of reversible plate compactors in the corresponding mass ranges. Relatively low correlation coefficients let us suggest that manufacturers do not have reliable methods for justification of the technical specifications of reversible plate compactors. The obtained correlations may be recommended for verification of some technical specifications of reversible plate compactors. In recent decades, the values of oscillation frequency and relative exciting force have increased significantly, which affects the nature of interaction between a reversible plate compactor and soil.

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

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

The article was submitted: 31.12.2023 approved after reviewing: 11.11.2024; accepted for publication: 16.12.2024.

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. Afanasev M.A., Tyuremnov I.S. Statistical analysis of technical specifications of self-propelled reversible plate compactors with different types of engines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): 814-825. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-814-825>

© Afanasev M.A., Tyuremnov I.S., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Самоходные виброплиты относятся к средствам малой механизации и предназначены для послойного уплотнения грунтов слоями небольшой толщины. Они используются на тех видах работ, где затруднено применение других видов грунтоуплотняющих машин: в пазах фундаментов, в траншеях, на небольших площадках, при частом перемещении между участками проведения работ и т.д. Некоторые исследователи предлагают рассматривать реверсивные виброплиты как альтернативу легким и средним вибрационным каткам (таблицы 1, 2) [1, 2].

В зависимости от механизма передвижения выделяют самоходные нереверсивные и реверсивные виброплиты.

Самоходные реверсивные виброплиты (далее виброплиты) – это самоходные грунтоуплотняющие машины (ГУМ) с плоским рабочим органом, оснащенные вибровозбудителем направленного действия, содержащим два или более дебалансных вала. Самоходность таких машин обеспечивается смещением фазы вращения дебалансов, что приводит к появлению горизонтальной составляющей вынуждающей силы. В зависимости от фазы вращения дебалансов реверсивные виброплиты способны двигаться вперед, назад или уплотнять грунт на одном месте. Реверсивные виброплиты мо-

гут оснащаться бензиновым, дизельным или электрическим двигателем.

Существующие исследования затрагивают широкий перечень вопросов, связанных с работой виброплит. В них рассматриваются задачи по обеспечению вибрационной безопасности оборудования [3], способы снижения стоимости и повышения производительности [4, 5], возможности по использованию виброплит вблизи зданий [6]. Важной темой исследований является внедрение методов контроля качества уплотнения и разработка систем «интеллектуального» уплотнения, применяемых для различных видов ГУМ [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

Цель данного исследования – анализ зависимостей между техническими характеристиками реверсивных виброплит для совершенствования методик их проектирования. При анализе учитывались основные параметры реверсивных виброплит, к которым относятся: масса (М, кг), вынуждающая сила (Р, кН) и частота колебаний (f, Гц). Кроме абсолютного значения вынуждающей силы Р, для каждой плиты была рассчитана относительная вынуждающая сила, которая определялась как отношение вынуждающей силы Р к весу виброплиты Q, т.е. Р/Q. Этот параметр необходим для определения характера взаимодействия рабочего органа с уплотняемым грунтом.

Таблица 1
Технологические возможности реверсивных виброплит при уплотнении различных видов грунта [2]

Table 1
Technological capabilities of reversible plate compactors for compressing different types of soil [2]

Масса реверсивных виброплит, кг	Толщина уплотняемого слоя (м) / производительность (м³/ч)		
	Песок	Супесь	Суглинок
120–130	0,3/15	0,25/12	0,15/8
200–240	0,35/20	0,3/15	0,2/10
400–480	0,45/30	0,35/20	0,25/15
650–700	0,6/80	0,45/60	0,3/30

Таблица 2
Технологические возможности одновальцовых вибрационных катков при уплотнении различных видов грунта [2]

Table 2
Technological capabilities of single drum vibratory rollers for compaction of different types of soil [2]

Масса одновальцовых катков, т	Толщина уплотняемого слоя (м) / производительность (м³/ч)		
	Песок	Супесь	Суглинок
2,5–2,6	0,3/80	0,2/60	0,1/30
3,5–4,0	0,35/100	0,25/80	0,12/40
6,0–6,5	0,4/160	0,3/120	0,15/60

Таблица 3
Диапазоны изменения параметров реверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Table 3
Ranges of parameter changes of reversible plate compactors
Source: compiled by the authors.

Параметр	Тип двигателя		
	Бензиновый	Дизельный	Электрический
Масса плиты М, кг	54...1170		
	54...670	110...1170	81...212
Вынуждающая сила Р, кН	8,2...130		
	8,2...100	20...130	12...30
Частота колебаний, Гц	30,5...117		
	60...117	30,5...100	81...108
Мощность двигателя, кВт	1,8...21		
	1,8...15,5	3,1...21	1,8...4
Ширина основания, мм	310...1202		
	310...890	325...1202	350...500
Относительная вынуждающая сила Р/Q	7,66...42,18		
	9,9...34,82	7,66...42,18	14,43...15,6

Также в статистическом анализе рассматривалась мощность двигателя виброплит, поскольку этот параметр влияет как на экономические (текущие затраты на эксплуатацию оборудования), так и на технологические (преодолеваемый уклон) показатели.

Размеры основания виброплиты влияют на глубину уплотнения, достигаемую плотность и производительность¹. Увеличение ширины основания приводит к увеличению ширины полосы уплотнения, но при этом снижаются контактные давления. Поэтому данный параметр также рассматривался при анализе.

Существуют исследования, в которых проводится анализ технических характеристик виброплит [19, 20, 21, 22, 23]. Однако известные работы не охватывают современные виброплиты [19], используют ограниченную выборку рассматриваемых моделей и не учитывают различий в технических характеристиках виброплит с разным типом двигателей [20, 21, 22, 23].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Информация о характеристиках реверсивных виброплит бралась с официальных сайтов компаний-производителей, а также с сай-

тов их дилеров. Для статистического анализа использовалась программа Microsoft Excel.

В рамках статического анализа были рассмотрены 484 модели отечественных (Вибромаш, Красный маяк, Сплитстоун, Техком и др.) и зарубежных (ALTECO, AMMANN, Batmatic, Belle, BOMAG, Chicago Pneumatic, Diam, Dynapac, Enar, Euro Shatal, Excalibur, FoxWeld, Helmut, Husqvarna, Huter, Impulse, KOMAN, Lifan, Lumag, MBW, Mikasa, NTC, Vibromax, Wacker Neuson, Weber, Zitrek и др.) реверсивных виброплит, среди которых две модели произведены на территории СНГ (Россия, Беларусь), 167 – в КНР и 315 – в других странах (Великобритания, Германия, Израиль, Испания, Италия, США, Франция, Чехия, Швейцария, Швеция, Южная Корея, Япония).

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунках 1, 2, 3, 4, 5 изображены графические представления, показывающие взаимосвязь массы виброплиты (М, кг) с мощностью двигателя (N, кВт), вынуждающей силой (Р, кН), частотой колебаний (f, Гц), относительной вынуждающей силой (Р/Q) и шириной опорной поверхности (В, мм). В таблице 3 приведены диапазоны изменения указанных параметров.

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

Таблица 4
Влияние типа двигателя на технические характеристики реверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Table 4
Influence of engine type on technical specifications of reversible plate compactors
Source: compiled by the authors.

Модель виброплиты	Вынуждающая сила вибратора, кН	Частота вибрации, Гц	Ширина основания, мм	Мощность двигателя, кВт	Эксплуатационная масса, кг	Длина основания, мм	Скорость движения, см/с	Модель двигателя	Топливо
Batmatic CR2140	21	90	400	4,8	113	632	50	Kohler SH265	Бензин
	21	90	400	3,5	121	632	50	Kohler 15D225	Д/т
Belle RPX 35/40	35	81	400	4,3	176	700	45	Honda GX200	Бензин
	35	81	400	3,6	187	700	45	Hatz 1B20	Д/т
BOMAG BPR 25/40	25	85	400	3,6	135	650	42	Honda GX160	Бензин
	25	85	400	3,1	150	650	42	Hatz 1B20	Д/т
Euro Shatal 2414-50	24	92	500	4	149	642	33	Honda GX160	Бензин
	24	92	500	3,3	164	642	33	Hatz 1B20	Д/т
Husqvarna LG400	52	60	650	8,2	398	—	42	Honda GX390	Бензин
	52	60	650	7,2	434	—	42	Kohler KD15-440	Д/т
NTC VDR63	63	74	680	8,7	430	—	43	Honda GX390	Бензин
	63	74	680	7,9	450	—	43	Hatz 1B50	Д/т
Wacker Neuson DPU 3750	37	90	500	5,1	247	—	—	Honda GX270	Бензин
	37	90	500	4,2	265	—	—	Hatz 1B30	Д/т
Weber MT CR7	65	74	650	8,7	397	—	40	Honda GX390	Бензин
	65	74	650	7,5	475	—	40	Hatz 1B40	Д/т

Анализ результатов, представленных на рисунках 1, 2, 3, 4, 5, показывает, что тип двигателя влияет на основные параметры реверсивных виброплит. В частности, использование дизельного двигателя при прочих равных условиях приводит к увеличению массы оборудования и снижению мощности. Особенно это заметно при анализе характеристик моделей, для которых доступны как бензиновые, так и дизельные модели двигателей (таблица 4).

Среди реверсивных виброплиты представлено всего 3 модели с электрическим двигателем. Такой выборки недостаточно для установления каких-либо значимых зависимостей. Однако стоит отметить, что по всем основным

параметрам электрические реверсивные виброплиты укладываются в диапазон параметров бензиновых моделей.

Вынуждающая сила реверсивных виброплит возрастает с увеличением их массы (см. рисунок 1). При этом линия регрессии для дизельных моделей практически совпадает с линией регрессии для бензиновых моделей в соответствующих диапазонах масс.

Характерным является наличие ряда дискретных значений вынуждающей силы (30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 и 65 кН) для определенных диапазонов масс виброплит с различными типами двигателей.

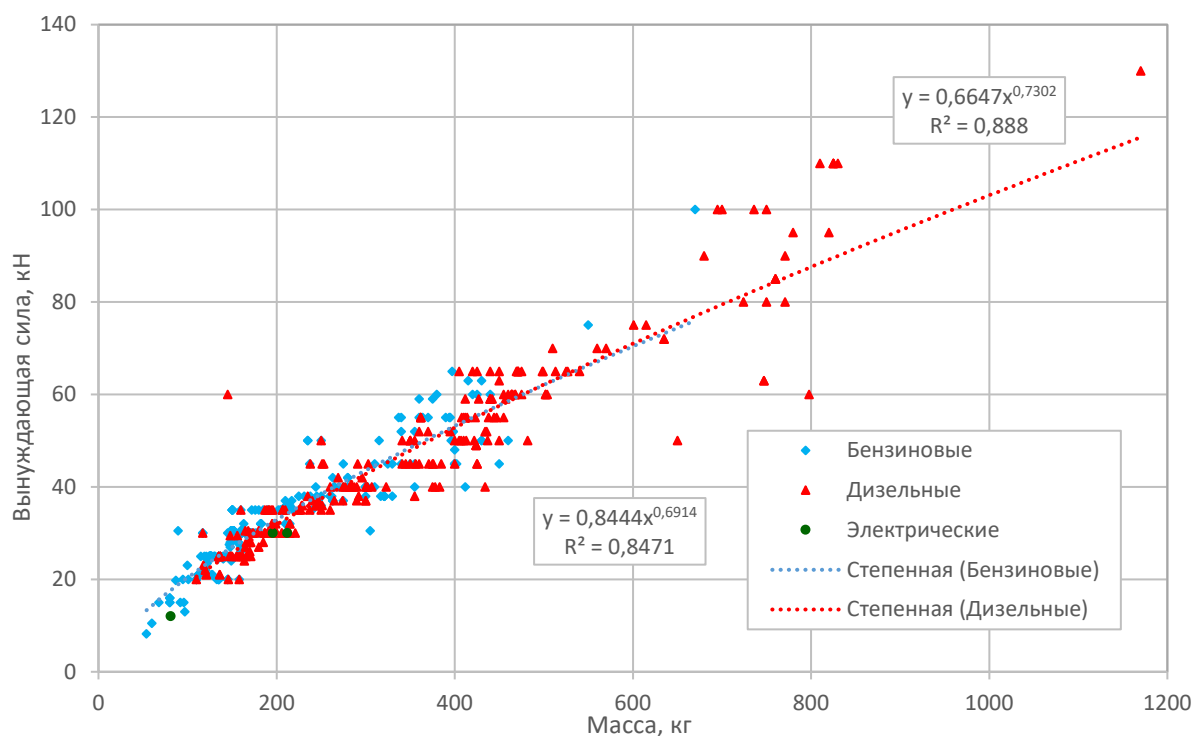


Рисунок 1 – Соотношение между массой (M , кг) и вынуждающей силой (P , кН) реверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Correlation between mass (M , kg) and exciting force (P , kN) of reversible plate compactors
Source: compiled by the authors.

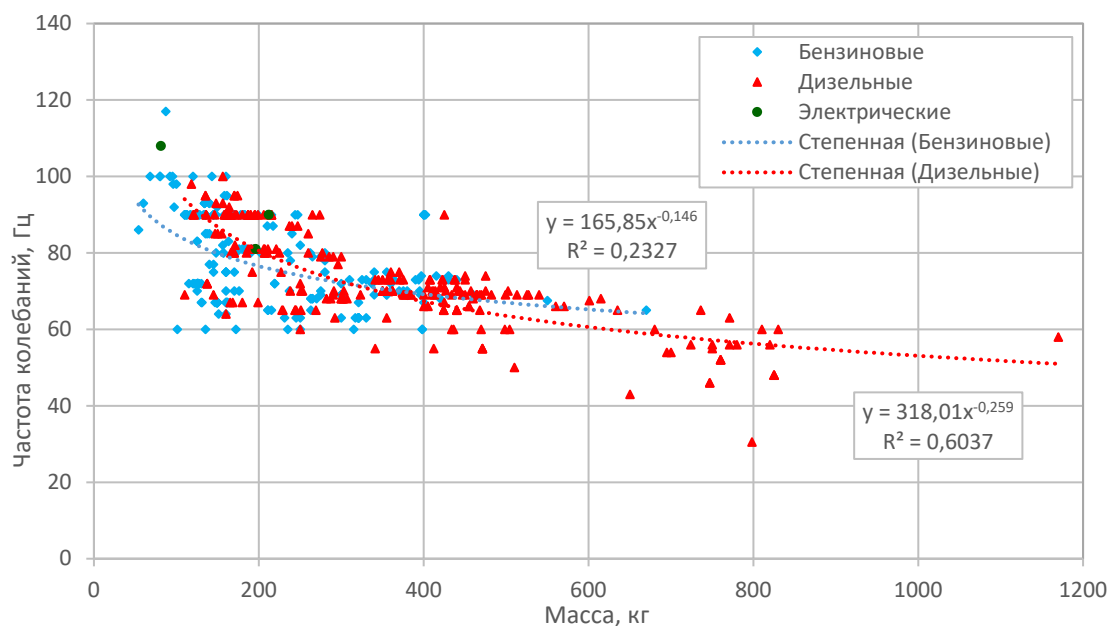


Рисунок 2 – Соотношение между массой (M , кг) и частотой колебаний (f , Гц) реверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Correlation between mass (M , kg) and oscillation frequency (f , Hz) of reversible plate compactors
Source: compiled by the authors.

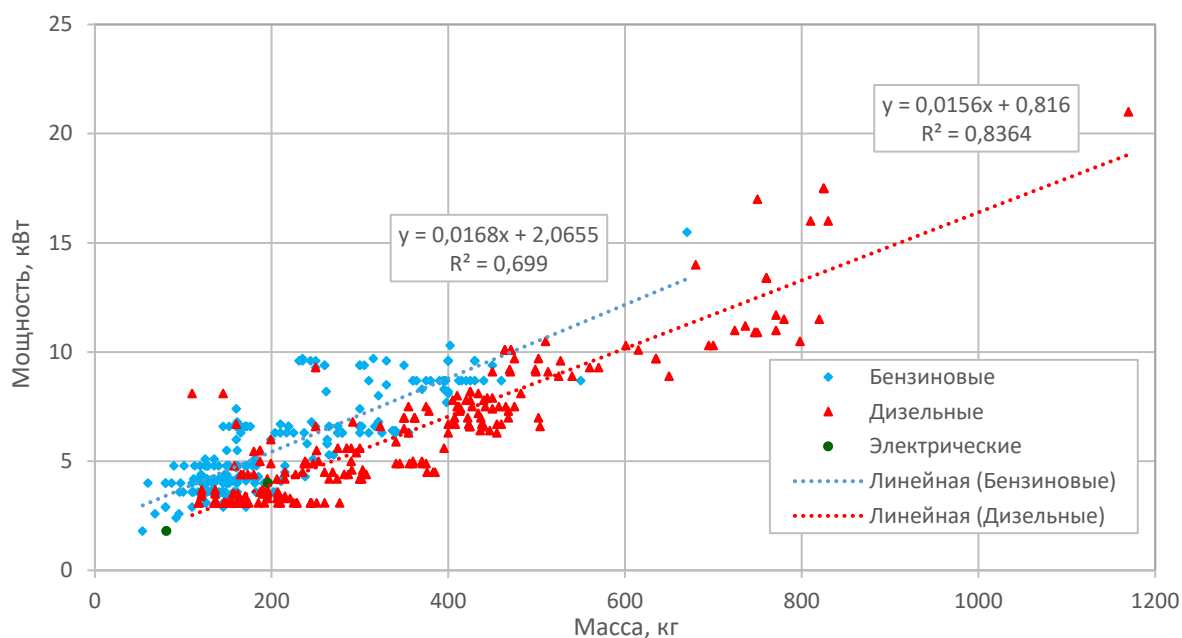


Рисунок 3 – Соотношение между массой (M , кг) и мощностью двигателя (N , кВт) реверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Correlation between mass (M , kg) and engine power (N , kW) of reversible plate compactors
Source: compiled by the authors.

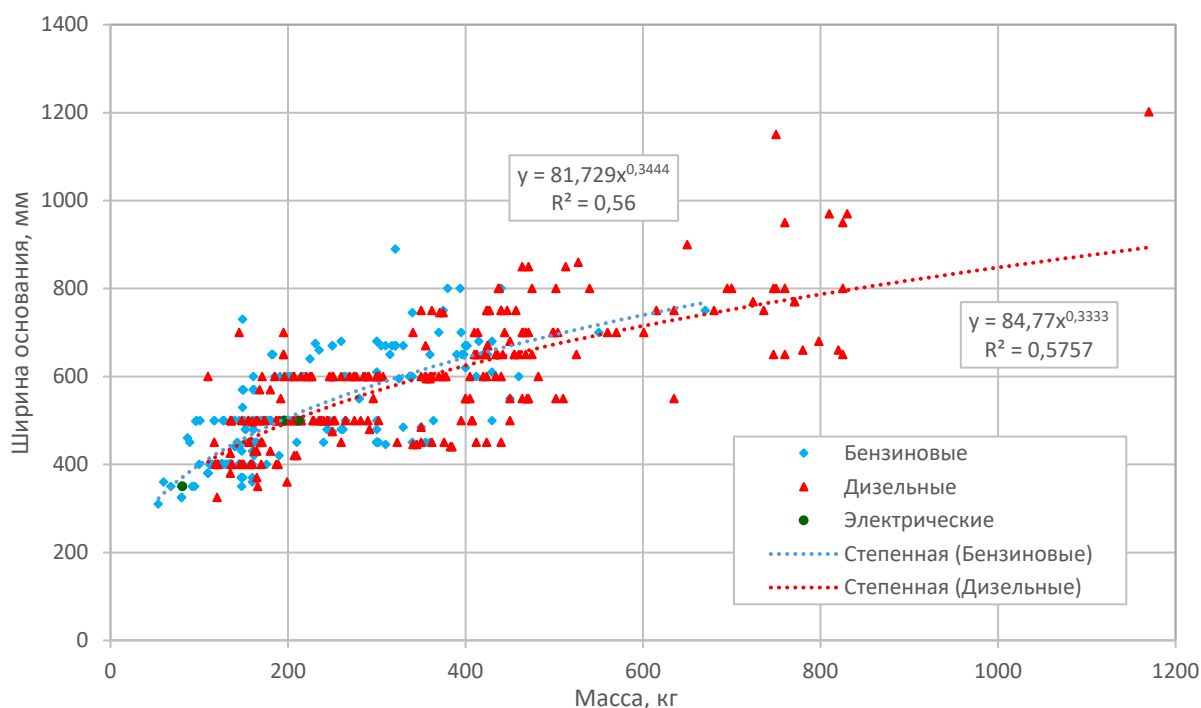


Рисунок 4 – Соотношение между массой (M , кг) и шириной основания (B , мм) реверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Correlation between mass (M , kg) and base plate width (B , mm) of reversible plate compactors
Source: compiled by the authors.

Частота колебаний реверсивных виброплит уменьшается с увеличением их массы (см. рисунок 2). Линии регрессии для мощности двигателя бензиновых и дизельных моделей располагаются очень близко друг от друга и имеют схожий характер. Однако частота колебаний бензиновых реверсивных виброплит не опускается ниже 60 Гц, тогда как минимальная частота для дизельных моделей составляет 30,5 Гц.

Мощность двигателя реверсивных виброплит возрастает с увеличением их массы (см. рисунок 3). Линия регрессии для дизельных моделей практически параллельна линии регрессии для бензиновых реверсивных виброплит и смещена от него вправо (в сторону увеличения массы) и вниз (в сторону снижения мощности). То есть при идентичных основных параметрах дизельная виброплита имеет на 4...16% большую массу и на 10...17% меньшую мощность двигателя, что хорошо заметно при анализе характеристик моделей виброплит, выпускающихся как с бензиновым, так и с дизельным двигателем (см. таблицу 4).

Ширина основания реверсивных виброплит с бензиновым и дизельным двигателями воз-

растает с увеличением массы, при этом линии регрессии для виброплит с различными типами двигателей практически совпадают (см. рисунок 4). Наиболее распространена ширина основания, равная 500 мм, – на нее приходится 20% всех моделей. Также часто встречаются виброплиты с шириной основания 600 мм – она представлена у 13% всех моделей. Как правило, ширина основания реверсивных виброплит не превышает 1000 мм. Исключение составляют модели от компаний Masterpac и Wacker Neuson с шириной основания 1150 и 1202 мм соответственно.

Для реверсивных виброплит с бензиновыми и дизельными двигателями диапазоны значений и линии регрессии относительного вынуждающего усилия в целом совпадают в соответствующих диапазонах масс (см. рисунок 5). Следует отметить, что значение относительной вынуждающей силы уменьшается по мере увеличения массы виброплиты.

Наблюдаемое расположение точек по гиперболическим зависимостям обусловлено наличием ряда дискретных значений вынуждающей силы для определенного диапазона масс виброплит (см. рисунок 1).

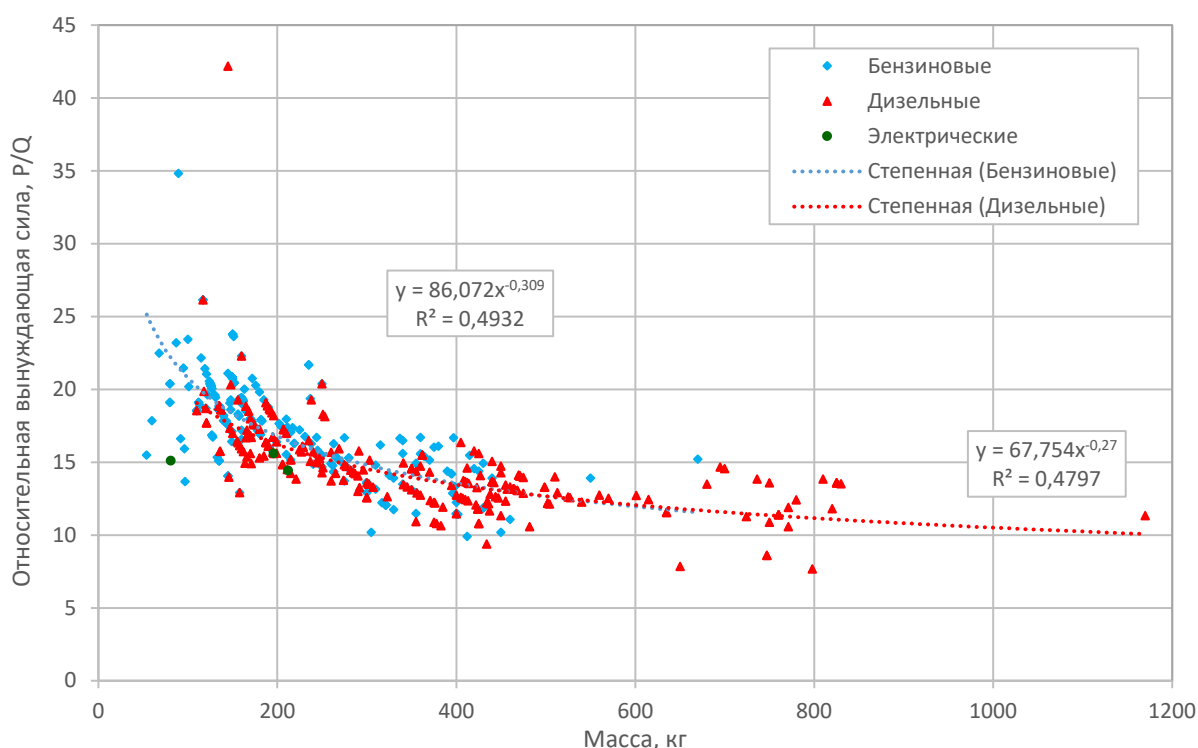


Рисунок 5 – Соотношение между массой (M , кг) и относительной вынуждающей силой (P/Q) реверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Correlation between mass (M , kg) and relative exciting force (P/Q) of reversible plate compactors
Source: compiled by the authors.

Таблица 5
Уравнения регрессии для различных типов реверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Table 5
Regression equations for different types of reversible plate compactors
Source: compiled by the authors.

Тип двигателя	Параметр	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации, R ²
Бензиновые	Вынуждающая сила (P, кН)	$P = 0,8444M^{0,6914}$	0,8566
	Частота колебаний (f, Гц)	$f = 165,85M^{-0,146}$	0,2189
	Мощность двигателя (N, кВт)	$N = 0,0168M + 2,0655$	0,699
	Ширина основания (B, мм)	$B = 81,729M^{0,3444}$	0,5772
	Относительная вынуждающая сила (P/Q)	$P/Q = 86,072M^{-0,309}$	0,5433
Дизельные	Вынуждающая сила (P, кН)	$P = 0,6647M^{0,7302}$	0,901
	Частота колебаний (f, Гц)	$f = 318,01M^{-0,259}$	0,5935
	Мощность двигателя (N, кВт)	$N = 0,0156M + 0,816$	0,8364
	Ширина основания (B, мм)	$B = 84,77M^{0,3333}$	0,5692
	Относительная вынуждающая сила (P/Q)	$P/Q = 67,754M^{-0,27}$	0,5542

В таблице 5 приведены уравнения регрессии и значения коэффициентов корреляции для зависимостей основных параметров реверсивных виброплит от их массы (M, кг).

ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, для реверсивных виброплит сопоставимой массы в каждой из рассмотренных подгрупп (с дизельными, бензиновыми и электрическими двигателями) наблюдается значительный разброс параметров, который в отдельных случаях достигает двукратных значений. Это, скорее всего, обусловлено тем, что у производителей отсутствует единая методика для обоснования технических характеристик реверсивных виброплит для использования в заданных условиях, т.е. с учетом толщины уплотняемого слоя, требуемого коэффициента уплотнения, типа и влажности грунта.

Дизельные реверсивные виброплиты, при тех же значениях частоты и вынуждающей силы колебаний, а также ширины основания, несколько тяжелее бензиновых, что обуславливается конструктивными особенностями применяемых двигателей. При этом на реверсивных виброплитах массой свыше 670 кг применяются только дизельные двигатели. Электрические двигатели используются в реверсивных виброплитах весьма ограниченно и в диапазоне масс до 212 кг.

Диапазоны значений вынуждающей силы, частоты колебаний, ширины основания и относительной вынуждающей силы бензиновых и дизельных моделей практически совпадают в соответствующих диапазонах масс. При этом установленная мощность дизельных двигателей при тех же значениях ширины основания, частоты и вынуждающей силы колебаний меньше, чем у бензиновых моделей.

За последние годы у реверсивных виброплит существенно выросли значения частоты колебаний вибровозбудителя и относительной вынуждающей силы. Так, в 1960-е годы частоты колебаний вибровозбудителя для виброплит массой 100–1000 кг составляли $f = 30...65$ Гц, а относительная вынуждающая сила находилась в диапазоне $P/Q = 4...12$ [19]. К 2011 г. значения этих параметров достигли $f = 40...80$ Гц и $P/Q = 9...23$ соответственно [23]. В современных моделях реверсивных виброплит частота колебаний вибровозбудителя составляет $f = 30,5...117$ Гц, а относительная вынуждающая сила $P/Q = 7,66...42,18$.

Применяемая в настоящее время зависимость для расчета амплитудных контактных напряжений, предложенная Н.Я. Хархутой, имеет вид²:

$$\sigma_o = k_{np} \frac{P + Q}{F},$$

² Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1975. 288 с.

где σ_0 – амплитудные контактные напряжения, Па; P – вынуждающая сила, Н; Q – вес виброплиты, Н; F – площадь опорной поверхности, м^2 ; $k_{\text{пр}}$ – коэффициент превышения, зависящий от значений P/Q .

Данная методика применима только для диапазона значений³ относительной вынуждающей силы $P/Q = 2 \dots 12$. Таким образом, применение формулы для современных реверсивных виброплит существенно ограничивается в связи с изменением диапазона значений P/Q , который для современных реверсивных виброплит равен $P/Q = 7,66 \dots 42,18$. Также желателен учет частоты колебаний и характеристик уплотняемого грунта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при выполнении дальнейших исследований по оценке технологических возможностей виброплит нет необходимости выделять реверсивные виброплиты с бензиновым, дизельным и электрическим двигателем. Однако тип двигателя является важным фактором при решении задач, связанных с повышением энергоэффективности грунтоуплотняющих машин. Также следует учитывать, что реверсивным виброплитам с различными типами двигателей соответствуют несколько различные диапазоны масс и различные соотношения массы основания виброплиты и массы рамы с двигателем, выступающим в роли пригруза и ограничивающим колебания основания виброплит. Это имеет значение при разработке реологических моделей реверсивных виброплит.

Существенный разброс технических характеристик и невысокий коэффициент детерминации большинства полученных регрессионных зависимостей позволяют сделать вывод о том, что производители не имеют единой методики обоснования технических характеристик реверсивных виброплит. Данная ситуация вызвана рядом объективных факторов. В частности, виброударным характером колебаний реверсивных виброплит, обусловленным тем, что относительная вынуждающая сила виброплиты существенно (в 6,6–11,4 раз) превышает критические значения, установленные Н.Я. Хархутой⁴. Это также приводит к тому, что частота вращения дебалансных валов может не совпадать с частотой циклов приложения

нагрузки к грунту и превышать последнюю в 2 и более раза, что значительно усложняет моделирование взаимодействия виброплиты с грунтом, но требует обязательного учета при построении математической модели работы реверсивной виброплиты.

Также не до конца изучены свойства грунтов и процессы, происходящие в грунте при динамическом нагружении его поверхности. Данные факторы затрудняют прогнозирование результатов уплотнения грунта виброплитами и приводят к ситуации, когда производители используют для обоснования технических характеристик виброплит метод проб и ошибок, что отражается в широком разбросе основных параметров виброплит сопоставимой массы и ограниченным рекомендациям по технологическим возможностям выпускаемых виброплит [24].

Полученные в настоящем исследовании зависимости могут быть полезны при обосновании отдельных технических характеристик (вынуждающей силы, потребляемой мощности) реверсивных виброплит с различными типами двигателя.

Высокие значения вынуждающей силы на отдельных моделях реверсивных виброплит связаны с особенностями их конструкции, в частности, с увеличением количества дебалансных валов. Количество дебалансных валов также влияет на равномерность распределения контактных давлений по площади опорной поверхности. Влияние конструктивных особенностей виброплит на их технические характеристики и технологические возможности является темой для отдельного исследования.

Целесообразно также проведение анализа рекомендаций производителей по технологическим возможностям самоходных реверсивных виброплит.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тюремнов И.С., Новичихин А.А. Уплотнение грунтов вибрационными плитами: монография [Электронный ресурс]. Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2018. 143 с.
2. Марышев Б.С. Большие возможности при малой цене. Реверсивные виброплиты // Строительная техника и технологии. 2002. № 1. С. 46–48.

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

⁴ Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1975. 288 с.

3. Кузьмичев В.Д. Математическая модель виброплиты // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 3(35). С. 65–68.
4. Massarsch, K. Rainer & Wersäll, Carl. Vibratory plate resonance compaction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*. 2019. 173. 1–30. 10.1680/jgeen.19.00169.
5. Sawant, Rohan. Advance Equipment for Compaction on Site. 2021. 10.35291/2454-9150.2021.0099.
6. Czech, Krzysztof & Gosk, Wojciech. The Impact of Work of Hydraulic Compactor Type V8 from MTS on the Level of Vibrations Propagated to the Environment. *Procedia Engineering*. 2017. 189. 478–483. 10.1016/j.proeng.2017.05.077.
7. Anderegg, Roland & Kaufmann, Kuno. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors. *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006. 10.1061/40803(187)41.
8. Kaufmann, K. & Anderegg, Roland. GPS-based Compaction Technology. *Proceedings of the 1st International Conference on Machine Control and Guidance*. 2008. 287–296.
9. Sivagnanasuntharam, Suthakaran & Sounthararajah, Arooran & Kodikara, Jayantha. A New Approach to Maximising the Benefits of Current Intelligent Compaction Technology for Asphalt Materials. *Construction and Building Materials*. 2023. 393. 10.1016/j.conbuildmat.2023.132031.
10. Ranasinghe, Rajitha & Sounthararajah, Arooran & Kodikara, Jayantha. An Intelligent Compaction Analyzer: A Versatile Platform for Real-Time Recording, Monitoring, and Analyzing of Road Material Compaction. *Sensors*. 2023. 23. 7507. 10.3390/s23177507.
11. Owusu-Nimo, Frederick & Peprah-Manu, Daniel & Ayeh, Felix & Charkley, Frederick & Ampadu, Samuel. Compaction Verification of Lateritic Soil Using Electrical Resistivity: A Laboratory Study. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2023. 1–14. 10.1007/s10706-023-02598-z.
12. Hassan, Asem & Nadhum, Gehan. Geotechnical-Electrical Evaluation of Soil Compaction Parameters, South of Baqubah City. *Iraqi Geological Journal*. 2023. 56. 144–155. 10.46717/igj.56.1D.12ms-2023-4-21.
13. Yao, Yangping & Song, Er Bo. Intelligent compaction methods and quality control. *Smart Construction and Sustainable Cities*. 2023. 1. 10.1007/s44268-023-00004-4.
14. Aodah, Haider & Chandra, Satish. *Intelligent Compaction Technology*. 2018.
15. Chen, Chengyong & Chang, Fagang & Li, Li & Dou, Wenqiang & Xu, Changjing. Optimization of intelligent compaction based on finite element simulation and nonlinear multiple regression. *Electronic Research Archive*. 31. 2023. 2775–2792. 10.3934/era.2023140.
16. Xu, Tianyu & Zhou, Zhijun & Yan, Ruipeng & Zhang, Zhipeng & Zhu, Linxuan & Chen, Chaoran & Fu, Xu & Liu, Tong. Real-Time Monitoring Method for Layered Compaction Quality of Loess Subgrade Based on Hydraulic Compactor Reinforcement. *Sensors*. 2020. 20. 4288. 10.3390/s20154288.
17. Zhang, Zhipeng & Zhou, Zhijun & Guo, Tao & Xu, Tianyu & Zhu, Linxuan & Fu, Xu & Chen, Chaoran & Liu, Tong. A measuring method for layered compactness of loess subgrade based on hydraulic compaction. *Measurement Science and Technology*. 2021. 32. 10.1088/1361-6501/abd7ab.
18. Hou, Ziyi & Dang, Xiao & Yuan, Yezhen & Tian, Bo & Li, Sili. (2021). Research on Intelligent Compaction Technology of Subgrade Based on Regression Analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021. 1–9. 10.1155/2021/4100896.
19. Хархута Н.Я., Андрейченко Ю.Я. Выбор основных параметров виброплит // Строительные и дорожные машины. 1968. № 4. С. 6–8.
20. Мусияко Д.В., Расулов Р.А. Самоходная вибрационная плита с вальцем // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 4(43). С. 73–80.
21. Anderegg, Roland. *Automatische Verdichtungsskontrolle: eine Anwendung der nichtlinearen Schwingungstheorie*. 2018.
22. Тюремнов И.С., Новичихин А.А. Статистический анализ технических характеристик вибрационных плит // Механизация строительства. 2014. № 11(845). С. 32–35.
23. Кузьмичев В.А., Кузьмичев В.Д. Исследование рабочих параметров самоходных виброплит, применяемых при уплотнении грунтов // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 3(28). С. 66–71.
24. Тюремнов И.С., Новичихин А.А., Филатов И.С. Обзор рекомендаций производителей по использованию вибрационных плит для уплотнения грунта // Механизация строительства. 2014. № 12(846). С. 28–32.

REFERENCES

1. Tyuremnov I.S., Novichikhin A.A. *Soil compaction by vibrating plates: monograph* [Electronic resource]. Yaroslavl. Izdat. dom YaSTU, 2018: 143. (in Russ.)
2. Maryshev B.S. Great possibilities at a low price. Reversible vibrating plates. *Construction Equipment and Technologies*. 2002; 1: 46–48. (in Russ.)
3. Kuz'michev, V. D. Mathematical model of plate compactors. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2012; 3(35): 65–68. (in Russ.)
4. Massarsch, K. Rainer & Wersäll, Carl. Vibratory plate resonance compaction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*. 2019; 173: 1–30. 10.1680/jgeen.19.00169.
5. Sawant, Rohan. Advance Equipment for Compaction on Site. 2021. 10.35291/2454-9150.2021.0099.
6. Czech, Krzysztof & Gosk, Wojciech. The Impact of Work of Hydraulic Compactor Type V8 from MTS on the Level of Vibrations Propagated to the Environment. *Procedia Engineering*. 2017; 189: 478–483. 10.1016/j.proeng.2017.05.077.
7. Anderegg, Roland & Kaufmann, Kuno. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors. *Geo Congress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006. 10.1061/40803(187)41.

8. Kaufmann, K. & Anderegg, Roland. GPS-based Compaction Technology. Proceedings of the 1st *International Conference on Machine Control and Guidance*. 2008: 287–296.
9. Sivagnanasuntharam, Suthakaran & Sountharajah, Arooran & Kodikara, Jayantha. A New Approach to Maximising the Benefits of Current Intelligent Compaction Technology for Asphalt Materials. *Construction and Building Materials*. 2023. 393. 10.1016/j.conbuildmat.2023.132031.
10. Ranasinghe, Rajitha & Sountharajah, Arooran & Kodikara, Jayantha. An Intelligent Compaction Analyzer: A Versatile Platform for Real-Time Recording, Monitoring, and Analyzing of Road Material Compaction. *Sensors*. 2023; 23. 7507. 10.3390/s23177507.
11. Owusu-Nimo, Frederick & Peprah-Manu, Daniel & Ayeh, Felix & Charkley, Frederick & Ampadu, Samuel. Compaction Verification of Lateritic Soil Using Electrical Resistivity: A Laboratory Study. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2023: 1–14. 10.1007/s10706-023-02598-z.
12. Hassan, Asem & Nadhum, Gehan. Geotechnical-Electrical Evaluation of Soil Compaction Parameters, South of Baqubah City. *Iraqi Geological Journal*. 2023; 56: 144–155. 10.46717/igj.56.1D.12ms-2023-4-21.
13. Yao, Yangping & Song, Er Bo. Intelligent compaction methods and quality control. *Smart Construction and Sustainable Cities*. 2023; 1. 10.1007/s44268-023-00004-4.
14. Aodah, Haider & Chandra, Satish. *Intelligent Compaction Technology*. 2018.
15. Chen, Chengyong & Chang, Fagang & Li, Li & Dou, Wenqiang & Xu, Changjing Optimization of intelligent compaction based on finite element simulation and nonlinear multiple regression. *Electronic Research Archive*. 2023; 31: 2775–2792. 10.3934/era.2023140.
16. Xu, Tianyu & Zhou, Zhijun & Yan, Ruipeng & Zhang, Zhipeng & Zhu, Linxuan & Chen, Chaoran & Fu, Xu & Liu, Tong. Real-Time Monitoring Method for Layered Compaction Quality of Loess Subgrade Based on Hydraulic Compactor Reinforcement. *Sensors*. 2020; 20. 4288. 10.3390/s20154288.
17. Zhang, Zhipeng & Zhou, Zhijun & Guo, Tao & Xu, Tianyu & Zhu, Linxuan & Fu, Xu & Chen, Chaoran & Liu, Tong. A measuring method for layered compactness of loess subgrade based on hydraulic compaction. *Measurement Science and Technology*. 2021; 32. 10.1088/1361-6501/abd7ab.
18. Hou, Ziyi & Dang, Xiao & Yuan, Yezhen & Tian, Bo & Li, Sili. Research on Intelligent Compaction Technology of Subgrade Based on Regression Analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021; 1–9. 10.1155/2021/4100896.
19. Kharkhuta N.Ya., Andreichenko Yu.Ya. Selecting the main parameters of a vibrating plate. *Construction and road machinery*. 1968; 4: 6–8. (in Russ.)
20. Musiyako D.V., Rasulov R.A. Self-propelled vibrating plate with a roller. *Bulletin of PNU*. 2016; 4(43): 73–80. (in Russ.)
21. Anderegg, Roland Automatische Verdichtungskontrolle: eine Anwendung der nichtlinearen Schwingungstheorie. 2018.
22. Tyuremnov I.S., Novichikhin A.A. Statistical analysis of technical characteristics of vibrating plates. *Mehanizacija stroitel'stva*. 2014; 11(845): 32–35. (in Russ.)
23. Kuz'michev V.A., Kuz'michev V.D. Research of working parameters of self-propelled vibroplates used at ground consolidation. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2011; 3(28): 66–71. (in Russ.)
24. Tyuremnov, I.S., Novichikhin, A.A., Filatov I.S. Review of manufacturers' recommendations on the use of vibrating plates for soil compaction. *Mehanizacija stroitel'stva*. 2014; 12(846): 28. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

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

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

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Afanasev M.A. Data collection on the technical specifications of plate compactors, data processing, text writing.

Tyuremnov I.S. General research management, article preparation.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

SPIN-код: 8256-8500,

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

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

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

SPIN-код: 9976-0728,

e-mail: tyuremnovis@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

SPIN-code: 8256-8500,

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

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

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

SPIN-code: 9976-0728,

e-mail: tyuremnovis@yandex.ru

УДК 621.86

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-826-843>

EDN: TYGGUV



РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРИБОРА БЕЗОПАСНОСТИ КРАНОВ МОСТОВОГО ТИПА

А.Н. Назаров^{1,2} ✉, **С.Д. Иванов¹**¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, Россия²ООО «ИТЦ «КРОС»,
г. Ивантеевка, Россия✉ ответственный автор
alexnazavr@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Перечислены экспериментально выявленные недостатки отечественных комплексных приборов безопасности в части ограничения грузоподъемности и регистрации параметров. Обоснованы причины, по которым недопустимо переоснащение кранов под управлением зарубежных систем безопасности на существующие отечественные приборы. Предложено обеспечивать безопасность таких кранов за счет разработки приборов безопасности, учитывающих динамические характеристики конкретного крана и алгоритмы управления его приводами.

Материалы и методы. Исследование проведено с использованием разработанного прибора безопасности, реализующего функции ограничения грузоподъемности, автоматического определения параметров алгоритма ОГП, определения интенсивности работы крана в целом. Приведено описание данных алгоритмов применительно к кранам, оснащенным частотной системой управления. Экспериментальное определение эксплуатационных параметров прибора проведено на мостовом кране, оснащенном системой безопасности ControlPro (KoneCranes).

Результаты. Применение прибора позволило снизить коэффициент динамичности при подъеме с подхватом во всем диапазоне масс поднимаемых грузов. При подъеме околономинальных грузов зафиксировано двукратное снижение динамической составляющей. Точность определения характеристического числа составила 1,3%.

Обсуждение и заключение. Продемонстрировано, что разработанный алгоритм ограничения грузоподъемности позволил не только повысить защищенность крана, но и снизить нагрузки на него, в сравнении со штатной системой безопасности. Точность определения рабочих параметров в условиях реального технологического процесса удовлетворяет требованиям нормативной документации. Таким образом, показана допустимость дублирования или замены части функций штатной системы безопасности путем применения разработанного прибора.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мостовой кран, механизм подъема, прибор безопасности, ограничитель грузоподъемности, регистратор параметров, защита от перегрузки, наработка крана

Статья поступила в редакцию 14.11.2024; одобрена после рецензирования 26.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

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: Назаров А.Н., Иванов С.Д. Разработка перспективного прибора безопасности кранов мостового типа // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 826-843. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-826-843>

© Назаров А.Н., Иванов С.Д., 2024

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-826-843>

EDN: TYGGUV

DEVELOPING AN ADVANCED SAFETY DEVICE FOR BRIDGE-TYPE CRANES

Aleksandr N. Nazarov^{1,2}✉, Sergey D. Ivanov¹

¹Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, Russia

²ETC KROS LLC,
Ivanteevka, Russia

✉ corresponding author
alexnazavr@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Experimentally revealed disadvantages of domestic complex safety devices in the part of load capacity limitation and parameters registration are described. The reasons why it is inadmissible to re-equip cranes under the control of foreign safety systems to the existing domestic devices are explained. It is suggested to achieve the safety of such cranes through the development of safety devices that take into account the dynamic characteristics of a particular crane and control algorithms of its drives.

Materials and methods. The study was done using the developed safety device realizing the functions of load capacity limitation, automatic determination of the parameters of the load capacity limiter algorithm, determination of the crane operation intensity. The description of these algorithms in relation to cranes equipped with frequency control system is given. Experimental determination of operational parameters of the device is carried out on an overhead crane equipped with the ControlPro safety system (KoneCranes).

Results. The use of the device allowed to decrease the dynamic coefficient in the whole range of lifted loads masses. A twofold reduction of the dynamic component was obtained when lifting near-nominal loads. The accuracy of characteristic number determination was 1.3%.

Discussion and conclusion. It is demonstrated that the developed algorithm of load capacity limitation allowed not only to increase crane security, but also to reduce the loading on the crane, in comparison with the standard safety system. The accuracy of operating parameters determination in conditions of real technological process satisfies the requirements of normative documentation. Thus, the possibility of duplicating or replacing some functions of the standard safety system by using the developed device is shown.

KEYWORDS: overhead crane, lifting mechanism, safety device, load capacity limiter, parameters recorder, overload protection, crane runtime

The article was submitted: 05.11.2024 approved after reviewing: 21.11.2024; accepted for publication: 16.12.2024.

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

© Nazarov A.N., Ivanov S.D., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Большинство отечественных кранов мостового типа оснащаются комплексными приборами безопасности, выполняющими функции ограничения грузоподъемности и регистрации параметров. Согласно ФНП¹ ограничитель грузоподъемности должен предотвратить отрыв груза от основания, на 25% превышающий номинальный, и позволить беспрепятственно поднимать номинальный груз. Применительно к задаче регистрации параметров текущий технический уровень современных серийно выпускаемых приборов² позволяет собирать и обрабатывать информацию, необходимую для расчета остаточного ресурса крана в целом (характеристическое число, количество рабочих циклов, масса груза в каждом из циклов) и анализа аварийных ситуаций (фиксация состояния исполнительного реле ОГП)³ [1, 2]. Следует отметить, что с 2015 г. ГОСТ 33713–2015⁴ ввел требование к точности регистрируемых данных – допустимая ошибка, при которой не требуется переналадка прибора, составляет 3%.

Проведенные ранее экспериментальные исследования⁵ [3, 4] приборов серии ОГШ-2 (мостовой кран с релейно-контакторной и частотной системой управления г/п 2 т, установленный в лаборатории кафедры РК4 МГТУ им. Н.Э. Баумана) и ОНК-160М (козловой контейнерный кран г/п 45 т ПАО «ТрансКонтейнер») позволили выявить ряд недостатков наиболее распространенных приборов безопасности:

1. Производителями приборов безопасности недостаточно проработан вопрос подбора технических характеристик измерительной и обрабатывающей аппаратуры. Так, в частности, неправильный подбор частоты опроса

и разрешения аналого-цифрового преобразователя тензодатчика нагрузки является причиной отсутствия срабатывания ОГП при достижении нагрузки порога безусловного запрета и существенного разброса момента подачи команды на предварительный останов при достижении нагрузки промежуточного порога срабатывания⁶.

2. Отсутствует методика настройки параметров алгоритма ОГП, вследствие чего наладчиками приборов безопасности сохраняются заводские настройки – у части кранов, характеризующихся относительно высокой жесткостью канатного подвеса и металлоконструкции и продолжительным временем отклика системы управления и механизма на команду остановки, сохраняется возможность отрыва от основания груза, превышающего номинальный на 25%.

3. Применительно к задаче регистрации параметров основную составляющую ошибки при измерении массы груза вносят два фактора: ошибка нормировки и неучет динамической составляющей нагрузки. Согласно информации, предоставленной разработчиками РП, массой груза принимается максимальное секундное осреднение нагрузки:

$$m_i = \max \left(\frac{1}{f_{\text{опроса}}} \sum_{j=t_{\text{опроса}} f_{\text{опроса}}}^{(j+1)t_{\text{опроса}} f_{\text{опроса}}} Q_j \right), \quad (1) \\ j = 1, 2, \dots, t_{\text{ц}},$$

где $f_{\text{опроса}}$ – частота опроса датчика нагрузки, Гц; $t_{\text{опроса}}$ – период опроса датчика нагрузки, с; Q_j – показание датчика нагрузки при j -м опросе; $t_{\text{ц}}$ – время рабочего цикла, с.

4. К другим экспериментально зафиксированным факторам, приводящим к потере

¹ Приказ Ростехнадзора от 26.11.2020 № 461 (ред. от 22.01.2024) «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» (Зарегистрировано в Минюсте России 30.12.2020 № 61983).

² Пестич С.Д. Обзор регистраторов параметров кранового оборудования при строительстве для предотвращения аварийных ситуаций // International scientific review of the problems and prospects of modern science and education: Collection of scientific articles LVI International correspondence scientific and practical conference, Boston, USA, 24–25 марта 2019 года. Boston, USA: PROBLEMS OF SCIENCE, 2019. С. 16–18. EDNZBVTWX.

³ Михальчик Н.Л. Построение весоизмерительной системы путем расширения функционала электронного регистратора параметров работы мостового крана // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 90-летию кафедры подъемно-транспортных машин и роботов (Екатеринбург, 6 декабря 2019 г.). Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2020. С. 169–171.

⁴ ГОСТ 33713–2015 Краны грузоподъемные. Регистраторы параметров работы. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2016. 19 с.

⁵ Nazarov A., Ivanov S., Yilmaz M. Configuring the algorithm of the load limiter with intermediate threshold // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 515. P. 02015. DOI 10.1051/e3sconf/202451502015. EDN NGQCHM.

⁶ Nazarov A., Ivanov S. Experimental and theoretical determination of the load cell polling frequency to protect the crane hoisting mechanism from overloads // AIP Conference Proceedings. 2023. 2697 (1): 030008. <https://doi.org/10.1063/5.0111939>

регистрируемых данных, относятся сбои программного обеспечения, отказ прибора и ошибка фиксации начала/конца цикла (склеивание нескольких циклов нагружения крана в один, если межоперационное время менее 5 сек).

Решение задачи совершенствования приборов безопасности видится актуальным не только с точки зрения повышения защищенности отечественных кранов, но и для сохранения возможности эксплуатации зарубежных^{7,8,9}, оснащенных системами безопасности и находящихся вне системы мониторинга и обслуживания со стороны производителей¹⁰ [5, 6]. В противовес отечественному подходу, при котором за каждую функцию безопасности отвечает отдельный прибор или устройство безопасности, изолирующие информационный поток внутри себя, система безопасности позволяет создать общее информационное поле крана, обеспечивая доступ алгоритмов безопасности сразу ко всему оснащению датчика.

Проектирование конструкции крана, его механизмов и узлов с учетом работы системы безопасности в совокупности с анализом статистики по отказам в зависимости от наработки позволило перейти от задачи оценки остаточного ресурса крана в целом к прогнозированию времени безотказной работы отдельных механизмов и их узлов. В совокупности с предоставлением доступа к параметрам работы крана в реальном времени эксплуатирующая организация переходит от системы планово-предупредительных ремонтов к экономически более выгодной системе с плавающими межсервисными интервалами, основанными на фактической интенсивности

эксплуатации. Техничко-экономическая оценка такого подхода дана в работах [7, 8] Н.Ю. Ивановой¹¹.

В основе определения остаточного ресурса крана и его механизмов при использовании систем безопасности стоит анализ режимов управления, реализуемых в реальных условиях эксплуатации. Ярким примером служит трехкратная разница при расчете выработки ресурса механизма подъема между остановкой по команде оператора и при срабатывании ОГП [9, 10]. Реализовать такой подход стало возможным за счет перенятия системами безопасности части функций по управлению приводами крана, алгоритмически обеспечив их безопасность (алгоритмы пуска механизма, отрыва груза от основания, уменьшения раскачки груза и др.) [11, 12]. Алгоритмизация работы приводов, оставившая за оператором крана только функцию целеуказания, с одной стороны, приближает способ управления к оптимальному, а с другой стороны, уменьшает количество вариантов развития динамических процессов, что позволило на практике учесть динамические составляющие нагрузок при расчете ресурса элементов крана.

Таким образом, отечественная методика расчета остаточного ресурса, учитывающая только массы поднимаемых грузов и количество рабочих циклов, оказывается неприменимой для современных зарубежных кранов (KoneCranes с системами ControlPro и True Connect, Liebherr с системой LiDAT и др.) и отечественных, но оснащенных импортными приводами (Siemens, Mitsubishi, Nethix) и спроектированных с учетом работы предустанов-

⁷ Ильин Е.И., Сильванович В.К. Особенности технической эксплуатации грузоподъемных кранов в современных условиях // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта: сборник статей V Всероссийской научно-практической конференции, Екатеринбург, 15 декабря 2023 года. Екатеринбург: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2024. С. 138–142. EDN WNMQKD.

⁸ Дианов Х.А., Джафаров С.Г. Анализ эксплуатации мостовых кранов // Транспортное строительство: сборник статей III Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 12–13 апреля 2022 года. М.: Издательство «Перо», 2022. С. 149–157. EDN UXSLCD.

⁹ Akhtulov A.L., Akhtulov M.O. Kirasirov, O.M. Kirasirov Methods to ensure durability and improvement of reliability of bridge cranes of General purpose during their operation // JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies, Krasnoyarsk, 04 марта 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 1515. Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. P. 22083. DOI 10.1088/1742-6596/1515/2/022083. EDNZQBZTN.

¹⁰ Орлов Д.Ю. Автоматические системы обеспечения безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов: учебное пособие. Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. 76 с. ISBN 978-5-93057-958-1. EDN FQYFJQ.

¹¹ Иванова Н.Ю., Надеженков С.А., Иванов С.Д. Внедрение корпоративных информационно-управляющих систем обеспечения безопасной эксплуатации оборудования как тенденция развития предприятий грузопереработки // Устойчивое развитие и новая индустриализация: наука, экономика, образование: материалы конференции, Москва, 18 июня 2021 года. М.: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2021. С. 237–242. EDN SFVUXU.

ленных систем безопасности. Переоснащение таких кранов в условиях отсутствия доступа к обслуживанию производителем на отечественные приборы безопасности приведет к реализации иных динамических процессов, чем те, которые были заложены при проектировании и задании нормативных значений ресурса, и непрогнозируемому изменению темпа его истощения. Это подчеркивает актуальность развития обозначенного направления в подъемно-транспортной технике и диктует необходимость ускоренного создания приборов безопасности нового поколения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках работ по совершенствованию технических средств обеспечения безопасности был разработан опытный образец перспективного прибора безопасности кранов мостового типа (Прибор) (рисунок 1). Датчиковое оснащение Прибора включает:

1. Датчик нагрузки. Предназначен для измерения усилия в системе полиспаста. Применен тензометрический накладной датчик модели ДНК-2 производства ООО «ИТЦ «КРОС», устанавливаемый в каждую холостую ветвь канатного подвеса.

2. Датчик параметров электрической сети. Предназначен для измерения активной мощности, напряжения и частоты сети. Прибор оснащен датчиком модели SPM 93 производства Alpha Automation.

3. Датчик скорости. Предназначен для получения информации о перемещении, скорости и ускорении электродвигателя механизма подъема и деформации канатного подвеса. Использован инкрементальный энкодер LDP 3806.

Для обработки сигнала тензометрических датчиков использован разработанный ООО «ИТЦ «КРОС» (с учетом требований к характеристикам источников первичной информации, предъявленных в работах¹²) преобразователь тензокодовый ПТК-2(7.0.4). Использование АЦП AD7705BRZ-REEL позволило реализовать возможность одновременного оцифровывания сигналов двух датчиков с разрешением 16 бит и частотой опроса 500 Гц.

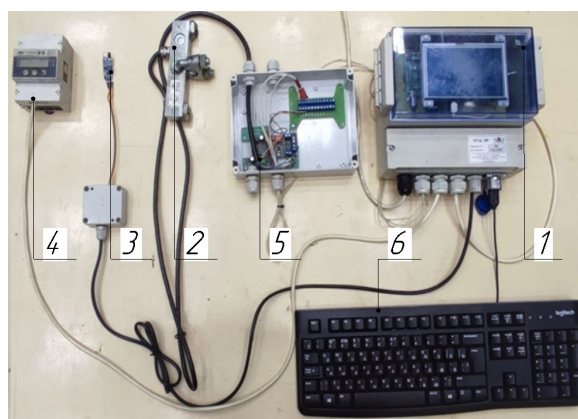


Рисунок 1 – Общий вид прибора:

- 1 – микропроцессорный блок;
 - 2 – накладной датчик усилия ДНК-2;
 - 3 – датчик скорости LDP 3806;
 - 4 – датчик параметров электрической сети SPM93;
 - 5 – плата аналого-цифрового преобразователя ПТК-2(7.0.2);
 - 6 – нормировочное оборудование
- Источник: составлено авторами.

Figure 1 – General view of the Device.

- 1 – microprocessor unit; 2 – force sensor DNK-2;
- 3 – speed sensor LDP 3806;
- 4 – sensor of electrical parameters SPM93;
- 5 – analog-to-digital converter board PTC-2(7.0.2);
- 6 – auxiliary equipment

Source: compiled by the authors.

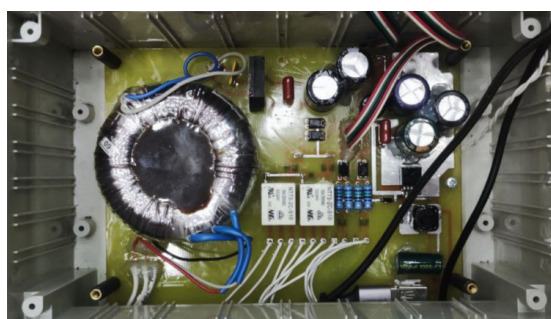
Разработанная плата ввода-вывода (рисунок 2) выполняет следующие функции:

1) преобразование питающего нестабилизированного напряжения крана 380 В в стабилизированное 5 В для питания микропроцессора и 24 В для управления исполнительными реле;

2) питание датчиков и согласование параметров их сигналов с допустимым уровнем напряжения и требуемого интерфейса на входе микропроцессора;

3) управление исполнительными реле, встраиваемыми в систему управления крана и обеспечивающими связь между алгоритмами безопасности, реализуемыми микропроцессором, и приводами крана.

¹² Nazarov A., Ivanov S. Experimental and theoretical determination of the load cell polling frequency to protect the crane hoisting mechanism from overloads // AIP Conference Proceedings. 2023. 2697 (1): 030008. <https://doi.org/10.1063/5.0111939>



a



b

Рисунок 2 – Плата ввода-вывода: а – силовая часть платы ввода-вывода; б – панель ввода-вывода
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – I/O board: a – power part of the I/O board; b – I/O panel
Source: compiled by the authors.

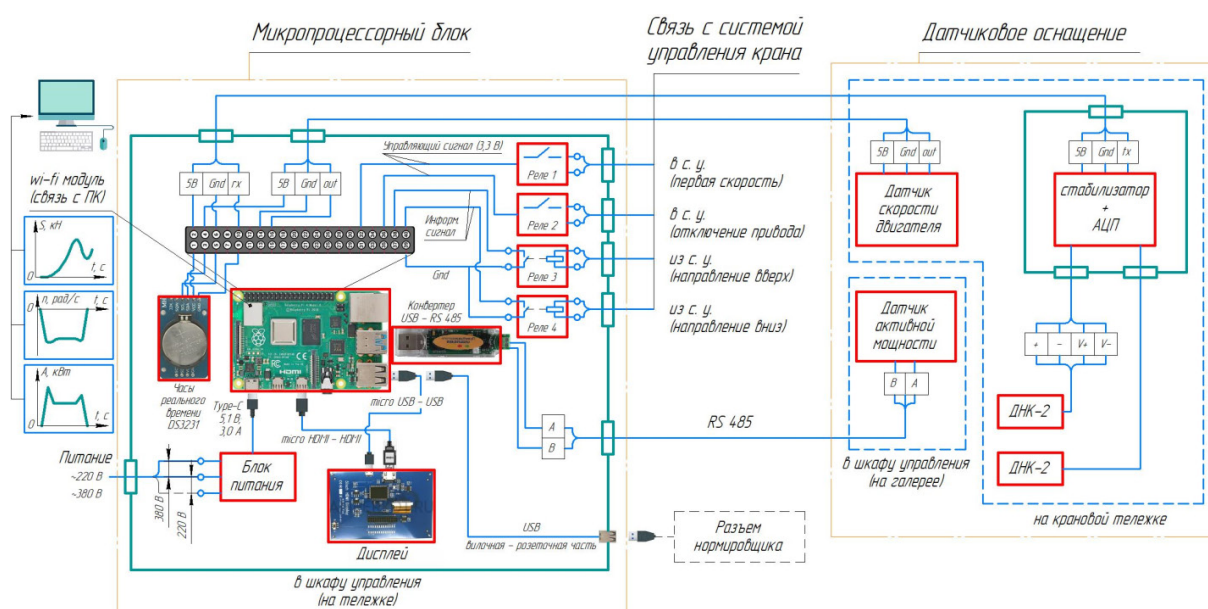


Рисунок 3 – Функциональная схема Прибора
Источник: составлено авторами.

Figure 3 –Device functional diagram
Source: compiled by the authors.

Микропроцессорный блок построен на базе одноплатного компьютера модели RaspberryPi 4 Model B, реализующего функции алгоритмической обработки сигналов датчиков, генерации команд управления приводом, считывания информации датчиков и передачи расчетных параметров.

Функциональная схема Прибора, иллюстрирующая взаимосвязь датчикового оснащения, микропроцессорного блока и нормировочного оборудования приведена на рисунке 3.

Прибор реализует следующие алгоритмы:

- 1) автоматизированной настройки параметров алгоритма ОГП;
- 2) ограничения грузоподъемности кранов с релейно-контакторной системой управления;
- 3) ограничения грузоподъемности кранов с частотной системой управления;
- 4) определения интенсивности работы крана в целом;
- 5) определения интенсивности работы механизмов.

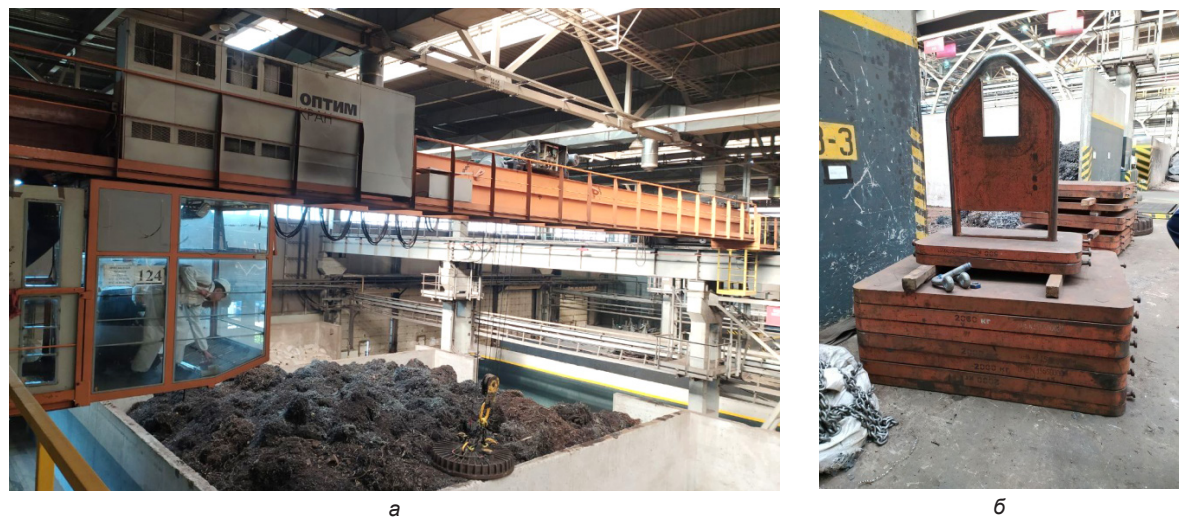


Рисунок 4 – Экспериментальная установка: а – мостовой кран 15 т; б – груз наборный 19 т
Источник: составлено авторами.

Figure 4 –experimental setup: а – overhead crane 15 t; б – set load 19 t
Source: compiled by the authors.

Таблица 1
Параметры экспериментальной установки (мостовой кран 15 т)
Источник: составлено авторами.

Table 1
Parameters of the experimental setup (overhead crane 15 t)
Source: compiled by the authors.

Грузоподъемность, т	$m_{гр}$, Т	Двигатель механизма подъема	$P_{дв}$, кВт	$n_{дв.хх}$, об/мин
5	8; 12; 15; 16,5; 19	MF13ZC200N 188F85063E-IP55	28	3000

$n_{дв.ном}$, об/мин	$v_{ном}$, м/мин	$v_{мин}$, м/мин	$a_{пол}$	c_m , Н/м
2880	20	3,3	2	$3,64 \cdot 10^6$

Экспериментальная установка

В рамках данного исследования оценивались эксплуатационные характеристики Прибора при работе с кранами, оснащенными частотной системой управления. Для проведения эксперимента использован мостовой кран ОПТИМ-Кран г/п 15 т (рисунок 4), установленный на АО «Тихвинской вагоностроительный завод». Параметры крана в целом и механизма подъема приведены в таблице 1.

Система управления механизмом подъема – частотная, обеспечивает две скорости работы привода в каждом направлении (диапазон регулирования – 6). Кран оснащен системой безопасности ControlPro от компании KoneCranes, реализующей функции защиты от перегрузки, определения режима работы

механизма подъема и крана в целом. Исполнительное реле контроллера, реализующего функцию ОГП, подает сигнал на аварийную остановку преобразователя частоты механизма подъема при достижении усилием в системе полиспаста, соответствующего 110% веса номинального груза. В этом случае остановка происходит не за счет плавного снижения частоты питания двигателя, а путем наложения тормоза.

Для сравнения эксплуатационных характеристик Прибора и штатной системы безопасности ControlPro Прибор реализует два режима: наблюдения (запись динамических параметров) и эксплуатации (запись динамических параметров + срабатывание исполнительных реле).

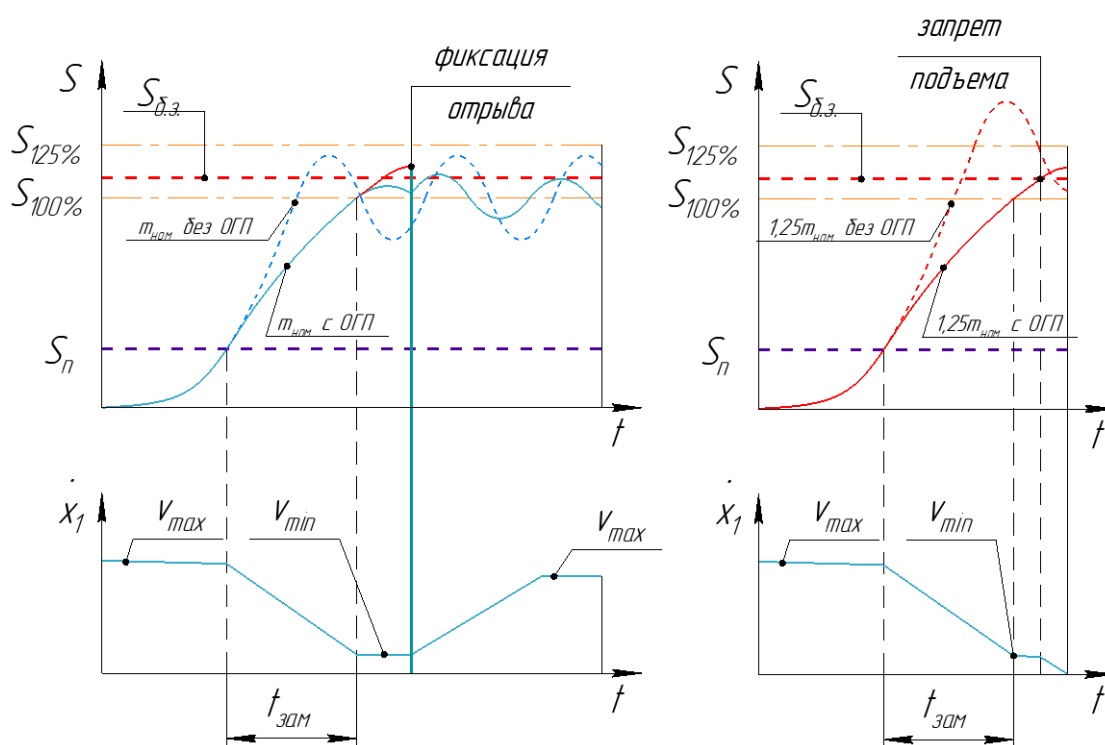


Рисунок 5 – Иллюстрация работы алгоритма ОГП при частотной системе управления, стадия отрыва груза от основания /запрета подъема:
 S – усилие в канатах; S_n – промежуточный порог; $S_{6.3}$ – порог безусловного запрета;
 $\dot{x}_1$ – скорость электродвигателя; V_{max} – повышенная скорость;
 V_{min} – пониженная скорость; $t_{зам}$ – время замедления
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – illustration of the load capacity limiter algorithm operation with frequency control system: stage of load detachment from the base / lifting prohibition.

S – force in ropes; S_n – intermediate threshold; $S_{6.3}$ – threshold of unconditional prohibition;
 $\dot{x}_1$ – motor speed; V_{max} – increased speed;
 V_{min} – reduced speed; $t_{зам}$ – deceleration time
 Source: compiled by the authors.

Описание алгоритма ограничения грузоподъемности

Алгоритм ОГП при частотной системе управления, реализуемый Прибором, заключается в том, что при достижении усилием в канатах промежуточного порога подается команда на запрет повышенной скорости. При этом происходит плавное снижение скорости до минимально допустимой. Переходный процесс заканчивается к моменту отрыва от основания номинального груза.

В случае если фиксируется отрыв груза от основания, запрет подъема на повышенной скорости снимается. Если же нагрузка достигает порога безусловного запрета, подается

команда на размыкание цепи на подъем (рисунок 5).

Для фиксации отрыва груза от основания сопоставляется информация датчиков усилия в канатном подвесе и скорости электродвигателя. Текущие значения усилия и деформации, вычисленной интегрированием информации датчика скорости, сравниваем с экспериментальной характеристикой, полученной на этапе работы механизма подъема до отрыва груза от основания (рисунок 6). Характеристика усилия в канатах от их деформации описывается нелинейной функцией, на способ определения параметров, которой ранее получен патент¹³.

¹³ Патент № 2803775 С1 Российская Федерация, МПК G01M 5/00. Способ экспериментального определения жесткости канатного подвеса для кранов мостового типа: № 2022135212: заявл. 29.12.2022: опубл. 19.09.2023 / А.Н. Назаров, С.Д. Иванов, В.А. Потапов; заявитель Закрытое акционерное общество «Инженерно-технический центр «КРОС». EDN ZNOAHV.

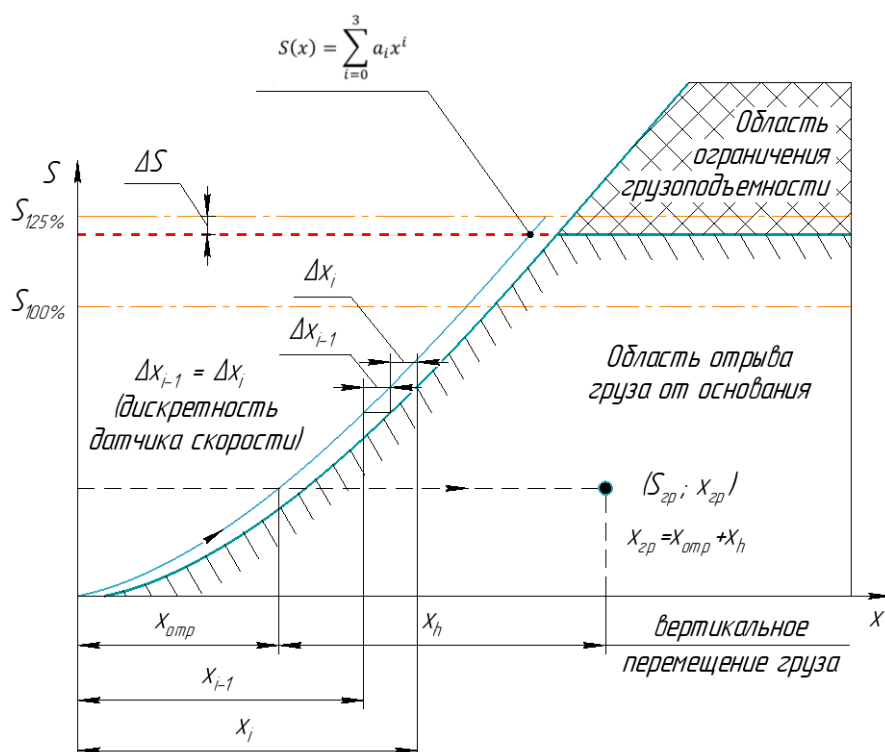


Рисунок 6 – Фиксация отрыва груза от основания:

ΔS – шаг дискретизации усилия в канатах; Δx – дискретность инкрементального энкодера;
 $x_{отр}, S_{отр}$ – деформация каната и усилие в нем в момент отрыва груза от основания;
 $x_{гр}, S_{гр}$ – текущие значения деформации канатов и усилия в них; x_h – перемещение центра масс груза;
 $S(x)$ – характеристика усилия в канатах от их деформации; a_i – i -й коэффициент полинома, аппроксимирующего экспериментальную зависимость $S(x)$
 Источник: составлено авторами.

Figure 6 – detection of the load detachment from the base.

ΔS – sampling step of the force in the ropes; Δx – incremental encoder sampling;
 $x_{отр}, S_{отр}$ – rope deformation and force in it at the moment of load detachment from the base;
 $x_{гр}, S_{гр}$ – current values of rope deformation and force in it; x_h – load center of mass displacement;
 $S(x)$ – characteristic of the force in the ropes due to their deformation; a_i – i -th coefficient of the polynomial approximating the experimental function $S(x)$
 Source: compiled by the authors.

Критерием отрыва является нахождение точки текущих измерений с координатой ($x_{отр}$; $S_{отр}$) в область справа (см. рисунок 6) от характеристики $S(x)$. Условие отрыва груза от основания:

$$S_{гр} < S(x_{гр} - \Delta x) - \Delta S. \quad (2)$$

Для реализации описанного алгоритма исполнительное реле Прибора REL1 подключаем в участок цепи управления, связывающий орган управления и контроллер системы безопасности, последовательно с контактом включения механизма подъема на подъем, а реле REL2 последовательно с контактом повышенной скорости. Такая схема подключения обеспечивает выполнение команд Прибора приводом механизма подъема крана без отключения штатной системы безопасности.

Описание алгоритма определения интенсивности работы крана

Первый этап – определение границ рабочего цикла. Признаком границы цикла является преодоление нагрузкой порога, значение которого согласно рекомендации ГОСТ 33713–2015 составляет 5%. На практике пороги разносят (начала цикла – 6%, конца – 4%), чтобы избежать многократной ложной фиксации одного и того же цикла при подъеме груза, близкого по массе к значению порога, вследствие действия колебательной динамической составляющей нагрузки.

Второй этап – выделение пригодного для весоизмерения участка динамического процесса. В данном алгоритме применена функция контроля установившегося движения.

Второй способ основан на прямом измерении периода колебаний путем вычислений времени между последовательными экстремумами усилия в канатном подвесе:

$$L_{buf}^2 = \frac{2}{W} \cdot \sum_i^W |t_{\max}^i - t_{\min}^i|, \quad (5)$$

где L_{buf}^2 – длина окна сглаживания, определенная экспериментально, с; $t_{\max}^i$ – время максимума i -й полуволны, с; $t_{\min}^i$ – время минимума i -й полуволны, с; W – опорное количество полуволн при определении длины окна сглаживания.

Масса груза вычисляется как непосредственное осреднение данных, сглаженных фильтром скользящего среднего:

$$\bar{S} = \frac{1}{n-K} \sum_{j=0}^{n-K} \bar{S}_{buf\ j}, \quad (6)$$

где n – общее количество опросов датчика на грузки.

$$\bar{S}_{buf\ j} = \frac{1}{K} \sum_{i=0}^K S_i, \quad (7)$$

$$K = L_{buf} \cdot f_{\text{опроса}}. \quad (8)$$

Ошибка весоизмерения определяется по формуле

$$\sigma_{\bar{S}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S}(n))^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (9)$$

где $\sigma_{\bar{S}}$ – среднее квадратическое отклонение.

Данный этап продолжается до момента окончания цикла даже после достижения требуемого уровня точности. Так как продолжительность динамического процесса и его характер во время эксплуатации произвольны, каждому измерению массы груза будет соответствовать своя ошибка. Поэтому повышенный уровень точности в циклах, динамический процесс которых к этому располагает, будет компенсировать низкую точность в циклах с недостаточной продолжительностью пригодного для весоизмерения динамического процесса при расчете интенсивности работы крана.

Четвертый этап – перерасчет показателей интенсивности работы с учетом последних полученных данных.

С учетом точности весоизмерения рассчитывается оценка характеристического числа:

$$N_{t-1}^{\max} = N_{t-1}^{\max} + \left(\frac{\bar{S} \pm 3 \cdot \sigma_{\bar{S}}}{9,81 \cdot m_{\text{ном}}} \right)^3, \quad (10)$$

где $N_{t-1}^{\max}$ – предыдущее значение максималь-

ной/минимальной оценки характеристического числа; t – номер текущего цикла работы крана; и коэффициента распределения нагрузок:

$$k_p^{\frac{\max}{\min}} = \frac{N_{t-1}^{\max}}{c_{t-1} + 1}, \quad (11)$$

где $k_p^{\frac{\max}{\min}}$ – максимальная/минимальная оценка коэффициента распределения нагрузок; c_t – общее число циклов работы крана.

Объем испытаний

В части ограничения грузоподъемности эксплуатационные характеристики Прибора сравнивались со штатной системой безопасности крана ControlPro (KoneCranes) путем сопоставления коэффициентов динамичности при подъеме с подхватом номинального груза (15 т) и груза, запрещенного для отрыва от основания (19 т – на 27% превышает номинальный), а также груза массой 16,5 т – 110% от номинального.

Для накопления информации об интенсивности работы крана было проведено 3 серии подъемов контрольных грузов различной массы (8, 12 и 15 т). Для достижения условий реального технологического процесса каждая серия выполнялась крановщиком привычными для него приемами управления и включала следующие характерные для обслуживаемого технологического процесса циклы работы крана:

- подъем, опускание без паузы;
- подъем, пауза, опускание;
- кратковременный отрыв груза от основания, опускание;
- подъем, опускание без паузы (пониженная скорость);
- подъем и опускание при передвижении тележки;
- подъем и опускание при передвижении моста;
- подъем и опускание при одновременном передвижении тележки и моста.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На этапе настройки Прибора получены следующие значения порогов срабатывания: промежуточный порог – 13%; порог безусловного запрета – 119%.

На рисунке 8 приведены динамические процессы при попытке подъема груза 19 т ($127\% m_{\text{ном}}$). В случае работы Прибора величина статической нагрузки составила $117\% Q_{\text{ном}}$, что является признаком того, что груз от основания не оторван. При этом максимальная динамическая нагрузка не превысила $125\% Q_{\text{ном}}$.

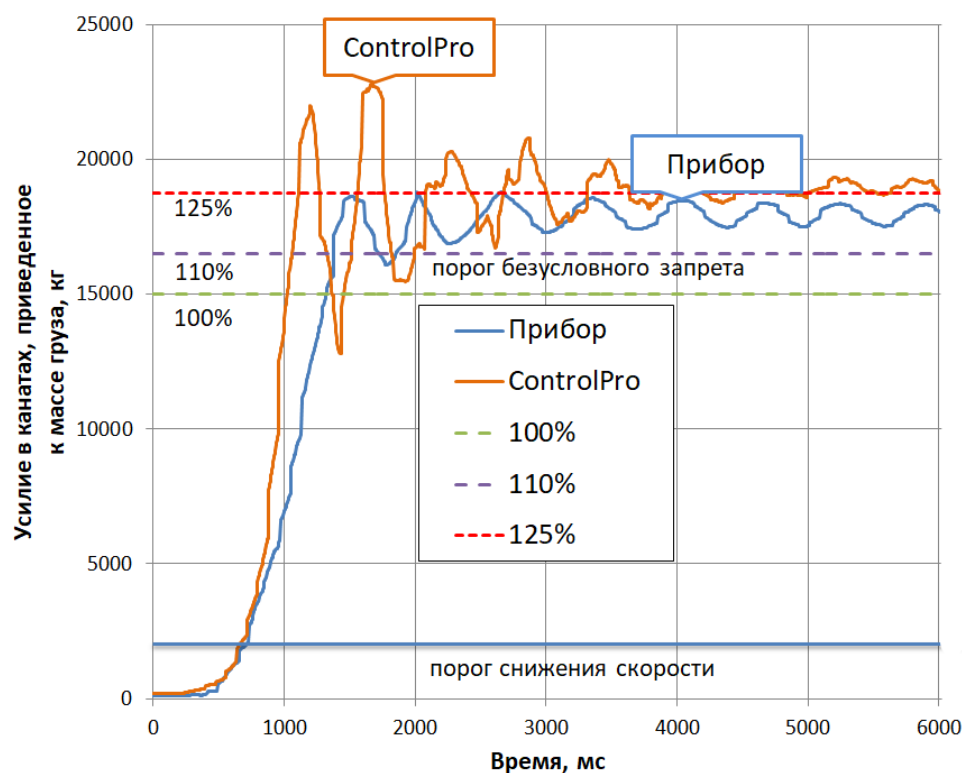


Рисунок 8 – Динамический процесс при попытке подъема запрещенного груза ($127\% m_{\text{ном}} = 19 \text{ т}$)
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Dynamic process during the attempt to lift a load of prohibited mass ($127\% m_{\text{ном}} = 19 \text{ tons}$)
Source: compiled by the authors.

В случае же работы штатной системы безопасности (ControlPro), основанной на применении алгоритма с одним порогом срабатывания, статическая составляющая нагрузки составила $127\% Q_{\text{ном}}$ – груз оторван от основания. При этом максимальная нагрузка достигла значения $153\% Q_{\text{ном}}$.

При анализе динамического процесса подъема номинального груза в случае штатной системы безопасности выявлена особенность алгоритма, препятствующая выполнению условия неотрыва от основания груза запрещенной массы. Несмотря на то, что динамическая нагрузка на 43% превысила порог безусловного запрета подъема (в случае Control Pro $S_{\text{б.з.}} = 110\% Q_{\text{ном}}$), применение фильтра аналогового сигнала датчика нагрузки, допускающего выход за пределы порога на 200 мс – период главной гармоники при подъеме номинального груза, не позволило своев-

ременно отключить привод подъема. Именно эта задержка, как показано экспериментально, является причиной отрыва от основания груза массой $125\% m_{\text{ном}}$ и более даже в случае аварийного отключения привода. Данная особенность работы системы безопасности ControlPro не позволяет выполнить требования безопасности на основе применения алгоритма ОГП с одним порогом срабатывания (безусловного запрета). В то же время экспериментально показано, что на основе адаптированного для кранов с частотной системой управления алгоритма ОГП с промежуточным порогом возможно обеспечить надежную защиту от перегрузки.

При подъеме груза номинальной массы (рисунок 9) разница пиковых нагрузок составила 7% : $114\% Q_{\text{ном}}$ (ControlPro) и $107\% Q_{\text{ном}}$ (Прибор).

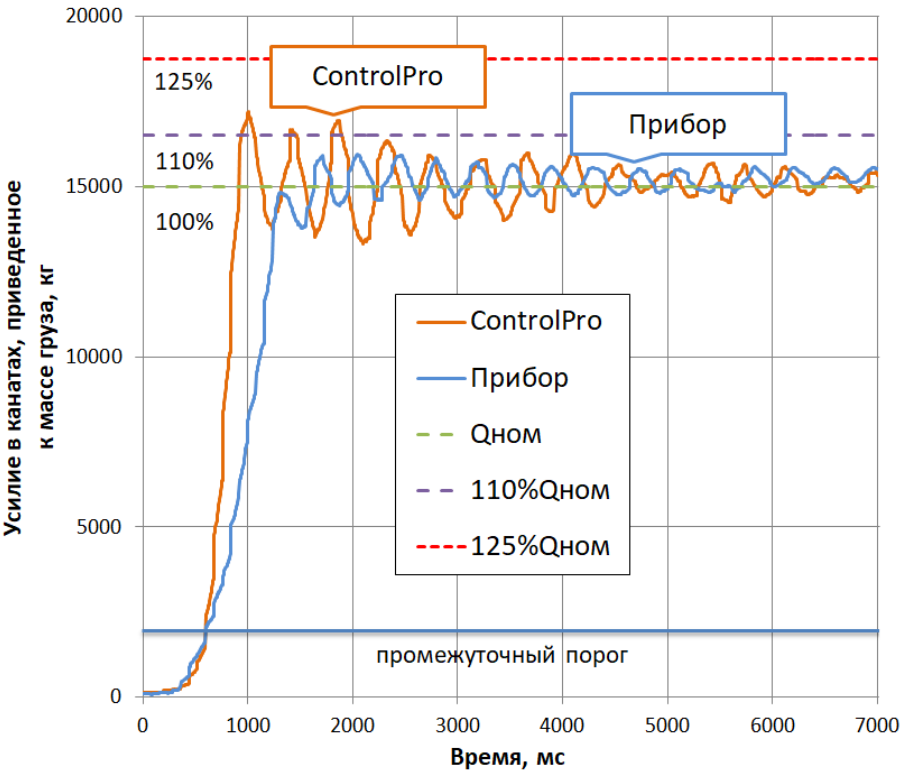


Рисунок 9 – Динамический процесс при подъеме номинального груза ($m_{nom} = 15\text{ t}$)
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Dynamic process during the lifting of nominal load ($m_{nom} = 15\text{ tons}$)
Source: compiled by the authors.

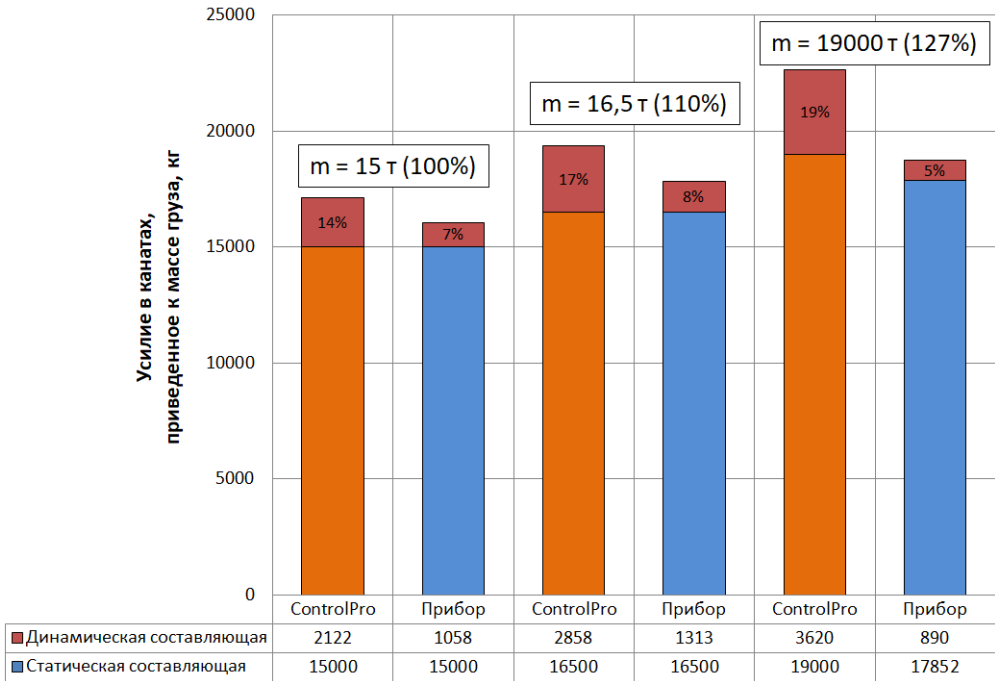


Рисунок 10 – Динамические характеристики при подъеме околономинальных грузов
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Dynamic characteristics of near-nominal loads lifting
Source: compiled by the authors.

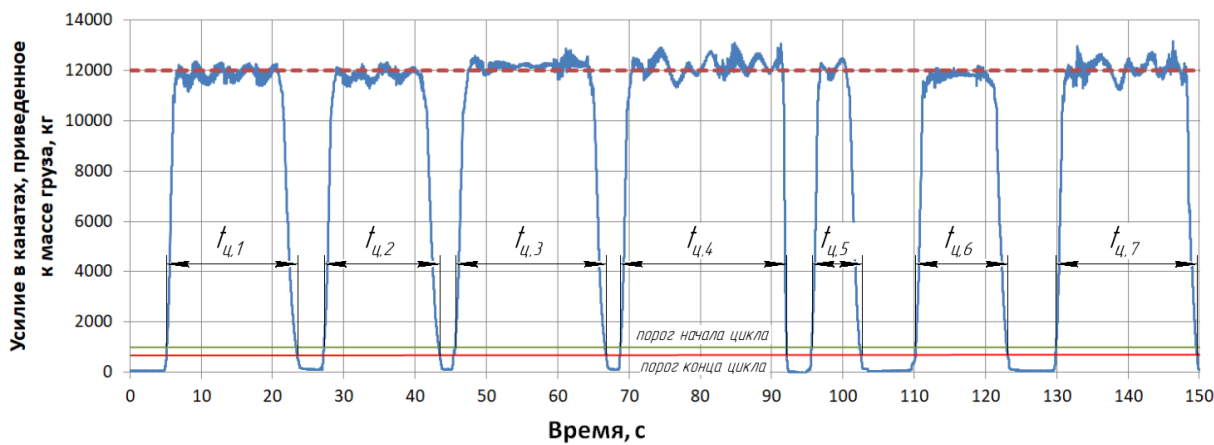


Рисунок 11 – Динамический процесс при работе крана с грузом 12 т
Источник: составлено авторами.

Figure 11 – Dynamic process during crane operation with a load of 12 tons
Source: compiled by the authors.

Оценка снижения динамической составляющей в случае применения алгоритма с промежуточным порогом проиллюстрирована на рисунке 10. Наибольший результат (снижение динамической составляющей в 2 раза) достигается в области околономинальных грузов, так как к моменту перехода на послеотрывный этап движения скорость успевает опуститься до минимального значения. Однако чем меньше масса груза, тем меньше успевает снизиться скорость к моменту отрыва, и снижение динамической нагрузки сокращается. Разница

в динамических характеристиках пропадает вовсе при подъеме грузов, вес которых не превышает значения промежуточного порога (в данном случае $13\% Q_{ном}$). На рисунке 11 приведен пример серии подъемов контрольного груза, имитирующей реальные условия эксплуатации. На основании данных, полученных посредством работы алгоритма весоизмерения, рассчитаны коэффициенты распределения нагрузки и характеристические числа для каждой серии подъемов (таблицы 2, 3, 4).

Таблица 2
Обработка данных регистратора параметров для серии 8 т
Источник: составлено авторами.

Table 2
Parameters recorder data processing for the 8 tons series
Source: compiled by the authors.

№	$m_{гр}^{изм}$, кг	$\Delta m_{гр}^{изм}$, кг	k_p^{max}/k_p^{min}	N_k^{min}/N_k^{max}	$N_k^{изм}/\Delta N_k^{ср}$
1	7907±157	-93	0,115/0,138	1,004/1,147 ($N_k^\Phi = 1,062$)	1,074/1,2%
2	8060±154	+60	0,164/0,146		
3	7906±194	-94	0,157/0,136		
4	8109±215	+109	0,171/0,146		
5	8190±129	+190	0,171/0,155		
6	7817±196	-183	0,152/0,131		
7	8207±217	+207	0,176/0,152		

Таблица 3
Обработка данных регистратора параметров для серии 12 т
Источник: составлено авторами.

Table 3
Parameters recorder data processing for the 12 tons series
Source: compiled by the authors.

№	$m_{гр}^{изм}$, кг	$\Delta m_{гр}^{изм}$, кг	k_p^{max}/k_p^{min}	N_K^{min}/N_K^{max}	$N_K^{изм}/\Delta N_K^{ср}$
1	11879±246	-121	0,528/0,466	3,393/3,829 ($N_K^\Phi = 3,584$)	3,607/0,6%
2	11815±214	-185	0,516/0,463		
3	12170±204	+170	0,561/0,508		
4	12181±288	+181	0,574/0,498		
5	12027±278	+27	0,552/0,481		
6	11958±194	-42	0,532/0,482		
7	12135±269	+135	0,565/0,495		

Таблица 4
Обработка данных регистратора параметров для серии 15 т
Источник: составлено авторами.

Table 4
Parameters recorder data processing for the 15 tons series
Source: compiled by the authors.

№	$m_{гр}^{изм}$, кг	$\Delta m_{гр}^{изм}$, кг	k_p^{max}/k_p^{min}	N_K^{min}/N_K^{max}	$N_K^{изм}/\Delta N_K^{ср}$
1	14940±227	-60	1,034/0,944	7,499/6,749 ($N_K^\Phi = 7,000$)	7,117/1,7%
2	15312±332	+312	1,113/0,996		
3	15073±221	+73	1,060/0,971		
4	15123±305	+123	1,088/0,964		
5	15156±189	+156	1,071/0,993		
6	14919±196	-81	1,023/0,946		
7	15051±379	+51	1,088/0,936		

Проведенный эксперимент показал, что ошибка определения масс грузов равномерно распределена относительно средних значений, соответствующих массам контрольных грузов, что свидетельствует об отсутствии влияния на весоизмерение динамических нагрузок. Суммарное характеристическое число, рассчитанное за три серии экспериментов, составило 11,798 при фактическом значении 11,696. Таким образом, ошибка определения интенсивности работы крана, выраженная в выработке характеристического числа за рассматриваемый промежуток времени, составила 1,3%.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модернизация зарубежных кранов на основе существующих отечественных приборов безопасности изменяет динамические характеристики, что вносит искажение в расчет оста-

точного ресурса. Поэтому план модернизации должен включать исследование алгоритмов работы штатной системы безопасности и подбор такого аналога, который бы не приводил к реализации режимов управления, при которых динамические нагрузки увеличиваются.

Установлено, что для замены штатных систем управления ряда кранов эксплуатационные характеристики отечественных приборов безопасности являются недостаточными. Этот факт определил разработку нового поколения приборов, основными особенностями которых является обоснованный подбор датчикового и обрабатывающего оборудования и применение более совершенных алгоритмов, повышающих надежность ограничения грузоподъемности при снижении динамических нагрузок и позволяющих определять интенсивность работы крана с требуемой точностью нормативно-технической документацией.

Применение для кранов с частотной системой управления алгоритма ОГП с промежуточным порогом срабатывания, позволяющим полно использовать возможности регулирования скорости, позволило повысить защищенность крана от перегрузки в сравнении с базовым алгоритмом Kone Cranes с одним порогом безусловного запрета. Снижение динамической нагрузки наблюдалось в большей части диапазона масс поднимаемых грузов. При этом наибольший эффект достигнут в зоне околономинальных грузов (снижение динамической составляющей в два раза).

Кроме того, наряду со снижением негативного влияния динамических нагрузок, положительный эффект от применения разработанного алгоритма ОГП заключается в рациональном расходовании ресурса элементов механизма подъема, так как каждый цикл (согласно эксплуатационной документации KoneCranes), в котором остановка произошла по сигналу ОГП (остановка за счет тормоза), эквивалентен трем циклам с тем же грузом, в котором остановка произошла по команде оператора (снижением частоты питания электродвигателя).

Применение алгоритма весоизмерения, использующего фильтр скользящего среднего и функцию контроля установившегося движения, позволило достичь точности определения параметров интенсивности работы крана (массы груза в цикле, количестве циклов, коэффициента распределения нагрузки и характеристического числа), достаточной для удовлетворения требований по ГОСТ 33713–2015. При этом методика проверки имитировала реальные условия эксплуатации: совместная работа механизмов подъема и передвижения, отсутствие участков установившегося движения, повторно-кратковременный режим включения привода подъема. Экстраполируя результаты эксперимента на весь срок службы крана (25 лет), получим ошибку определения остаточного ресурса крана 153 дня (5 месяцев).

Перспектива развития направления обеспечения безопасности ПТМ заключается в повышении датчиковой оснащенности комплексных приборов безопасности с целью получения возможности определения интенсивности работы и ресурса не только крана, но и его механизмов, а также разработке алгоритмов, позволяющих повысить эксплуатационные характеристики приборов путем большей их адаптированности к динамическим параметрам конкретного крана.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Потапов В.А., Роцин В.А., Агейчева М.М. Расшифровка исходных данных регистратора параметров работы грузоподъемного крана для уменьшения аварийности и травматизма при работе грузоподъемных машин // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2024. № 1. С. 14–25. EDN CCQRCH.
2. Сытник А.С. Предиктивная аналитика сервиса технических объектов // Вестник НЦБЖД. 2021. № 1(47). С. 159–170. EDN SJJTVP.
3. Назаров А.Н., Иванов С.Д. Исследование влияния работы ограничителя грузоподъемности с промежуточными порогами на безопасность кранов мостового типа // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2023. № 1. С. 41–52. EDN SZRVVB.
4. Михалев А.В., Михалев А.В. Применение алгоритма скользящего среднего для задачи определения массы груза // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2023. № 2. С. 44–57. EDN XLXJRI.
5. Воронков И.Е., Овинкин Н.В. Мировой опыт и перспективы разработки схем механизации строительства атомных электростанций // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 11. С. 1584–1596. DOI 10.22227/1997-0935.2020.11.1584-1596. EDN XSVPSV.
6. Цепов Н., Пономарев Д., Рожков Н. и др. Проблемы обеспечения безопасности при аренде и эксплуатации грузоподъемных кранов // ТехНадзор. 2015. № 11(108). С. 698–699. EDN XHBFXP.
7. Иванова Н.Ю., Иванов С.Д., Надеженков С.А., Назаров А.Н. Объективная информация о работе подъемно-транспортных машин как основа повышения качества информационных систем грузообрабатывающих предприятий // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2023. № 2. С. 81–96. EDN MRGIFW.
8. Иванова Н.Ю., Иванов С.Д. Техничко-экономические показатели эффективности подъемно-транспортных работ // Механизация строительства. 2016. Т. 77, № 6. С. 15–21. EDN VZYBYJ.
9. Mustapää T. et al. Secure Exchange of Digital Metrological Data in a Smart Overhead Crane // Sensors. 2022. Т. 22. № 4. С. 1548.
10. Бутузов С.В. Технологические инновации на тихвинских вагоностроительных производствах // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2016. № 3(35). С. 42–46. EDN WGWNSN.
11. Li H. Intelligent control system of port turning line based on WITNESS software // Applied Mathematics and Nonlinear Sciences. 2024. Vol. 9, No. 1. DOI 10.2478/amns.2023.1.00374. EDN ITKWOO.
12. Петрова Е.Е., Ганнесен В.В. Анализ опыта автоматизации и роботизации операционных процессов контейнерного терминала // Научные проблемы водного транспорта. 2024. № 78. С. 178–190. DOI 10.37890/jwt.vi78.439. EDN SWMYMJ.
13. Ivanov S.D., Nazarov A.N., Mikhalechik N.L. Selection of a rational algorithm for data processing

of the weight measuring system of a hoisting crane // *Journal of Physics: Conference Series*, Belgorod, 09–10 March. 2021. Vol. 1926. Belgorod: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012047. DOI 10.1088/1742-6596/1926/1/012047. EDN JIUUGG.

14. Tang X. et al. Battery incremental capacity curve extraction by a two-dimensional Luenberger – Gaussian-moving-average filter // *Applied Energy*. 2020. T. 280. C. 115895.

15. Shtayat A. et al. Application of noise-cancelling and smoothing techniques in road pavement vibration monitoring data // *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2024. T. 14. C. 110–119.

16. Назаров А.Н., Иванов С.Д. Использование алгоритма весоизмерения на основе фильтра скользящего среднего в регистраторе параметров работы мостового крана // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2023. Т. 20, № 4(92). С. 418–431. DOI 10.26518/2071-7296-2023-20-4-418-431. EDN CBIJMP.

REFERENCES

1. Potapov V.A., Roshchin V.A., Ageicheva M.M. Decoding of the initial data of the registrar of the parameters of the lifting crane to reduce accidents and injuries during the operation of lifting machines. *Machines and Plants: Design and Exploiting*. 2024; (1): 14–25. (In Russ.)

2. Sytnik A.S. Predictive analytics of service of technical objects. *Vestnik NTsBZhD*. 2021; (1): 159–170. (In Russ.)

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

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

5. Voronkov I.E., Ovinkin N.V. World experience and development prospects of mechanization scheme of nuclear power plants construction. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(11): 1584–1596. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1584–1596 (In Russ.)

6. Tsepov N., Ponomarev D., Rozhkov N. [et al. Problems of safety during the rental and operation of lifting cranes. *Technical supervision*. 2015; No 11(108): 698–699. (In Russ.) EDN XHBFXP.

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

8. Ivanova N.Yu., Ivanov S.D. Technical and economic indices of the efficiency of lifting-transport

operations. *Mechanization of construction*. 2016; Vol. 77, No. 6: 15–21. (In Russ.) EDN VZYBYJ.

9. Mustapää, Tuukka, et al. “Secure Exchange of Digital Metrological Data in a Smart Overhead Crane.” *Sensors* 22.4 (2022): 1548.

10. Butuzov S.V. Technological innovations at tikhvin freight car plants. *Railway Equipment journal*. 2016; 3(35): 42–46. (In Russ.) EDN WGWNSN.

11. Li H. Intelligent control system of port turning line based on WITNESS software. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. 2024; Vol. 9, No. 1. DOI 10.2478/amns.2023.1.00374. EDN ITKWO.

12. Petrova E.E., Gannesen V.V. Experience analysis of automation and robotization of the container terminal operation. *Russian Journal of Water Transport*. 2024; No. 78: 178–190. (In Russ.) DOI 10.37890/jwt.vi78.439. EDN SWMYMJ.

13. Ivanov S.D., Nazarov A.N., Mikhalev N.L. Selection of a rational algorithm for data processing of the weight measuring system of a hoisting crane. *Journal of Physics: Conference Series*. Belgorod, 09–10 March 2021. Vol. 1926. Belgorod: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012047. DOI 10.1088/1742-6596/1926/1/012047. EDN JIUUGG.

14. Tang, Xiaopeng, et al. Battery incremental capacity curve extraction by a two-dimensional Luenberger–Gaussian-moving-average filter. *Applied Energy*. 280 (2020): 115895.

15. Shtayat, Amir, et al. Application of noise-cancelling and smoothing techniques in road pavement vibration monitoring data. *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2024; 14: 110–119.

16. Nazarov A.N., Ivanov S.D. Use of weight measurement algorithm on the basis of moving average filter in the recorder of overhead crane operation parameters. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (4): 418–431. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-418-431>. EDN: CBIJMP

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Иванов С.Д. Вклад в общую работу заключается в постановке цели и задач исследования, организации проведения эксперимента, подготовке текста статьи.

Назаров А.Н. Вклад в общую работу заключается в разработке Прибора, проведении экспериментального исследования, подготовке текста статьи.

CO-AUTHORS' CONTRIBUTION

Ivanov S.D. Contribution to the overall work consists in setting the goal and objectives of the study, organization of the experiment, preparation of the article text.

Nazarov A.N. Contribution to the overall work consists in the development of the Device, experimental research, preparation of the article text.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Назаров Александр Николаевич – ассистент кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), инженер ООО «ИТЦ «КРОС» (141281, Московская область, г.о. Пушкинский, г. Ивантеевка, проезд Санаторный, д. 1/1Б).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8039-4331>.

SPIN-код: 2028-7651,

e-mail: alexnazavr@yandex.ru

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

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

SPIN-код: 8035-2780,

e-mail: ptm-diagnostics@yandex.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Nazarov Alexander N. – assistant of department “Lifting and transporting systems of Bauman Moscow State Technical University”, engineer (105005, Moscow, 2nd Baumanskaya str., 5, p. 1), Engineer, LLC “RDC ‘KROS’ (141281, Moscow Region, Pushkin-sky District, Ivanteevka, Sanatorny Proezd, 1/1B).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8039-4331>,

SPIN-code: 2028-7651,

e-mail: alexnazavr@yandex.ru

Ivanov Sergey D. – Associate Professor, Department “Lifting and Transportation Systems of Bauman Moscow State Technical University” (105005, Moscow, 2nd Baumanskaya St., 5, p. 1).

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

SPIN-code: 8035-2780,

e-mail: ptm-diagnostics@yandex.ru

Научная статья

УДК 621.879

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-844-851>

EDN: LMLPVY



ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ БУЛЬДОЗЕРНОГО АГРЕГАТА ПО ТЯГОВО-СКОРОСТНЫМ ПАРАМЕТРАМ

И.П. Трояновская^{1,2}, О.А. Гребенщикова¹ ✉¹Южно-Уральский государственный аграрный университет,
г. Троицк, Россия²Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет),
г. Челябинск, Россия✉ ответственный автор
olgai3@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Промышленные тракторные агрегаты отличаются от сельскохозяйственных тракторных агрегатов большим весом рабочего оборудования, широким диапазоном грунтовых условий и цикличностью технологического цикла. Неотъемлемой частью работы бульдозерных агрегатов является буксование, не регламентируемое ГОСТ. Однако значительное буксование приводит к падению рабочей скорости и технической производительности. Поэтому подходы, выработанные для оптимизации производительности гусеничных сельскохозяйственных тракторных агрегатов (где буксование регламентируется на уровне 5%), требуют уточнения.

Цель исследования. Определить влияние удельных тягово-скоростных характеристик бульдозерного агрегата на его техническую производительность.

Материалы и методы. Техническая производительность определялась как отношение объема разработанного грунта ко времени рабочего цикла. Объем разработанного грунта был выражен через удельные тяговые параметры тракторного агрегата. Время рабочего цикла выражалось через скоростные параметры тракторного агрегата. В результате получена зависимость технической производительности от удельных тягово-скоростных параметров промышленного тракторного агрегата.

Результаты. Анализ полученной зависимости показал наличие ярко выраженного максимума, который для бульдозерного агрегата наблюдается при буксовании 18%. Определены оптимальные удельные тяговые усилия для различных грунтовых условий. Оценка скоростных показателей бульдозерного агрегата показала возможность дополнительного увеличения технической производительности за счет роста рабочей скорости.

Заключение. Получен коэффициент производительности, позволяющий сравнивать техническую производительность тракторных агрегатов различных классов. Выявлено, что для бульдозерных агрегатов с полужесткой подвеской, работающих на плотных грунтах, оптимальные удельные тяговые усилия составляют 0,75...0,89. Дальнейшее повышение технической производительности возможно за счет увеличения рабочей скорости, обязательной при сохранении (или увеличении) отношения скорости холостого хода к скорости рабочего хода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: землеройная машина, удельные тяговые усилия, разработка грунта, призма волочения, кавальер, рабочая скорость, откат

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

Статья поступила в редакцию 23.09.2024; одобрена после рецензирования 28.10.2024; принята к публикации 16.12.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Трояновская И.П., Гребенщикова О.А., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Трояновская И.П., Гребенщикова О.А. Оптимизация технической производительности бульдозерного агрегата по тягово-скоростным параметрам // Вестник СибаДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 844-851. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-844-851>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-844-851>

EDN: LMLPVY

OPTIMIZATION OF TECHNICAL PRODUCTIVITY OF A BULLDOZER UNIT IN TERMS OF TRACTION AND SPEED PARAMETERS

Irina P. Troyanovskaya¹, Olga A. Grebenshchikova¹ ✉

¹South Ural State Agrarian University,
Troitsk, Russia

South Ural State University (national research university),
Chelyabinsk, Russia

✉ corresponding author
olgai3@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Industrial tractor units differ from agricultural tractor units by the greater weight of the working equipment, a wide range of soil conditions and the cyclicity of the technological cycle. An integral part of the operation of bulldozer units is slippage, which is not regulated by GOST. However, large amounts of slippage result in a drop in operating speed and technical performance. Therefore, the approaches developed for optimizing the productivity of tracked agricultural tractor units (where slippage is regulated at 5%) require clarification.

The aim of the study is to determine the influence of specific traction-speed characteristics of a bulldozer unit on its technical productivity.

Materials and methods. Technical productivity was defined as the ratio of the volume of developed soil to the time of the working cycle. The volume of developed soil was expressed through the specific traction indicators of the tractor unit. The time of the working cycle was expressed through the speed indicators of the tractor unit. As a result, the dependence of technical productivity on the specific traction-speed indicators of the industrial tractor unit was obtained.

Results. The analysis of this dependence showed the presence of a clearly expressed maximum, which for the bulldozer unit is observed at 18% slippage. Optimal specific traction efforts for various soil conditions were determined. The evaluation of the speed indicators of the bulldozer unit showed the possibility of additional increase in technical productivity due to the growth of the operating speed.

Conclusions. A productivity coefficient has been obtained that allows comparing the technical indicators of tractor units of different classes. It has been established that for bulldozer units with a semi-rigid suspension, operating on dense soils, the optimal specific traction efforts are 0.75...0.89. Further increase in technical productivity is possible by increasing the working speed while maintaining (or increasing) the ratio of idle speed to working speed.

KEYWORDS: earthmoving machine, specific traction effort, soil development, drag prism, cavalier, working speed, rollback

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest. Troyanovskaya I.P. member of the editorial board of the journal *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. The journal "The Russian Automobile and Highway Industry Journal" does not exempt scientists from reviewing the manuscript, regardless of their status.

The article was submitted: 23.09.2024; approved after reviewing: 28.10.2024; accepted for publication: 16.12. 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. Troyanovskaya I.P., Grebenshchikova O.A. Optimization of technical productivity of a bulldozer unit in terms of traction and speed parameters. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): 844-851. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-844-851>

© Troyanovskaya I.P., Grebenshchikova O.A., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Около 30% общего объема земляных работ в нашей стране выполняется землеройными агрегатами на базе гусеничных тракторов [1]. Наибольшее распространение получили промышленные тракторные агрегаты в составе с бульдозерным и рыхлительным рабочим оборудованием. Они уже давно доказали свою незаменимость при строительстве каналов и гидроэлектростанций; шоссейных и железных дорог; добыче полезных ископаемых; при сооружении различных промышленных и гражданских объектов; прокладке магистральных нефте- и газопроводов; при освоении Арктики [2].

Важнейшим отличием промышленных тракторных агрегатов¹ является циклический характер их технологического процесса [3]. Значительную часть технологического цикла (30% для бульдозера и 20% для рыхлителя) составляет холостой ход (откат). При этом рабочий и холостой ход характеризуются различной загрузкой двигателя. В период рабочего хода средняя нагрузка двигателя составляет 75–85% его номинальной мощности, а на холостом ходу она находится на уровне 20–30% [4].

Еще одной отличительной чертой тракторных агрегатов промышленного назначения является значительный вес рабочего оборудования. Например, вес бульдозерного агрегата превышает вес базового трактора на 17–22%. Дополнительная установка рыхлительного оборудования приводит к увеличению веса агрегата в 1,3–1,5 раза по сравнению с базовым трактором [5].

В отличие от сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов диапазон грунто-вых условий промышленных агрегатов значительно шире (от снежного покрова до мерзлых грунтов). В связи с этим подходы, выработанные для оптимизации производительности сельскохозяйственных тракторных агрегатов, требуют уточнения.

Цель исследования: определить влияние удельных тягово-скоростных характеристик бульдозерного агрегата на его техническую производительность.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Техническая производительность любого тракторного агрегата циклического действия (включая бульдозер) определяется по формуле [6, 7]:

$$\Pi = q/T, \quad (1)$$

где q – объем разработанного грунта (призмы волочения); T – время рабочего цикла.

Свяжем объем призмы волочения q с удельным тяговым усилием бульдозерного агрегата $\varphi_a = P_{кр}/G_a$, где $P_{кр}$ – крюковое тяговое усилие; G_a – вес бульдозерного агрегата.

Согласно тяговому балансу развиваемое бульдозерным агрегатом крюковое тяговое усилие равно $P_{кр} = P_k - P_f$, где $P_k = \varphi G_a$ – касательное тяговое усилие, φ – коэффициент сцепления гусеницы с грунтом, $P_f = f G_a$ – сила сопротивления самопередвижению бульдозерного агрегата, f – коэффициент сопротивления самопередвижению.

Крюковое тяговое усилие должно обеспечивать тяговое сопротивление P_Σ при разработке грунта траншейным способом [8]:

$$P_\Sigma = P_p + P_t + P_a, \quad (2)$$

где P_p – сопротивление резанию грунта, P_t – сопротивление перемещению призмы волочения по кавальеру, P_a – сопротивление движению грунта вверх по отвалу.

Сопротивление резанию грунта можно определить по $P_p = kF$, где k – коэффициент сопротивления грунта резанию; F – площадь сечения срезаемой стружки [9].

Сопротивление перемещению призмы волочения по кавальеру равно $P_t = \mu_1 G_q$, где μ_1 – коэффициент трения грунта по грунту; $G_q = \gamma q$ – вес призмы волочения; γ – удельный вес грунта [10].

Сопротивление движению грунта по отвалу равно $P_a = \mu_2 G_q \cos^2 \alpha$, где μ_2 – коэффициент трения грунта по металлу отвала; $\alpha \approx 55^\circ$ – угол резания отвала.

Тогда формула суммарного сопротивления (2) принимает вид [11, 12]:

$$P_\Sigma = P_p + P_t + P_a, \quad (3)$$

где $\mu = \mu_1 + \mu_2 \cos^2 \alpha$ – эквивалентный коэффициент трения.

Приравняв суммарное тяговое сопротивление P_Σ к крюковому тяговому усилию $P_{кр}$, получаем его связь с призмой волочения

$$kF + \mu \gamma q = \varphi_a G_a. \quad (4)$$

¹ Гинзбург Ю.В. [и др.]. Промышленные тракторы. М: Машиностроение, 1986. 296 с.

Объем призмы волочения q зависит от площади сечения срезаемого грунта F . Приращение призмы волочения dq на участке dx можно записать

$$dq(x) = F dx. \quad (5)$$

Выразим из (4) площадь срезаемого грунта $F = \frac{\varphi_a G_a - \mu \gamma q}{k}$ и подставим его в (5):

$$dq(x) = \frac{\varphi_a G_a - \mu \gamma q(x)}{k} dx. \quad (6)$$

Проинтегрируем выражение (6) с учетом $x = 0 \dots l_n$, где l_n – длина траншеи, где происходит набор грунта (при $x = 0$, $q = 0$).

$$q = \frac{\varphi_a}{\mu \gamma} \left[1 - e^{-\frac{\mu \gamma l_n}{k}} \right] G_a. \quad (7)$$

Теперь выразим время рабочего цикла T через скоростные параметры бульдозерного агрегата. Время цикла складывается из времени на набор грунта T_n , его транспортировку $T_{тр}$, холостой ход T_{xx} и переключение передач $T_{пп}$:

$$T = T_n + T_{тр} + T_{xx} + T_{пп}. \quad (8)$$

Время на набор грунта определяется $T_n = l_n / V_p c_1 (1 - \delta)$, где V_p – теоретическая рабочая скорость бульдозера при наборе грунта; δ – коэффициент буксования на рабочем ходу; c_1 – коэффициент потери скорости на рабочем ходе, учитывающий работу двигателя на перегрузочных режимах при резком снижении оборотов.

Время на транспортировку грунта равно $T_{тр} = l_t / V_p c_1 (1 - \delta)$, где $l_t = l_k - l_n$ – путь транспортировки грунта по кавальеру; l_k – длина кавальера.

Время холостого хода $T_{xx} = l_{xx} / c_2 V_{xx}$, где $l_{xx} = l_k$ – путь отката (длина кавальера); V_{xx} – рабочая скорость заднего хода; c_2 – коэффициент потери скорости движения при откате трактора из-за неуставившегося движения.

Время переключения передач $T_{пп}$ практически не зависит от параметров бульдозерного агрегата и определяется в основном квалификацией оператора. Его величина составляет всего 0,03 от общего времени цикла [13], что позволяет пренебречь в дальнейшем этой составляющей в связи с ее относительной малостью.

Тогда общее время рабочего цикла (8), после небольших преобразований получаем

$$T = \frac{l_k}{V_p c_1} \left(\frac{1}{(1 - \delta)} + \frac{c_1 V_p}{c_2 V_{xx}} \right). \quad (9)$$

Подставив (7) и (9) в (1) получим выражение для технической производительности бульдозерного агрегата в зависимости от его тягово-скоростных параметров

$$\Pi = \frac{\varphi_a \left[1 - e^{-\frac{\mu \gamma l_n}{k}} \right] V_p c_1 G_a}{\mu \gamma l_k \left[\frac{1}{(1 - \delta)} + \frac{c_1 V_p}{c_2 V_{xx}} \right]}. \quad (10)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ формулы производительности (10) позволил выделить в ней коэффициент производительности K_Π , характеризующий удельные тягово-скоростные параметры бульдозерного агрегата при равных грунтовых условиях $\mu \gamma$ и длине разрабатываемой траншеи l_k :

$$K_\Pi = \frac{\varphi_a V_p c_1}{\left[\frac{1}{(1 - \delta)} + \frac{c_1 V_p}{c_2 V_{xx}} \right]}. \quad (11)$$

Оценим влияние удельных тяговых параметров на техническую производительность. Для этого выразим удельное крюковое усилие φ_a как функцию буксования δ (рисунок 1).

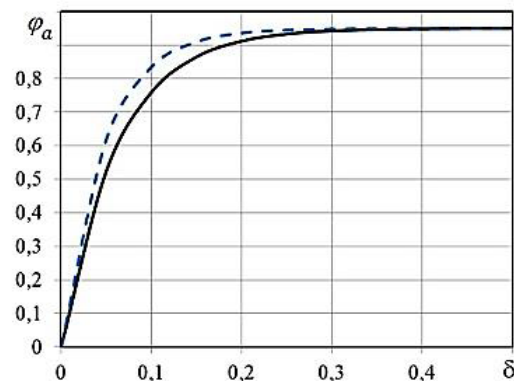


Рисунок 1 – Зависимость удельного крюкового усилия φ_a от коэффициента буксования δ
Источник: открытые электронные ресурсы.

Figure 1 – Dependence of the specific hook force φ_a on the slip coefficient δ
Source: open electronic resources.

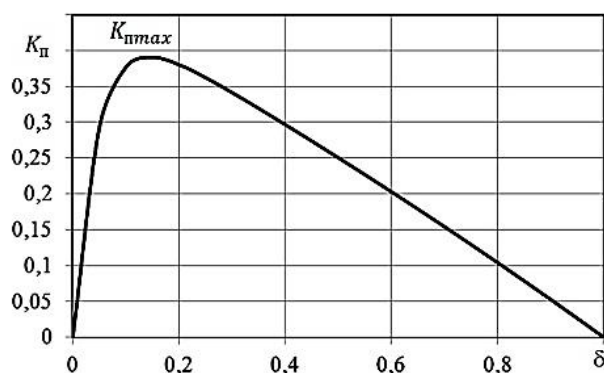


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента производительности $K_{п}$ от буксования δ
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Dependence of the performance coefficient $K_{п}$ on slippage δ
Source: compiled by the authors.

Таблица
Оптимальные удельные тяговые усилия $\varphi_{\text{аопт}}$, обеспечивающие максимальную техническую производительность бульдозерного агрегата
Источник: составлено авторами.

Table
Optimal specific traction forces $\varphi_{\text{аопт}}$, ensuring maximum technical productivity of the bulldozer unit
Source: compiled by the authors.

φ_{max}	0,8	0,85	0,9	0,95
$K_{п\text{max}}$	0,31	0,33	0,35	0,36
$\varphi_{\text{аопт}}$	0,75	0,80	0,85	0,89

Зависимость $\varphi_a(\delta)$ достаточно точно описывается зависимостью [14, 15]:

$$\varphi = \varphi_{\text{max}}[1 - (1 - \delta)e^{a\delta}], \quad (12)$$

где $\varphi_{\text{max}} \approx 0,8 \dots 0,95$ – максимальное значение удельного крюкового усилия гусеничного движителя с грунтом; $a \approx -15$ – коэффициент деформируемости грунта, определяемый экспериментально².

Коэффициент производительности в функции от буксования $K_{п}(\delta)$ имеет ярко выраженный максимум (рисунок 2) при буксовании $\delta = 0,18$.

Коэффициент максимальной производительности $K_{п}$ позволяет для заданных грунтовых условий определить оптимальные

крюковые тяговые усилия $\varphi_{\text{аопт}}$. Результаты расчетов представлены в таблице.

Теперь оценим влияние скоростных параметров на техническую производительность. Согласно исследованиям Б.Л. Магарилло³ коэффициенты потерь скорости на рабочем и холостом ходу при работе бульдозерного агрегата составляют $c_1 = 0,85 \dots 0,9$ и $c_2 = 0,92 \dots 0,97$

Определим влияние скоростных параметров на техническую производительность. Для бульдозерного агрегата с полужесткой подвеской рекомендуемые скоростные диапазоны составляют: для скорости отката $V_{\text{xx}} = 10 \dots 12$ км/ч (2,8...3,3 м/с), для рабочей скорости $V_{\text{p}} = 2,5 \dots 4$ км/ч (0,7...1,1 м/с) [16]. Результаты расчетов представлены на рисунке 3.

² Позин Б.М., Трояновская И.П. Тяговая характеристика трактора (основы теории и расчет). Челябинск. 2016. 84 с.

³ Магарилло Б.Л. Исследование оптимальных тяговых усилий гусеничного промышленного трактора. дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 1970. 122 с.

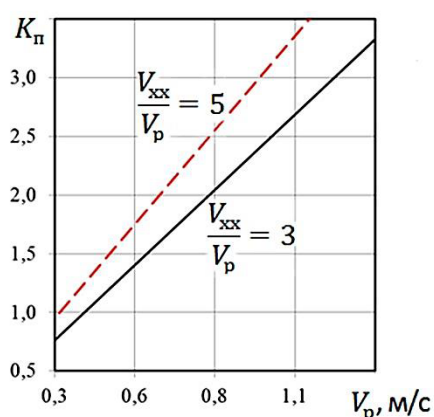


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента производительности K_n от рабочей скорости V_p и соотношения скорости холостого хода и рабочего хода V_{xx}/V_p
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Dependence of the performance coefficient K_n on the operating speed V_p and the ratio of the idle and operating speeds V_{xx}/V_p
Source: compiled by the authors.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа бульдозерного агрегата характеризуется: цикличностью технологического процесса, включающего рабочий и холостой ход; большим весом рабочего оборудования; накоплением грунта при его разработке; широким диапазоном действующих нагрузок и типов грунтов.

Получен удельный коэффициент производительности, позволяющий сравнивать техническую производительность тракторных агрегатов различных классов.

Анализ технической производительности бульдозерного агрегата показал, что она имеет ярко выраженный максимум в зависимости от величины буксования, что позволяет определить оптимальные значения удельных тяговых усилий на рабочем ходу в зависимости от типа грунта. В результате численного эксперимента определено, что при работе на плотных грунтах (с максимальным коэффициентом сцепления $\varphi_{\max} = 0,8 \dots 0,95$) оптимальные удельные тяговые усилия для бульдозерного агрегата с полужесткой подвеской составляют $\varphi_{\text{опт}} = 0,75 \dots 0,89$.

Оценка скоростных показателей бульдозерного агрегата показала возможность дополнительного увеличения технической производительности за счет роста рабочей скорости. Чтобы рост производительности не отставал от роста рабочей скорости необходимо сохранять или увеличить отношение скорости холостого хода к скорости рабочего хода.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Баловнев В.И., Данилов Р.Г. Бульдозеры // Строительные и дорожные машины. 2021. № 6. С. 9–18.
2. Ермошин Н.А., Борисов В.А. Моделирование условий работы дорожно-строительных машин и технологического оборудования // Известия КГАСУ. 2024. № 2(68). С. 147–158. DOI: 10.48612/NewsKSUAЕ/68.13.
3. Suleev B., Kurmasheva B. Theoretical foundations of the development of a bulldozer design through the use of multivariate parametric analysis. The Bulletin of KazATC. 2023. Vol. 126(3). pp. 74–81. DOI: 10.52167/1609-1817
4. Bolotokov A.L. et al. Improving the Fuel Efficiency of an Agricultural Tractor Diesel Engine. E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 411. pp. 01045. DOI: 10.1051/e3sconf/202341101045
5. Хужаназаров Б.Ф. Требования к рабочим органам бульдозерных оборудований // Механика и технология. 2023. № 2 (5). С. 208–214.
6. Жулай В.А., Тюнин В.Л., Щиенко А.Н. Влияние технических характеристик бульдозера на его производительность // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 2. С. 534–537. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-2-534-535
7. Трояновская И.П., Позин Б.М., Нарadowый Д.И. Повышение эффективности тракторного транспортного агрегата // Техника в сельском хозяйстве. 2012. № 3. С. 21–23.
8. Жаков А.О., Трояновская И.П. Учет сил со стороны рабочего орудия в управлении беспилотным тракторным агрегатом // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2024. № 13. С. 70–72. DOI: 10.26160/2541-8637-2024-13-70-72
9. Аукунова Б.К., Раденков Р.Л., Савельев А.Г., Дудкин М.В., Кумыкова Т.М. Исследование рабочего процесса бульдозерного отвала с изменяемой геометрией // Труды университета. 2023. № 2 (91). С. 67–73. DOI: 10.52209/1609-1825_2023_2_67
10. Nikolaev V. et al. Calculation of energy expenses for moving soil by the conveyor of the unit for tunneling. E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 471. no. 05006. DOI: 10.1051/e3sconf/202447105006
11. Kozbagarov R. et al. Increasing the efficiency of the bulldozer by reducing the energy intensity of the soil cutting process. The Bulletin of KazATC. 2023. Vol. 1 (124). pp. 16–24. DOI: 0.52167/1609-1817
12. Розенфельд Н.В., Доля Ю.А. Нагрузки, действующие на бульдозер при транспортировке грунта // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2014. № 65–66. С. 231–234.
13. Мицын Г.П. [и др.]. Проблемы оптимального управления тракторным машинным агрегатом // Наука и технологии: избранные труды Российской школы «К 70-летию Г.П. Вяткина». 2005. С. 510–519.
14. Трояновская И.П. Взаимодействие гусеничного движителя с грунтом на повороте // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2007. № 12. С. 19–20.

15. Ren L. et al. Effects of non-smooth characteristics on bionic bulldozer blades in resistance reduction against soil. *Journal of Terramechanics*. 2002. Vol. 39 (4. pp. 221–230. DOI: 10.1016/S0022-4898(03)00012-0

16. Dobretsov R.Yu. et al. The Method of Expert Assessments as Applied to the Ranking of Technical Solutions in the Design of a Tractor Gearbox // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2094. no. 042028. DOI: 10.1088/1742-6596/2094/4/042028

REFERENCES

1. Balovnev V.I., Danilov R.G. Bulldozers. *Construction and road machines*. 2021; 6:9–18. (in Russ)

2. Ermoshin N.A., Borisov V.A. Modeling of working conditions and selection of sets of road-building machines and processing equipment. *News KSUAE*. 2024; 2(68): 147–158. (in Russ) DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.13

3. Suleev B., Kurmasheva B. Theoretical foundations of the development of a bulldozer design through the use of multivariate parametric analysis. *The Bulletin of KazATC*. 2023; 126(3): 74–81. DOI: 10.52167/1609-1817

4. Bolotokov A.L. et al. Improving the Fuel Efficiency of an Agricultural Tractor Diesel Engine. *E3S Web of Conferences*. 2023; 411: 01045. DOI: 10.1051/e3sconf/202341101045

5. Khuzhanazarov B.F. Requirements for working bodies of bulldozer equipment. *Mechanics & Technologies*. 2023; 2 (5): 208–214. (in Russ)

6. Zhulai V.A., Tyunin V.L., Shchlenko A.N. Influence of technical characteristics of a bulldozer on its productivity. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU)*. 2024; 2: 534–537. (in Russ) DOI: 10.24412/2071-6168-2024-2-534-535

7. Troyanovskaya I.P., Pozin B.M., Naradoviy D.I. Increasing the efficiency of a tractor transport unit. *Machinery in agriculture*. 2012; 3: 21–23. (in Russ)

8. Zhakov A.O., Troyanovskaya I.P. Accounting for forces from the working implement in the control of an unmanned tractor unit. *Mechatronics, automation and robotics*. 2024; 13: 70–72. (in Russ) DOI: 10.26160/2541-8637-2024-13-70-72

9. Aukenova B.K., Radenkov R., Saveliev A., Doudkin M., Kumykova T. Investigation of the Interaction Process with the Environment of a Bulldozer Bladow with Variable Geometry. *Universitet Enbekteri – University Proceedings*. 2023; 2 (91): 67–73. DOI:10.52209/1609-1825_2023_2_67

10. Nikolaev V. et al. Calculation of energy expenses for moving soil by the conveyor of the unit for tunneling. *E3S Web of Conferences*. 2024; 471. no. 05006. DOI: 10.1051/e3sconf/202447105006

11. Kozbagarov R. et al. Increasing the efficiency of the bulldozer by reducing the energy intensity of the soil cutting process. *The Bulletin of KazATC*. 2023; 1 (124): 16–24. DOI: 10.52167/1609-1817

12. Rozenfeld N., Dolya Yu. Loads acting on a bulldozer at soil transportatn. *Bulletin of Kharkiv*

National Automobile and Highway University. 2014; 65–66: 231–234.

13. Mitsyn G.P. et al. Problems of optimal control of a tractor machine unit. *Science and Technology: Selected Works of the Russian School “On the 70th anniversary of G.P. Vyatkin”*. 2005: 510–519. (in Russ)

14. Troyanovskaya I.P. Interaction of a caterpillar track with the ground on a turn. *Tractors and agricultural machinery*. 2007; 12: 19–20. (in Russ)

15. Ren L. et al. Effects of non-smooth characteristics on bionic bulldozer blades in resistance reduction against soil. *Journal of Terramechanics*. 2002; 39 (4): 221–230. DOI: 10.1016/S0022-4898(03)00012-0

16. Dobretsov R.Yu. et al. The Method of Expert Assessments as Applied to the Ranking of Technical Solutions in the Design of a Tractor Gearbox. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 2094: 042028. DOI: 10.1088/1742-6596/2094/4/042028

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Трояновская И.П. Формулирование направления, выбор методологии исследования, вывод формул, проведение численных расчетов, полученные результаты.

Гребенщикова О.А. Общая организация работы, подготовка текста статьи, перевод на английский язык, связь с редакцией, работа с рецензентами.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Troyanovskaya I.P. Formulating the direction, choosing the research methodology, deriving formulas, performing numerical calculations, obtaining results.

Grebenshchikova O.A. General organization of work, preparation of article text, translation into English, communication with the editorial board, work with reviewers.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Трояновская Ирина Павловна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Тракторы, сельскохозяйственные машины и земледелие» Южно-Уральского государственного аграрного университета (457103, г. Троицк, ул. Гагарина, 13); проф. кафедры «Колесные и гусеничные машины» Южно-Уральского государственного университета (национальный исследовательский университет) (454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2763-0515>,

SPIN-код: 8733-7935,

e-mail: tripav63@mail.ru

Гребенщикова Ольга Александровна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Тракторы, сельскохозяйственные машины и земледелие» Южно-Уральского государственного аграрного университета (457103, г. Троицк, ул. Гагарина, 13).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5941-211X>,

SPIN-код: 6012-9906,

e-mail: olgai3@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Troyanovskaya Irina P. – Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Professor of the Department of Tractors, Agricultural Machinery and Agriculture of the South Ural State Agrarian University (13 Gagarin Street, Troitsk, 457103); South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia.

ORGID: <https://orcid.org/0000-0003-2763-0515>,

SPIN-code: 8733-7935,

e-mail: tripav63@mail.ru

Grebenshchikova Olga A. – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Tractors, Agricultural Machinery and Agriculture of the South Ural State Agrarian University (13 Gagarin Street, Troitsk, 457103).

ORGID: <https://orcid.org/0000-0002-5941-211X>,

SPIN-code: 6012-9906,

e-mail: olgai3@mail.ru

УДК 625.089.21

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-852-866>

EDN: XPFBRO



ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНОГО АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ГРАНУЛЯТА

Д.В. Фурманов ✉, **Е.С. Буданова***Ярославский государственный технический университет (ЯГТУ),
г. Ярославль, Россия**✉ ответственный автор
denis_furmanov@mail.ru*

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье предложен энергетический подход к анализу рабочего процесса фрезерования асфальтобетонных покрытий. Рабочий процесс резания асфальтобетона рассматривается как совокупность процессов разрушения каменной фракции, битумных связей и прочих явлений, не связанных с образованием новых поверхностей. Анализ выполнен на основе оценки соотношения энергии, затраченной на фрезерование в целом, и энергии, затраченной на формирование новых поверхностей отдельных фракций асфальтобетонного гранулята и щебенчатого заполнителя.

Материалы и методы. Работа построена на основе экспериментальных исследований гранулометрического состава асфальтобетонного гранулята, полученного при фрезеровании щебеночно-мастичного асфальтобетонного покрытия, и отдельно каменной фракции асфальтобетона, полученной путем выжигания битумной матрицы. Также использован стандартный метод для определения удельной энергии разрушения битумных связей при определении сопротивляемости разрушению образца на растяжении при расколе.

Результаты. В результате рассева получены гранулометрические кривые состава асфальтобетонного гранулята и каменной фракции. Расчетными методами определены составляющие затрат энергии на образование новых поверхностей асфальтобетонного гранулята и новых поверхностей каменной фракции.

Обсуждение и заключение. В итоге работы получены количественные соотношения различных фракций асфальтобетонного гранулята щебеночно-мастичного асфальтобетона, образующегося при фрезеровании, а также степень дробления каменных фракций. Определены удельные затраты энергии при фрезеровании асфальтобетона. Установлено, что наибольшая часть энергии при фрезеровании (64,7% для данного исследования) затрачивается на разрушение битумных связей. Подавляющая часть этой энергии расходуется на образование мелкой фракции гранулята. На разрушение каменной фракции затрачивается незначительная часть энергии. В целом доля затрат энергии, направленной на образование новых поверхностей для указанного исследования, составляет 66,14% от общих затрат энергии. Отмечается перспективность гранулометрического анализа для оценки эффективности процесса фрезерования асфальтобетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: асфальтобетон, гранулят, удельная энергия, гранулометрическая кривая, битумные связи, дорожная фреза

Статья поступила в редакцию 05.11.2024; одобрена после рецензирования 21.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

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., Буданова Е.С. Оценка эффективности процесса фрезерования на основе гранулометрического анализа щебеночно-мастичного асфальтобетонного гранулята // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 852-866. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-852-866>

© Фурманов Д.В., Буданова Е.С., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-852-866>

EDN: XPFBRO

EFFICIENCY EVALUATION OF THE MILLING PROCESS BASED ON THE GRANULOMETRIC ANALYSIS OF CRUSHED STONE-MASTIC ASPHALT CONCRETE GRANULATE

Denis. V. Furmanov ✉, Ekaterina. S. Budanova

Yaroslavl State Technical University,

Yaroslavl, Russia

✉ corresponding author

denis_furmanov@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The working process of milling asphalt concrete pavements. The working process of asphalt concrete milling is considered as a set of destruction processes of the stone fraction, bitumen bonds and other phenomena unrelated to the formation of new surfaces. The conducted analysis is based on the assessment of the ratio of energy spent on milling in general and the energy needed for the formation of new surfaces made from separate fractions of asphalt concrete granulate and crushed stone aggregate.

Materials and methods. The work is based on carried out experimental studies of the granulometric composition of asphalt concrete granulate obtained by milling crushed stone-mastic asphalt concrete pavement, and, separately, the stone fraction of asphalt concrete got by burning out a bitumen matrix. A standard method was also used to determine the specific energy of destruction of bitumen bonds when determining the fracture disruption resistance of a sample in tension while splitting.

Results. As a result of sieving, granulometric curves of the composition of asphalt concrete granulate and stone fraction were obtained. Calculation methods have determined the components of energy consumption for the formation of new surfaces made from asphalt concrete granulate and new surfaces from stone fraction.

Discussion and conclusion. At the end of the study, quantitative ratios of various fractions of asphalt concrete granulate of stone-mastic asphalt concrete formed during milling, as well as the crushing grade of stone fractions, were obtained. The specific energy consumption during the milling of asphalt concrete has been determined. It was found that the largest part of the energy during milling (64.7% for this study) is needed for the destruction of bitumen bonds. The vast majority of this energy is used for the formation of the fine granulate fraction. An insignificant part of the energy is spent on the destruction of the stone fraction. In general, the share of energy consumption aimed at the formation of new surfaces accounts for this study 66.14% of the total energy costs. The research development prospects of granulometric analysis for evaluating the effectiveness of the asphalt concrete milling process have been noted.

KEYWORDS: asphalt concrete, granulate, specific energy, granulometric curve, bitumen bonds, road milling cutter

The article was submitted: 05.11.2024 approved after reviewing: 21.11.2024; accepted for publication: 16.12.2024.

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

© Furmanov D.V., Budanova E.S., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

По оценочным данным, до 10% мирового потребления энергии используется для измельчения различных материалов [1]. Эффективность процесса измельчения строительных материалов для различных условий существенно отличается. Так, коэффициент полезного действия роторных дробилок составляет 0,75–0,8 [2]. В то же время помол цементного клинкера осуществляется с коэффициентом полезного действия, соответствующему значению 0,009–0,0098 [3]. Даже незначительное повышение эффективности процессов измельчения в промышленности приведет к большой экономии энергоресурсов. Однако принципы, на которых работают современные машины для измельчения материалов, заложенные еще более 100 лет назад, и во многих отраслях остаются неизменными до сих пор [4].

Это обстоятельство не обошло стороной и рабочий процесс удаления асфальтобетонных покрытий. Конструкции роторов и режущих элементов горнодобывающих машин без существенного изменения реализованы в рабочих органах дорожных фрез по сей день.

Удаление старого асфальтобетонного покрытия – важная технологическая операция, выполняемая при ремонте дороги. Дорожные фрезы, используемые для этих целей, являются сложными машинами, обладающими большой мощностью, а сам процесс фрезерования, безусловно, обладает высокой энергоемкостью [5]. Снижение затрат энергии рабочего процесса фрезерной машины хотя бы на 10–15% приведет к значительному снижению расхода топлива, вредных выбросов в атмосферу, а также снижению текущих и капитальных затрат. Однако достижение такого результата невозможно без тщательного изучения работы режущего инструмента дорожной фрезы, взаимодействующего с материалом.

Отметим, что рабочий процесс фрезерования асфальтобетона с энергетической точки зрения исследован достаточно слабо. Среди существующих работ можно выделить исследования [6], посвященные изучению особенностей работы эксцентричной дорожной фрезы.

Научный и практический интерес представляют так же результаты исследований рабочего процесса фрезерования асфальтобетона с использованием метода дискретных элементов, предложенный еще в семидесятых годах прошлого столетия, но получивший реализацию только в последнее время в связи с раз-

витием вычислительных ресурсов [7]. К таким работам можно отнести исследования [8, 9, 10, 11].

Асфальтобетон с точки зрения рабочего процесса дорожной фрезы является сложным многокомпонентным композитным материалом. Сопротивляемость резанию режущими элементами дорожных фрез невозможно оценить каким-либо единым показателем прочности. На энергоемкость и характер процесса фрезерования влияют структурные свойства материала, а именно прочность компонентов асфальтобетона, прочность связей между отдельными компонентами, структура материала, его гранулометрический состав и температура.

Работа сил сопротивления резанию единым режущим элементом фрезерной машины в общем случае затрачивается на:

- преодоление сил трения между режущим элементом и материалом;
- перемещение и сдвиг элементов материала;
- внутреннее трение частиц асфальтобетона;
- линейное и угловое ускорение отделенных и измельченных частиц асфальтобетона;
- накопление и рост дефектов в уже измельченных частицах;
- уплотнение материала и отдельных конгломератов;
- разрушение битумных связей между структурными компонентами асфальтобетона;
- измельчение (дробление) отдельных каменных фракций асфальтобетона.

С точки зрения механики измельчения материала только две последние составляющие затрат энергии являются полезными. Однако и эти затраты необходимо снижать путем увеличения размеров фракций, если не предъявляются специальные требования к фракционному составу асфальтобетонного гранулята.

Таким образом, коэффициент полезного действия рабочего процесса фрезерования можно рассматривать как отношение работы, затраченной на образование новых поверхностей при измельчении материала $A_{\text{и}}$ к полной энергии, затраченной на процесс фрезерования единичного объема E :

$$\eta = \frac{A_{\text{и}}}{E}. \quad (1)$$

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В процессе фрезерования асфальтобетона разрушаются не только битумные связи между

зернами минерального заполнителя, но и сам минеральный заполнитель. Поэтому для оценки энергетических характеристик рабочего процесса необходимо исследовать фракционный состав асфальтобетонного гранулята и отдельно фракционный состав щебня образцов асфальтобетона до фрезерования и после.

Наиболее распространенным подходом к исследованию энергетических характеристик процесса измельчения является расчет необходимой работы A_1 , затраченной на образование новых поверхностей. Для случая разрушения битумных связей между структурообразующими компонентами материала ее значение можно определить соотношением

$$A_1 = k_1 \cdot (S_1 - S_0), \quad (2)$$

где k_1 – удельная энергия разрушения битумных связей;

S_0 – площадь поверхности до измельчения;

S_1 – суммарная площадь вновь образованных поверхностей асфальтобетонного гранулята после измельчения.

В указанном выражении значение S_0 необходимо принять равным нулю ввиду отсутствия гранулята как такового до фрезерования.

Также представляет интерес гранулометрический состав каменной фракции асфальтобетона до и после фрезерования. Эта информация позволит обосновать энергетические характеристики рабочего процесса фрезерования в части затраченной энергии на образование новых поверхностей каменной фракции. Отдельно для этого материала можно записать аналогичное уравнение для нахождения работы разрушения A_2 :

$$A_2 = k_2 \cdot (S_3 - S_2), \quad (3)$$

где k_2 – удельная энергия образования новых поверхностей щебня при разрушении;

$S_{3,2}$ – суммарная площадь поверхностей каменной фракции до и после процесса фрезерования (в массиве асфальтобетона и в грануляте).

Предложенный впервые в работах Риттингера эмпирический метод определения необходимой энергии, затраченной на дробление материала, в дальнейшем подтвердил право на свое существование в фундаментальных

исследованиях механики хрупкого разрушения Гриффитса, Орована и Ирвина [12, 13, 14]. Согласно этим представлениям, упругая часть энергии, запасенная в материале, в процессе хрупкого разрушения затрачивается на преодоление сил, связывающих структурные элементы материала между собой. Удельная работа этих сил, затрачиваемая на образование трещины некоторой площади, называется вязкостью разрушения. Эта энергия близка по своей сущности к показателю k_2 , однако обе величины определяются различными экспериментальными методами, несмотря на то, что имеют одинаковую размерность.

Соответственно, полезная работа, затраченная на фрезерование асфальтобетона, может быть определена как сумма двух работ:

$$A_n = A_1 + A_2. \quad (4)$$

Определение площади поверхностей S_1 , S_2 и S_3 требует проведение экспериментальных исследований. Для решения этой задачи необходимо определять гранулометрический состав материала методом просеивания. Достаточно точное определение площади новых поверхностей может быть выполнено соотношением [15]:

$$S = a \cdot d^n, \quad (5)$$

где a – эмпирический коэффициент и n – показатель степени, зависящие от свойств материала.

Показатель удельной энергии k_2 определяется экспериментально. Его значение для нерудных материалов предложено в ряде работ [16, 17], связанных с исследованием процессов дробления каменных материалов. В последней работе указано значение показателя удельной энергии 140 Дж/м² для гранита. Отметим, что принятые для расчета параметров дробильных машин значения удельной энергии на порядок отличаются от показателей вязкости разрушения для подобных материалов, определенные экспериментальными методами и показанные в соответствующих работах¹ [18].

Что же касается энергии, затраченной для разрыва битумных связей с образованием новых конгломератов и зерен, то ее удельные показатели могут быть также определены экспериментально. Методически апробирован-

¹ Эшби М., Джонс Д. Конструкционные материалы. Полный курс: учебное пособие. Перевод 3-го английского издания. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010. 672 с

ный способ определения данного показателя предложен национальным стандартом Российской Федерации². С этой целью готовится образец асфальтобетона и производится его разрушение по схеме Маршала. По той же схеме определяется предел прочности на растяжение при расколе.

Работа по разрушению образца $A_{об}$ определяется соотношением

$$A_{об} = \frac{F \cdot l}{2}, \quad (6)$$

где F – разрушающая нагрузка, кН;

l – максимальная деформация образца до разрушения, мм.

Удельную энергию на разрушение битумных связей, с учетом неравномерной формы образуемой поверхности на образце, получим в следующем виде:

$$k_1 = \frac{A_{об}}{2 \cdot D \cdot b \cdot a_{cp}}, \quad (7)$$

где D и b – диаметр и толщина образцов;

a_{cp} – усредненное значение коэффициента формы поверхности.

Оценка степени дробления минерального заполнителя в процессе холодного фрезерования осуществлялась с верхнего слоя покрытия участка Москва–Ярославль автодороги М8 «Холмогоры». Покрытие ранее было устроено в 2008 г. из асфальтобетонной смеси марки ЦМА-15.

Гранулят асфальтобетона подвергался предварительному рассеиванию ситами стандартных размеров³ с круглыми ячейками, установленных на виброплощадке (рисунок 1, а). Рассев производился на ситах с ячейками 31,5, 22,4, 16, 11,2, 4 и 2 мм.

После определения гранулометрического состава формировался зерновой состав минеральной части исходных образцов асфальтобетона. Исследовались образцы неподверженных дроблению каменной фракции при фрезеровании и фрезерованного асфальтобетонного гранулята. Определение зернового состава минеральной части смеси производилось методом выжигания рассева¹ в муфельной печи, разогретой до температуры 500 °С (рисунок 1, б).

Рассев каменных фракций образцов асфальтобетона осуществлялся на ситах с последующим взвешиванием навесок на лабораторных весах (рисунок 1, в). Использовался набор сит с размерами ячеек 20, 15, 10, 5, 3,0, 1,25, 0,63, 0,315 и 0,16 мм.

Определение удельных показателей энергии, затраченной на разделение битумных связей, задавалось на лабораторном прессе ПГМ-100МГ4А при разрушении образца щебеночно-мастичного асфальтобетона стандартных размеров по схеме Маршала (рисунок 1, г).

Для определения эффективности процесса резания режущим элементом дорожной фрезы требуются значения затраченной энергии. Ответы на эти и некоторые другие вопросы помогут дать результаты экспериментальных исследований по резанию асфальтобетона единственным режущим элементом дорожной фрезы на маятниковом стенде [19, 20], опубликованные ранее.

В указанных работах приведены уравнения регрессии для определения значений усредненных сил сопротивления резанию асфальтобетона единственным режущим элементом для различных типов асфальтобетона. Для определения сил сопротивления резанию щебеночно-мастичных асфальтовых бетонов рекомендована зависимость [13]:

$$F_{ср\ x} = 900,38 \cdot h^{0,4524} \cdot t^{-0,0758}, \quad (8)$$

где h – глубина срезаемой стружки, мм;

t – температура асфальтобетона, град. С.

Ценность представленных данных в рамках настоящего исследования заключается в использованной методике, которая предполагает определение значений средних сил сопротивления резанию на основе анализа экспериментально полученных значений работы сил сопротивления резанию.

Отметим, что сила сопротивления резанию в выражении (9) нелинейно зависит от толщины срезаемой стружки. Следовательно, затрачиваемая работа и эффективность рабочего процесса будут являться функцией толщины срезаемого слоя

² ГОСТ 12801–98. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний. М.: Госстрой России, 1999. 67 с.

³ ГОСТ 51568–99. Сита лабораторные из металлической проволочной сетки. Технические условия. М.: Госстандарт России, 1999. 8 с.

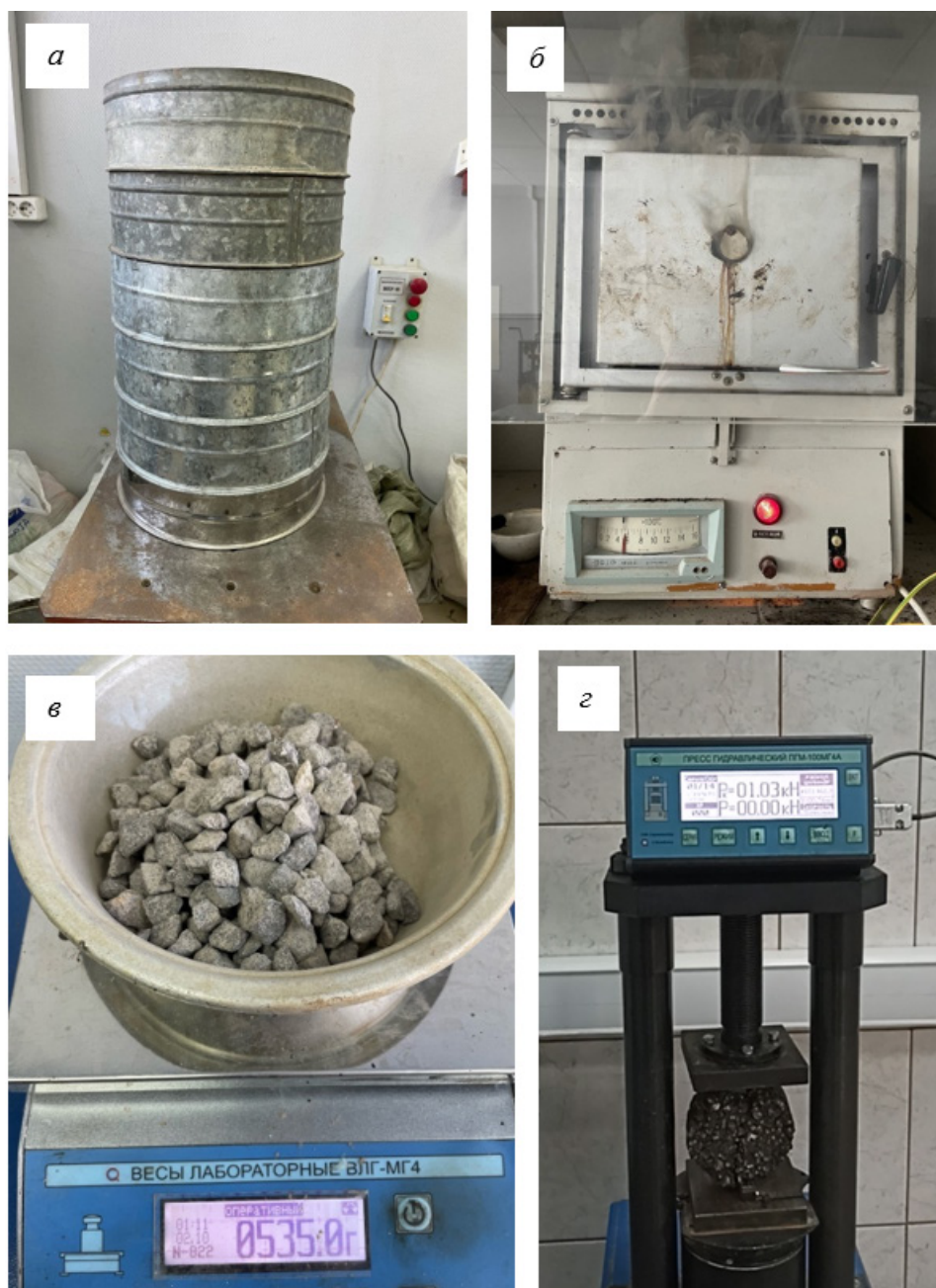


Рисунок 1 – Лабораторные исследования характеристик асфальтобетона:
 а – просев материала на виброплощадке с использованием набора сит;
 б – выжигание битума из асфальтобетонного гранулята в муфельной печи;
 в – взвешивание отдельных фракций минеральных зерен на лабораторных весах;
 г – определение работы растяжения при расколе стандартных образцов асфальтобетона
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Laboratory studies of asphalt concrete characteristics.
 а – material screening on a vibrating platform using a set of sieves;
 б – burning out bitumen from asphalt concrete granulate in a muffle furnace;
 в – weighing individual fractions of mineral grains on laboratory scales;
 г – determining the tensile work during splitting standard samples of asphalt concrete.
 Source: compiled by the authors

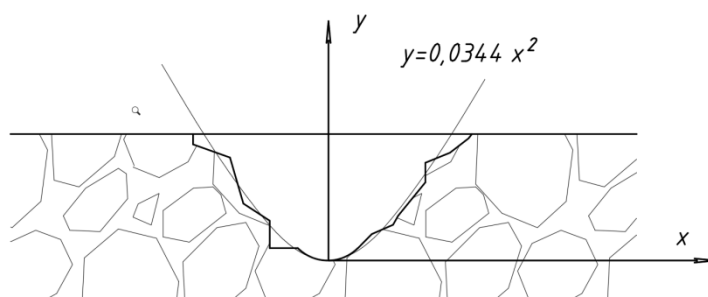


Рисунок 2 – Аппроксимация контура профиля сечения срезаемой стружки асфальтобетона
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Section profile contour approximation of the cut-off asphalt concrete chips
Source: compiled by the authors.

$$dE = F_{\text{ср}x} \cdot ds, \quad (9)$$

где ds – элементарное перемещение режущего элемента по своей траектории движения в процессе фрезерования.

Достаточно трудно оценивать эффективность процесса фрезерования асфальтобетона, учитывая, что эффективность процесса резания отдельным резцом меняется от врезания в материал до его выхода из него.

Профиль сечения стружки удобно аппроксимировать кривой второго порядка (рисунок 2). Согласно материалам исследований [19], по характерным точкам профиля можно построить уравнение регрессии

$$y = 0,0344 \cdot x^2, \quad (10)$$

где y и x – оси координат.

Интегрируя полученное выражение относительно y , получим функцию площади сечения стружки S_c как удвоенную площадь под ветвью кривой $x = f(y)$:

$$S_c = 2 \cdot \int_0^h 5,39 \cdot y^{\frac{1}{2}} dy. \quad (11)$$

Решением указанного интеграла будет выражение

$$S_c = 7,19 \cdot h^{1,5}. \quad (12)$$

Приращение удельной работы резания материала (работу, приведенную к единице срезаемого объема V) определим соотношением

$$A_{\text{уд}} = \frac{dE}{dV}. \quad (13)$$

Раскрыв указанное выражение, получим

$$A_{\text{уд}} = \frac{F_{\text{ср}x} ds}{S_c ds} = \frac{F_{\text{ср}x}}{S_c}. \quad (14)$$

Указанная зависимость очень легко может привести к заблуждению с учетом того, что величина площади как функция толщины срезаемой стружки получена в миллиметрах и, не смотря на размерность, выраженную в квадратных миллиметрах, является степенной функцией (12) с показателем степени 1,5. Размерности по обеим сторонам указанного выражения не совпадают. Это не приводит к метрологической несостоятельности выражения, однако следует соблюдать аккуратность в вычислениях. В числителе необходимо получить энергию, выраженную в Джоулях, и приращение перемещения по траектории резца ds с этой целью выражается также в метрах. В знаменателе нужно получить объем срезаемого материала, который выражается в кубических метрах. С этой целью итоговое выражение необходимо поделить на 10^3 и умножить на 10^9 .

С учетом сопротивляемости резанию рассматриваемого материала, подставив в итоговое выражение зависимости (8) и (12), получим

$$A_{\text{уд}} = 125,3 \cdot 10^6 \cdot h^{-1,048} \cdot t^{-0,0758}, \quad (15)$$

где толщина срезаемой стружки h выражена в миллиметрах, а получаемое значение удельной энергии выражается в Дж/м³.

Таким образом, удельная энергия обратно пропорциональна толщине срезаемой стружки для выбранного материала и выбранной схемы резания. Такой вывод хорошо иллюстрируется графиками, которые отражают влияние толщины срезаемой стружки на силы сопротивления резанию и удельную энергоёмкость процесса фрезерования, рассчитанные для температура асфальтобетона ЩМА-15 при температуре 20 °С (рисунок 3).

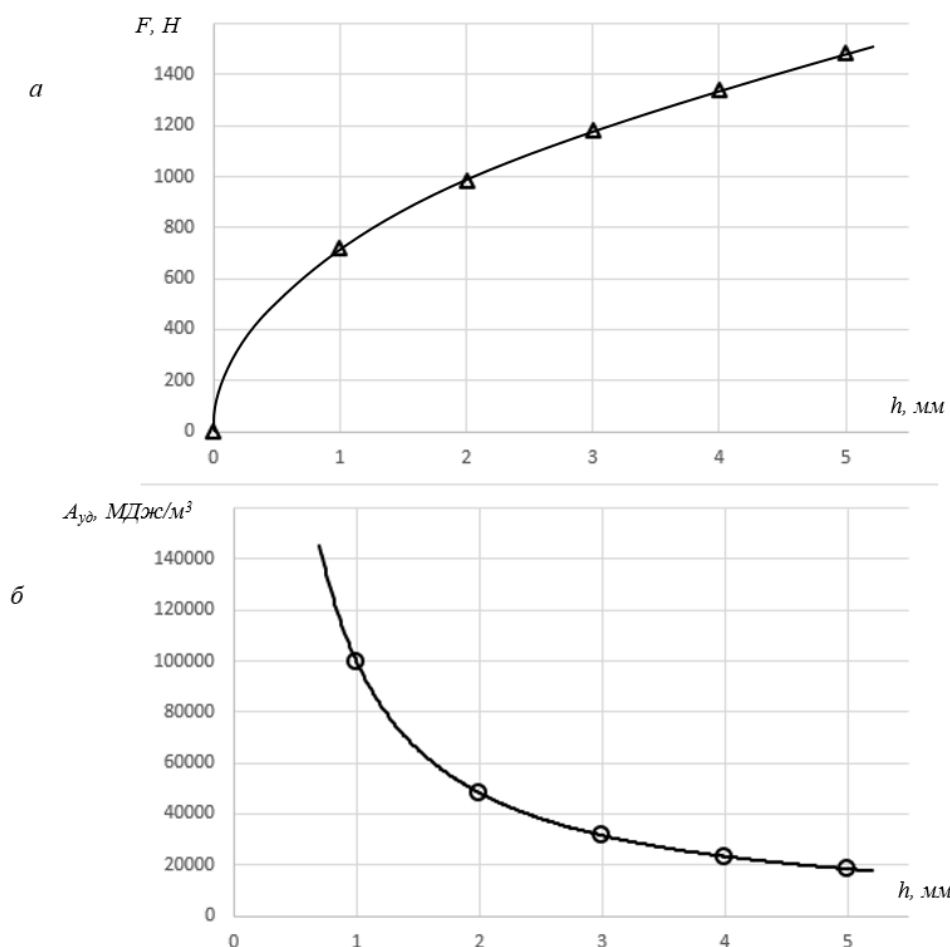


Рисунок 3 – Графики зависимости силы сопротивления резанию асфальтобетона (а) и удельной энергоемкости (б) в зависимости от толщины срезаемой стружки для заданных условий эксперимента
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Graphs of the dependence of the cutting resistance force of asphalt concrete (a) and the specific energy capacity (b) depending on the thickness of the cut chips for the given experimental conditions.
Source: compiled by the authors.

При малой толщине срезаемой стружки показатель удельной энергоемкости асимптотически стремится к бесконечности, и говорить о какой-нибудь эффективности рабочего процесса вообще не приходится.

Опираясь на представленный методический материал, возможно определение коэффициента полезного действия процесса фрезерования, однако оговорим ряд условий, для которых эти результаты будут справедливы, и введем некоторые допущения:

- определение коэффициента полезного действия и общая оценка эффективности процесса фрезерования производится для асфальтобетона марки ЩМА-15 при температуре фрезерования 20 °С;

- коэффициент полезного действия определяется как отношение затрат энергии, необходимых для формирования новых поверхностей при дроблении каменной фракции и разрушении битумных связей между отдельными частицами и конгломератами асфальтобетона к полной энергии, затрачиваемой на фрезерование единичного объема;

- определение полной энергии, затрачиваемой на фрезерование единичного объема, определено экспериментально на стенде маятникового типа в процессе резания единичным режущим элементом асфальтобетона марки ЩМА-15;

- удельные затраты энергии на образование новых поверхностей, связанных с раз-

рывом битумных связей между отдельными частицами и конгломератами, определены экспериментально как отношение работы затраченных сил на разрушение стандартного образца при расколе к площади поверхности раскола;

– удельные затраты энергии на образование новых поверхностей при дроблении каменной фракции имеют фиксированные значения и определяются как справочные данные, представленные для вулканических и излившихся пород;

– определение площади новых образованных поверхностей производится на основе анализа гранулометрического состава.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Каменная фракция асфальтобетона в процессе фрезерования неизбежно подвергается дроблению. Это хорошо заметно по характе-

ру гранулометрической кривой, показанной на рисунке 4, полученной путем рассева зернового состава щебня после выжигания битума. На графике заметно количественное увеличение средней и мелкой фракций за счет уменьшения крупной. Количественная оценка площади новых поверхностей (таблица 1) различных фракций щебня производится на основе разности с использованием зависимости (5).

Суммарная площадь новых поверхностей щебня, приведенная к одному кубическому метру материала для данного исследования, соответствует $3811,3 \text{ м}^2$ на один кубический метр измельченного материала. Расчет доли удельных затрат энергии, направленных только на измельчение щебня, показывает значение $A_2 = 552,6 \text{ кДж/м}^3$. Это не очень большие показатели затрат энергии в сопоставлении с реализуемой механической энергией существующих дорожных фрез.

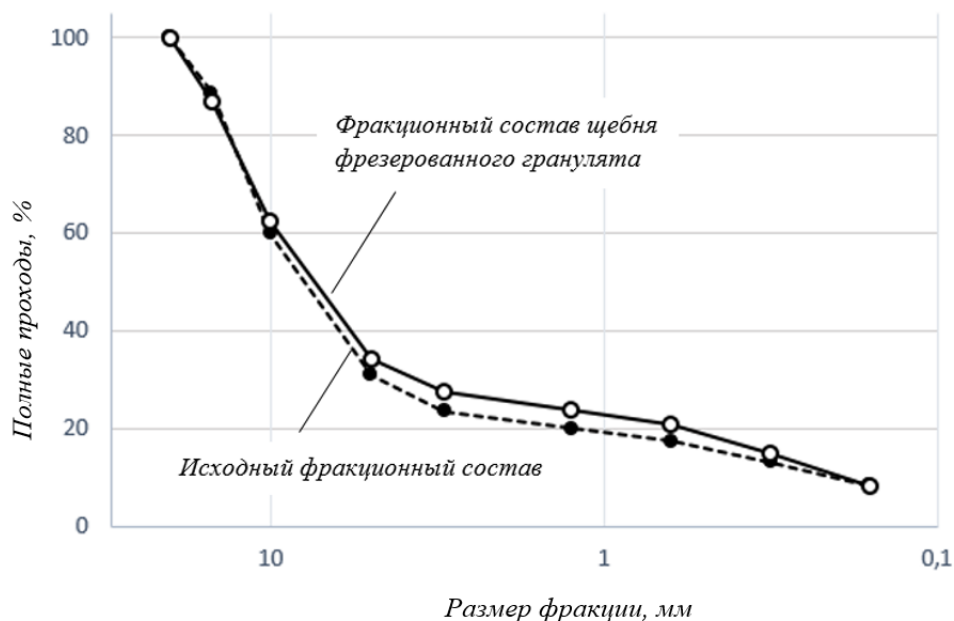


Рисунок 4 – Суммарные кривые гранулометрического состава каменной фракции исходного материала и фрезерованного гранулята
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Summery curves of the stone fraction granulometric composition of the starting material and milled granulate
Source: compiled by the authors.

Учет площади новых поверхностей асфальтобетонного гранулята необходимо производить с учетом того, что часть этих поверхностей образована поверхностями дробленого щебня. С учетом этого площадь новых поверхностей асфальтобетонного гранулята необходимо рассчитывать в виде

$$S_1 = S_c - (S_3 - S_2), \quad (16)$$

где S_c – полная (суммарная) площадь новых поверхностей всех фракций асфальтобетонного гранулята.

Анализ суммарной гранулометрической кривой фрезерованного гранулята (рисунок 5) показывает нелинейное распределение различных фракций по степени измельчения. Беглый взгляд на результаты сита гранулята

(таблица 2) позволяет сделать вывод о том, что наиболее представительными фракциями являются зерна гранулята с размерами от 4 до 16 мм, что и определяется размерами каменной фракции асфальтобетона. Большие размеры зерен гранулята являются конгломератами из нескольких зерен каменной фракции с не разрушившимися битумными связями.

Однако любопытно, что фракции менее четырех и особенно менее двух миллиметров, которые от общей массы составляют не более 10%, образуют наибольшую удельную площадь новой поверхности. Можно ожидать, что значительная часть энергии процесса фрезерования расходуется именно на образование этой, совершенно ненужной даже для вторичного использования, фракции.

Таблица 1

Результаты сита каменной фракции исходного образца материала и фрезерованного асфальтобетонного гранулята, полученного после выжигания образцов
Источник: составлено авторами.

Table 1

Stone fraction sieving results of the initial material sample and milled asphalt concrete granulate obtained after burning the samples.
Source: compiled by the authors.

Размер сита, мм	Полные проходы образца № 1, %	Полные проходы образца № 2, %	Разность (степень измельчения, %)	Средний размер фракции, мм	Удельная поверхность соответствующей фракции, м ² /кг	Расчетная площадь новых поверхностей на один м ³ материала, м ² /м ³
20	100	100	0	17,5	0,320	–
15	88,77	87,14	-1,63	12,5	0,458	–
10	59,86	62,42	2,56	7,5	0,789	48,5
5	30,89	34,31	3,42	4	1,542	126,6
3	23,58	27,48	3,9	2,125	3,024	283,1
1,25	19,95	23,81	3,86	0,94	7,209	667,9
0,63	17,39	20,73	3,34	0,4725	14,99	1202,3
0,315	13,1	15,08	1,98	0,2375	31,20	1482,9
0,16	8,35	8,19	-0,16	0,08	99,42	–

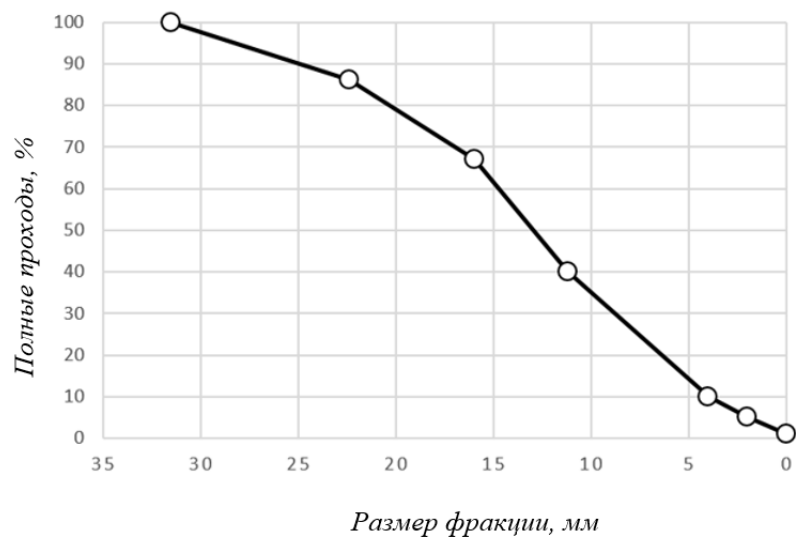


Рисунок 5 – Кривая гранулометрического состава асфальтобетонного гранулята
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – The granulometric composition curve of asphalt concrete granulate.
Source: compiled by the authors.

Таблица 2
Результаты отсева асфальтобетонного гранулята и расчетные значения удельных значений
площади поверхности материала для различных фракций
Источник: составлено авторами.

Table 2
Asphalt concrete granulate sieving results and calculated data of specific values
of the material surface area for various fractions
Source: compiled by the authors.

Размер сита, мм	Полные проходы, %	Средний размер фракции, мм	Частные остатки, %	Удельная поверхность соответствующей фракции, м²/кг	Расчетная площадь новых поверхностей гранулята на 1 м³ асфальтобетонной смеси
31,5	100	26,95	14	0,202	465,0
22,4	86	19,2	19	0,29	667,3
16	67	13,6	27	0,4189	963,4
11,2	40	7,6	30	0,778	1790,4
4	10	3	5	2,095	4818,3
2	5	1	5	6,75	15525

Суммарная удельная площадь поверхности гранулята, согласно таблице 2, соответствует значению $24,23 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{м}^3$. С учетом формулы (16) значение удельной площади асфальтобетонного гранулята, образованной только разрушением битумных связей, равно $20,42 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

Для определения энергии на разрушение битумных связей были испытаны три стандартных образца диаметром 71,4 мм и длиной 71,4 мм на разрушение при расколе (см. рису-

нок 1, г). Результаты испытаний представлены в таблице 3. Удельная энергия рассчитана для значения усредненного коэффициента формы поверхности $a_{cp} = 2,1$.

Полученное таким образом в ходе эксперимента значение энергии, затрачиваемой на образование новой поверхности единичной площади, получается на порядок (почти в 9 раз) выше, чем при дроблении каменной фракции.

Таблица 3
Результаты испытания образцов на растяжение при расколе и расчетные значения удельной энергии на разрушение битумных связей
Источник: составлено авторами.

Table 3
Samples' tensile testing results during splitting and calculated values of specific energy for the destruction of bitumen bonds
Source: compiled by the authors.

Образец	Разрушающая сила, Н	Предельная деформация образца, мм	Работа на разрушение образца, Дж	Удельная работа Дж/ м²
1	18177	1,495	13,59	1269,2
2	18715	1,419	13,28	1240,3
3	18123	1,57	14,23	1328,9
среднее значение	18338	1,494667	13,70	1279,4

Таблица 4
Структура удельных затрат энергии при фрезеровании асфальтобетона
Источник: составлено авторами.

Table 4
The structure of specific energy consumption in asphalt concrete milling
Source: compiled by the authors.

Удельная энергия,				МДж/м3	%
затрачиваемая на рабочий процесс фрезерования асфальтобетона в целом	затрачиваемая на образование новых поверхностей	затрачиваемая на разрушение каменной фракции		0,5526	1,37
		затрачиваемая на разрушение битумных связей	образование гранулята, размером более 4 мм (90% по массе)	4,19	10,3
			образование гранулята, размером менее 4 мм (10% по массе)	21,93	54,4
			сумма	26,1	64,7
		сумма		26,65	66,14
	затрачиваемая на другие процессы		13,65	33,86	
	суммарная		40,3	100	

Для усредненного значения толщины срезаемой стружки, значение которого было принято 2,5 мм, приведем сравнительный анализ затрат энергии в процессе фрезерования асфальтобетона (таблица 4).

Ввиду существенной количественной разницы затрачиваемой энергии на разрыв битумных связей при образовании частиц более и менее четырех миллиметров эти затраты приведены отдельно и суммарно.

Энергия, необходимая для образования новых поверхностей в материале, составляет 6,14 % от полных затрат энергии. Эту ве-

личину отметим как коэффициент полезного действия, рассчитанный по формуле (1) и выраженный в процентах. Однако еще раз оговоримся, что поскольку для задачи удаления материала не требуется большой степени измельчения, указанное значение коэффициента полезного действия не может в полной мере характеризовать эффективность рабочего процесса фрезерования.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гранулометрическое исследование материала позволило получить ряд относительно

новых и, возможно, неожиданных результатов, которые позволяют рассмотреть рабочий процесс фрезерования асфальтобетона с других позиций и выявить пути совершенствования рабочих органов фрезерных машин. Еще раз отметим, что все результаты исследования относятся только к щебеночно-мастичным асфальтобетонам, имеющим выраженную контактную структуру. Для других типов асфальтобетонных возможно получение иных результатов.

Перечислим некоторые важные выводы:

- каменная фракция асфальтобетона подвергается разрушению в процессе фрезерования;

- в процессе разрушения каменной фракции происходит увеличение содержания частиц щебня, размером от 0,3 до 10 мм за счет разрушения более крупной фракции;

- разрушение битумных связей при фрезеровании асфальтобетона приводит к образованию асфальтобетонного гранулята, в котором более всего представлены фракции с размерами 4–16 мм;

- удельная энергия на разрушение битумных связей между зернами асфальтобетона существенно выше удельной энергии, необходимой для разрушения каменного наполнителя, несмотря на то, что прочность щебня (особенно применяемого для щебеночно-мастичного асфальтобетона) существенно выше структурной прочности асфальтобетона и тем более битумных пленок. Таким образом, решение задачи обоснования энергетических параметров фрезерных машин не может быть решено только на основе определения прочностных показателей материала;

- доля затрат энергии, направленной на разрушение каменной фракции при фрезеровании материала, относительно не велика, и в данном исследовании составила всего 1,37% от общих затрат энергии;

- наибольшая часть энергии в процессе фрезерования приходится на разрушение битумных связей в асфальтобетоне. В данном исследовании эта часть энергии составляет 64,7% от общих затрат энергии;

- следует отметить, что более половины всей энергии, затрачиваемой на рабочий процесс фрезерования, приходится на разрушение битумных связей с образованием гранулята размером до 4 мм. При этом его масса не превышает 10% от общей массы гранулята. Существенное повышение эффективности процесса фрезерования возможно при количественном снижении этой фракции;

- потери энергии на трение, уплотнение, перемещение частиц и других процессов, не связанных с образованием новых поверхностей, являются также значимыми и в данном исследовании составляют 33,86%;

- более 80% от общей энергии, затрачиваемой на процесс фрезерования, затрачивается на процессы чрезмерного измельчения материала и на процессы, не связанные напрямую с измельчением асфальтобетона. Совершенствование конструкций отдельных режущих элементов и рабочих органов дорожных фрез, позволяющее снизить значение этого показателя, имеет существенный экономический, экологический и социальный потенциал.

Гранулометрическое исследование материала как инструмент косвенной оценки эффективности рабочего процесса фрезерования асфальтобетона является перспективным методом. Безусловно, такой анализ требуется провести для оценки эффективности фрезерования других представительных марок асфальтобетона.

Определение энергетической эффективности рабочего процесса фрезерования на основе гранулометрического исследования может послужить дешевым и оперативным методом оценки технического состояния машины в целом, а также методом оценки конструкции рабочего органа и эффективности выбора технологических режимов ее работы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сиваченко Л.А., Сиваченко Т.Л. Технологическое машиностроение – инновационный резерв мировой экономики: монография. Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2017. 254 с.: ил.
2. Власенко Д.А., Левченко Э.П. Математическое моделирование и повышение эффективности ударных роторных дробилок с комбинированным подвесом молотков: монография. Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2020. 143 с.
3. Шевченко А.Ф. Пути интенсификации процесса помола цемента // Вопросы химии и химической технологии. 2008. № 5. С. 129–137.
4. Сиваченко Л.А. Современное технологическое машиностроение: резервы развития // Инженер-механик. 2011. № 1. С. 11–21.
5. 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.
6. Карошкин А.А., Краснотудский А.В. Определение энергоемкости процесса фрезерования фрезой со сложным движением зуба // Изв. ТулГУ. Подъемно-транспортные машины и оборудование. Тула, 2003. Вып. 4. С. 167–173.

7. Cundall P.A. A computer model for simulating progressive largescale movements in blocky rock systems. In: *Proceedings of the Symposium of International Society of Rock Mechanics*, v.1, Nancy: France; 1971. Paper No. II–8

8. Liqun Zhou, Yi Liu, Zhennan Wang et al. Numerical analysis of asphalt concrete milling process based on multicomponent modeling, 09 July 2020, PREPRINT (Version 1) available at Research Square [<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-39326/v1>].

9. Petrescu MG, Dumitru T, Laudacescu E, Tănase M. Experimental Investigation and Numerical Analysis Regarding the Influence of Cutting Parameters on the Asphalt Milling Process. *Materials* (Basel). 2024 Jul 13; 17(14): 3475. doi: 10.3390/ma17143475. PMID: 39063767; PMCID: PMC11278129.

10. Dumitru, T.; Petrescu, M.G.; Tănase, M.; Ilincă, C.N. Multi-Response Optimization Analysis of the Milling Process of Asphalt Layer Based on the Numerical Evaluation of Cutting Regime Parameters. *Processes* 2023, 11, 2401. <https://doi.org/10.3390/pr11082401>.

11. Wu, J., Zhang, B., Wu, C., Shu, Z., Li, S. et al. (2021). Discrete element simulation of asphalt pavement milling process to improve the utilization of milled old mixture. *Journal of Renewable Materials*, 9(5), 993–1011. <https://doi.org/10.32604/jrm.2021.014304>

12. Griffith A.A. The theory of rupture. *Proc. Ict. Int. Congr. Appl. Mech // Delft*. 1924. p. 55–63.

13. Orowan E. Fracture and strength of solids. *Repts. Progn. Phis.*, 1948. 49. № 12. p. 185–232.

14. Irwin G.R. Analysis of stresses and strains near the end of crack traversing a plate // *J. Appl. Mech*. 1957. Vol. 24. № 3. 1957. P. 361–364.

15. Романюк В.Н. Экспериментальная оценка влияния состава асфальтобетонной смеси. *Энергетика // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2003; (4): 69–76. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2003-0-4-69-76>

16. Симонов П.С. Экспериментальное исследование дробления горной породы единичным ударом // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020. № 1. С. 71–79. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-71-79.

17. Голик В.И. [и др.]. Исследование свойств горных пород при дроблении и измельчении в механических мельницах // *Известия УГГУ*. 2021. Вып. 2 (62). С. 81–87. DOI 10.21440/2307-2091-2021-2-81-87

18. Винников В.А., Павлов И.А. Изменение коэффициента трещиностойкости горных пород при умеренном тепловом воздействии // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024. № 3. С. 5–16. DOI: 10.25018/0236-1493-2024-3-0-5.

19. Фурманов Д.В., Чижов В.С., Лысаков Н.Э. Экспериментальное определение сил сопротивления резанию при разрушении асфальтобетона единичным режущим элементом // *Вестник СибАДИ*. 2020; 17(2): 196–207. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-196-207>

20. Фурманов Д.В., Лысаков Н.Э., Шамахов Л.М. Экспериментально-аналитическое обоснование процесса резания асфальтобетона рабочим оборудованием дорожной фрезы // *Вест-*

ник СибАДИ. 2022; 19(2): 170–182. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-170-182>

REFERENCES

1. Sivachenko L.A., Sivachenko T.L. *Technological mechanical engineering – the innovative reserve of the world economy: monograph*. Mogilev: Belarusian. Russian University, 2017: 254. (Russ.)

2. Vlasenko D.A., Levchenko E.P. *Mathematical modeling and increasing the efficiency of impact rotary crushers with combined suspension of hammers: monograph*. Alchevsk: State Educational Institution of the LPR “DonGTU”, 2020: 143. (Russ.)

3. Shevchenko A.F. Ways to intensify the cement grinding process. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2008; 5: 129–137. (Russ.)

4. Sivachenko L.A. Modern technological engineering: reserves of development. *Mechanical engineer*. 2011; 1: 11–21. (Russ.)

5. Sakhapov R.L., Makhmutov M.M. Influence of the studied factors on milling power. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2015; Volume 17, No. 2(4): 896–899. (Russ.)

6. Karoshkin A.A., Krasnoludsky A.B. Determination of the energy intensity of the milling process with a milling cutter with a complex tooth movement. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU) Lifting and transport machinery and equipment*. Tula. 2003; Issue 4: 167–173. (Russ.)

7. Cundall P.A. A computer model for simulating progressive largescale movements in blocky rock systems. In: *Proceedings of the Symposium of International Society of Rock Mechanics*, v.1, Nancy: France; 1971. Paper No. II–8

8. Liqun Zhou, Yi Liu, Zhennan Wang et al. Numerical analysis of asphalt concrete milling process based on multicomponent modeling, 09 July 2020, PREPRINT (Version 1) available at Research Square. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-39326/v1>.

9. Petrescu MG, Dumitru T, Laudacescu E, Tănase M. Experimental Investigation and Numerical Analysis Regarding the Influence of Cutting Parameters on the Asphalt Milling Process. *Materials* (Basel). 2024 Jul 13; 17(14): 3475. doi: 10.3390/ma17143475. PMID: 39063767; PMCID: PMC11278129.

10. Dumitru, T.; Petrescu, M.G.; Tănase, M.; Ilincă, C.N. Multi-Response Optimization Analysis of the Milling Process of Asphalt Layer Based on the Numerical Evaluation of Cutting Regime Parameters. *Processes* 2023, 11, 2401. <https://doi.org/10.3390/pr11082401>.

11. Wu, J., Zhang, B., Wu, C., Shu, Z., Li, S. et al. (2021). Discrete element simulation of asphalt pavement milling process to improve the utilization of milled old mixture. *Journal of Renewable Materials*, 9(5), 993–1011. <https://doi.org/10.32604/jrm.2021.014304>

12. Griffith A. A. The theory of rupture. *Proc. Ict. Int. Congr. Appl. Mech. Delft*. 1924: 55–63.

13. Orowan E. Fracture and strength of solids. *Repts. Progn. Phis.*, 1948; 49, № 12: 185–232.

14. Irwin G.R. Analysis of stresses and strains near the end of crack traversing a plate. *Mech*. 1957; Vol. 24. No 3: 361–364.

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

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

17. Golik V.I. et al. Research of the properties of rocks during fragmenting and crushing in mechanical mills. *News of the Ural State Mining University*. 2021; Issue 2(62): 81–87 (in Russ.) DOI 10.21440/2307-2091-2021-2-81-87

18. Vinnikov V. A., Pavlov I. A. Change in fracture toughness of rocks under moderate thermal effect. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024; (3): 5–16. [In Russ]. DOI: 10.25018/ 0236-1493-2024-3-0-5

19. Furmanov D.V., Chizhov V.S., Lysakov N.E. Experimental determination of cutting resistance forces during destruction of asphalt concrete by a single cutting element. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(2): 196–207. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-196-207>

20. Furmanov D.V., Lysakov N.E., Shamaikhov L.M. Experimental and analytical justification of the asphalt concrete cutting process by road milling machines working equipment. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19(2): 170–182. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-170-182>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

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

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

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Furmanov D.V. Organization of the author's team work, formulation of the research problem, the direction of study, tasks' setting, selection of the research methodology, preparing of the article material.

Budanova E.S. Review of previous surveys, preparation and conduction of experimental studies, processing of the obtained data, getting individual results 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., 88).

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

SPIN-код: 6237-2284,

e-mail: denis_furmanov@mail.ru

Буданова Екатерина Сергеевна – старший преподаватель кафедры «Инфраструктура и транспорт» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88).

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

SPIN-код: 7600-9464.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

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

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

SPIN-code: 6237-2284,

e-mail: denis_furmanov@mail.ru

Budanova Ekaterina S. – Senior Lecturer at the Department of Infrastructure and Transport Yaroslavl State Technical University (88, Moskovskii Proezd, Yaroslavl, 150023).

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

SPIN-code: 7600-9464.

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT



ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКРЕТНОГО ПОДХОДА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТРАНСПОРТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЛОГИСТИКИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Е.Е. Витвицкий¹ ✉, Е.С. Галактионова¹, Н.И. Юрьева²

¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)

г. Омск, Россия

²ООО «Магнит»,

г. Омск, Россия

✉ ответственный автор

vitvitsky_ee@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Рост территории городов стал причиной необходимости переноса полигонов утилизации твердых коммунальных (бытовых) отходов (ТКО) в более удаленные места на новые площадки. Существенным фактором являются представления и подходы к планированию перевозок грузов, отдельное планирование отдельных заявок не позволяет с достаточной точностью определить результаты будущей работы, поскольку такой подход не позволяет учесть наличие взаимодействия подвижного состава с разных маршрутов между собой и погрузочными машинами. Целью исследования является проектирование перевозок ТКО в областном сообщении на основе дискретного подхода и теоретических положений оперативного планирования грузовых автомобильных перевозок.

Материалы и методы. В рамках проведенного исследования применялся нормативный подход при планировании затрат на перевозку грузов и дескриптивные модели описания функционирования автотранспортных систем областных автомобильных перевозок грузов.

Результаты обсуждения. Решение задач по проектированию перевозок грузов, в том числе и в областном сообщении, обусловлено необходимостью заблаговременно, до опыта знания результатов будущей деятельности, поскольку работу автомобильного транспорта накопить, а потом исправить, невозможно. Результаты перевозок грузов зависят от множества факторов, в том числе от наличия методики проектирования, позволяющей адекватно отобразить процессы их выполнения. Применение математического моделирования позволило достоверно построить планы перевозки ТКО и определить величины затрат на их реализацию.

Заключение. Выявлено, что возможные простои, как автопоездов, так и экскаваторов, являются причиной невыполнения оперативного плана перевозок, определенного отдельным планированием. Использование одного и того же подвижного состава для клиентов с различными расстояниями перевозок на территории области будет сопровождаться разными затратами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: твердые коммунальные отходы, областное сообщение, грузовые автомобильные перевозки, план перевозок грузов, методика проектирования, затраты на перевозку

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

Статья поступила в редакцию 03.11.2024; одобрена после рецензирования 11.12.2024; принята к публикации 16.12.2024.

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: Витвицкий Е.Е., Галактионова Е.С., Юрьева Н.И. Применение дискретного подхода при проектировании транспортной составляющей логистики твердых коммунальных отходов // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 868-881. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-868-881>

© Витвицкий Е.Е., Галактионова Е.С., Юрьева Н.И., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-868-881>
EDN: PTEEJX

APPLICATION OF A DISCRETE APPROACH TO DESIGNING THE TRANSPORT COMPONENT OF MUNICIPAL SOLID WASTE LOGISTICS

Evgeny E. Vitvitsky¹ ✉, Elena S. Galaktionova¹, Natalya I. Yuryeva²

¹The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),

Omsk, Russia

²Magnit LLC

Omsk, Russia

✉ corresponding author
vitvitsky_ee@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The growth of the urban area has led to the need to transfer landfills for the disposal of solid municipal (household) waste (MSW) to more remote locations on new sites. Representations and approaches to cargo transportation planning are an essential factor, separate planning of individual applications does not allow determining the results of future work with sufficient accuracy, since such an approach does not allow taking into account the interaction of rolling stock from different routes with each other and loading machines. The purpose of the study is to design the transportation of MSW in regional communications based on a discrete approach and theoretical provisions of operational planning of road freight transportation.

Materials and methods. Within the framework of the conducted research, a normative approach was applied to the planning of freight transportation costs and descriptive models for describing the functioning of road transport systems of regional road freight transportation.

Results and discussion. The solution of tasks related to the design of cargo transportation, including in regional communications, is due to the need in advance, prior to experience, knowledge of the results of future activities, since it is impossible to accumulate the work of road transport and then fix it. The results of cargo transportation depend on many factors, including the availability of a design methodology that allows you to adequately reflect the processes of their implementation. The use of mathematical modeling made it possible to reliably build plans for the transportation of MSW and determine the cost of their implementation.

Conclusion. It has been revealed that possible downtime of both road trains and excavators is the reason for not fulfilling the operational transportation plan defined by separate planning. The use of the same rolling stock for customers with different transportation distances in the region will be accompanied by different costs.

KEYWORDS: solid municipal waste, regional communication, freight road transportation, cargo transportation plan, design methodology, transportation costs

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest. Vitvitsky E.E. member of the editorial board of the journal *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. The journal "The Russian Automobile and Highway Industry Journal" does not exempt scientists from reviewing the manuscript, regardless of their status.

The article was submitted: 03.11.2024; **approved after reviewing:** 11.12.2024; **accepted for publication:** 16.12. 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. Vitvitsky E.E., Galaktionova E.S., Yuryeva N.I. Application of a discrete approach to designing the transport component of municipal solid waste logistics. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): 868-881. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-868-881>

© Vitvitsky E.E., Galaktionova E.S., Yuryeva N.I., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Проблема борьбы с отходами жизнедеятельности является актуальной во всем мире. И в каждом государстве предпринимаются попытки ее решения, что определяет значительное количество трудов, посвященных изучению различных аспектов. Одним из таких аспектов являются различные вопросы, связанные со сбором и вывозом твердых коммунальных отходов (ТКО), таких как, маршрутизация, выбор подвижного состава, построение расписания работы самосвалов, определение затрат на перевозку в условиях города, области, при наличии или отсутствии заводов по переработке ТКО и пр. Решению любой задачи должно предшествовать изучение уже существующих исследований, отечественных и зарубежных, посвященных изучаемому вопросу. Однако при решении этой задачи в рамках каждого государства необходимо руководствоваться принятыми в нем законами, постановлениями, актами и другими документами, определяющими правила осуществления того или иного вида деятельности. Результаты такого изучения позволяют установить успешность применения тех или иных подходов к решению поставленной задачи, и определить ее ограничения. В процессе решения выявляются элементы, препятствующие бесперебойному протеканию изучаемого процесса и, как следствие,

отрицательно влияющие на затраты по его реализации.

Острота поставленного вопроса определила необходимость изучения его учеными с различных сторон. Ряд работ посвящен вопросам технологии утилизации ТКО и проблемам их переработки, в том числе экологическим. Особенности утилизации ТКО с применением различных методов и получение полезных эффектов утилизации, с учетом экологических проблем, изучаются в работах А.Н. Баркова и И.О. Кирильчука¹, С.А. Кирсанова и Г.В. Мустафина [1], Е.Е. Степаненко, О.А. Поспеловой и Т.Г. Зеленской [2], Д.А. Шаповалова, Р.Н. Холина и У.Е. Скоробогатовой [3], Г.М. Шулятьевой², Е.Н. Пирогова и Д.В. Кабанова³, А.А. Калютника, Д.А. Трещева и Д.Л. Поздеева⁴, Ы.У. Ыдрыскызы и В.Е. Мессерле⁵, А. Taşkın и N. Demir [4]. Установлению связи между социальными и экономическими аспектами вывоза ТКО, изучению механизмов финансирования обращения с ТКО, особенностям расчета экономического эффекта от переработки ТКО, стоимости сбора и переработки твердых бытовых отходов уделяется внимание в статьях Я.Г. Шадрина и Е.В. Кузнецовой⁶, Е.М. Акимовой и Д.А. Семернина [5], А.В. Тулохоновой и О.В. Улановой⁷, N.V. Karadimas, N. Doukas, M. Kolokathi, и G. Defteraio [6], P.A. Koushki, U. Al-Duaij и W. Al-Ghimlas [7]. В других статьях изучаются вопросы государственного регулирования и управления в сфере обращения с ТКО, а именно

¹ Барков А.Н., Кирильчук И.О. Проблема утилизации твердых бытовых отходов // Прогрессивные технологии и процессы. Сборник научных статей II Международной молодежной научно-практической конференции: в 3-х томах. Том 1. Ответственный редактор: Горохов А.А. 2015. С. 117–120.

² Шулятьева Г.М. Актуальность учета различной скорости разложения твердых бытовых отходов при их селективном сборе и утилизации // Управленческий учет. 2021. №. 5-2. С. 542-547. https://elibrary.ru/download/elibrary_46150905_26306130.pdf (дата обращения: 02.10.2024)

³ Пирогов Е.Н., Кабанов Д.В. Утилизация твердых бытовых отходов путём мусоросжигания // Технические и естественные науки: сборник избранных статей по материалам Международной научной конференции. 2020. С. 100-102. https://elibrary.ru/download/elibrary_42534768_92063424.pdf (дата обращения: 02.10.2024)

⁴ Калютник А.А., Трещев Д.А., Поздеева Д.Л. Утилизация твердых бытовых отходов на ТЭЦ г. Санкт-Петербурга // Глобальная энергия. 2019. Т. 25, №. 3. С. 59–70. https://elibrary.ru/download/elibrary_41302194_75218636.pdf (дата обращения: 02.10.2024)

⁵ Ыдрыскызы Ы.У., Мессерле В.Е. Получение синтез-газа из твердых бытовых отходов с помощью процесса пиролиз // Universum: технические науки. 2021. №. 4-5 (85). С. 18–23. https://elibrary.ru/download/elibrary_45800303_51738107.pdf (дата обращения: 02.10.2024)

⁶ Шадрин Я.Г., Кузнецова Е.В. Эколого-экономическая эффективность утилизации твердых бытовых отходов // Отходы и ресурсы. 2019. Т. 6, №. 2. С. 8-8. https://elibrary.ru/download/elibrary_39492275_51953713.pdf (дата обращения: 02.10.2024)

⁷ Тулохонова А.В., Уланова О.В. Социально-экономическая оценка систем управления твердыми бытовыми отходами // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2012. №. 9 (45). С. 44. https://elibrary.ru/download/elibrary_18850979_32880074.pdf (дата обращения: 02.10.2024)

авторов О.И. Лихачевой и П.М. Советова⁸, А.А. Курочкиной и А.А. Чалгановой⁹, Е.А. Иванцовой¹⁰, определяются перспективы развития в работе В.Ю. Конюхова, И.И. Галютдинова и И.Н. Бугушкиновой¹¹, в статье И.В. Елисеевой анализируется государственное законодательство [8]. Также вопросы управления рассматриваются в исследованиях Y. Geng, F. Tsuyoshi и X. Chen [9] и Y. Zhang, G.H. Huang и L. He [10]. В работах А.А. Чалгановой¹², М.Л. Казаряна, А.А. Рихтера, М.А. Шахрамьяна и Р.Д. Недкова [11], Б.М. Тошмаматова, Г.Н. Узакова и С.Р. Баратовой¹³, Н.Ю. Арипова [12], С.В. Кашникова [13] и др. Исследованы вопросы цифровизации, космического мониторинга в сфере обращения с ТКО, переработки ТКО с использованием солнечной энергии и городской системы канализации и пр. Предложены модель оптимизации размещения заводов по переработке ТКО в исследовании И.Х. Османова [14] и модель задачи размещения-маршрутизации твердых бытовых отходов с промежуточными станциями перевалки в статье Н. Asefi, S. Lim [15], Н. Asefi, S. Lim и М. Maghrebi [16]. К.В. Щурин и Е.О. Егорова¹⁴ рассматривают вопросы, связанные с транспортировкой твердых бытовых отходов на

основе мультимодальных технологий, той же проблеме посвящена и работа D. Inghels, W. Dullaert и D. Vigo [17]. Вопросы оптимизации маршрутов сбора и транспортировки отходов на основе применения методов целочисленного программирования рассмотрены авторами S. Das и B.K. Bhattacharyya [18], интеграции ГИС-анализа и агентной модели K. Nguyen-Trong, A. Nguyen-Thi-Ngoc, D. Nguyen-Ngoc и V. Dinh-Thi-Hai [19], применения ГИС-приложений V. Sanjeevi и P. Shahabudeen [20]. Особенности различных математических подходов к оценке эффективности сбора и транспортировки твердых бытовых отходов (ТБО) в городских центрах изучены в работах V. Yadav и S. Karmakar [21] и R. Alam, M.A.I. Chowdhury, G.M.J. Hasan, B. Karanjit и L.R. Shrestha [22]. Следует отметить, что при перевозке ТКО можно использовать методы и подходы, разработанные для применения при перевозках любых грузов. Так, в работе И.В. Погуляевой¹⁵ представлены модели описания функционирования автотранспортных систем перевозки грузов во внутриобластном сообщении, статья В.А. Бахтина и др. [23] посвящена оптимизации перевозок однородной продукции между складами. Работы Н.И. Юрьевой и Е.Е. Витвицкого¹⁶ [24]

⁸ Лихачева О.И., Советов П.М. Методологические аспекты управления сферой обращения с твердыми бытовыми отходами // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2017. №. 4 (52). С. 111–127. https://elibrary.ru/download/elibrary_29899463_91592385.pdf (дата обращения: 02.10.2024)

⁹ Курочкина А.А., Чалганова А.А. Направления совершенствования системы обращения твердых бытовых отходов в России // Стратегии развития предпринимательства в современных условиях: сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2018. С. 72–75. https://elibrary.ru/download/elibrary_34984110_16278359.pdf (дата обращения: 02.10.2024)

¹⁰ Иванцова Е.А. Проблемы и перспективы управления твердыми бытовыми отходами // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 3: Экономика. Экология. 2016. №. 2 (35). С. 148–159. https://elibrary.ru/download/elibrary_26471243_92756936.pdf (дата обращения: 02.10.2024)

¹¹ Конюхов В.Ю., Галютдинов И.И., Бугушкинова И.Н. Методы и перспективы использования твердых бытовых отходов // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2019. №. 6. С. 11–11. https://elibrary.ru/download/elibrary_41312024_30964333.pdf (дата обращения: 02.10.2024)

¹² Чалганова А. А. Направления цифровой трансформации сферы обращения твердых бытовых отходов // Вызовы цифровой экономики: условия, ключевые институты, инфраструктура: сборник статей I Всероссийской научно-практической конференции. 2018. С. 187–189. https://elibrary.ru/download/elibrary_34922305_30229623.pdf (дата обращения: 02.10.2024)

¹³ Тошмаматов Б.М., Узаков Г.Н., Баратова С.Р. Утилизация твердых бытовых отходов с использованием солнечной энергии // Научные горизонты. 2019. №. 2. С. 255–260. https://elibrary.ru/download/elibrary_37030690_46225716.PDF (дата обращения: 02.10.2024)

¹⁴ Щурин К.В., Егорова Е.О. Анализ отечественного и зарубежного опыта логистических операций с твердыми бытовыми отходами // Перспективы, организационные формы и эффективность развития сотрудничества российских и зарубежных ВУЗов: сборник материалов VII Ежегодной международной научной конференции (10–11 апреля 2019 г., Научноград Королев, Московская область). М.: Издательство «Научный консультант», 2019. С. 592–600. https://elibrary.ru/download/elibrary_42435508_23382394.pdf (дата обращения: 02.10.2024)

¹⁵ Погуляева И. В. Описание функционирования автотранспортных систем во внутриобластном сообщении: дис. канд. техн. наук: 05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта. Волгоград. 2006. 127 с.

¹⁶ Юрьева Н.И., Витвицкий Е.Е. Электронная база данных» Справочные и нормативные материалы по автомобильному транспорту» // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов // Наука и образование. 2015. №. 5. С. 66–66. <https://elibrary.ru/item.asp?id=23613956> (дата обращения: 02.10.2024)

позволяют обосновать размер затрат на перевозки в некоторых автотранспортных системах перевозок грузов.

Результаты анализа позволяют констатировать, что труды отечественных и зарубежных ученых в большей мере посвящены задачам переработки отходов либо нацелены на совершенствование вопросов управления системой сбора и переработки ТКО в логистике твердых коммунальных отходов. Экономические вопросы, безусловно, также не остаются без внимания, однако в отечественных трудах основное значение уделяется финансированию, экономическим результатам обращения и переработке отходов, более же частные элементы этих процессов, такие как оптимизация сбора и вывоза ТКО и определение затрат, связанных с этим видом деятельности, рассматриваются реже, в отличие от зарубежных ученых, которые весьма внимательно относятся к вопросам оптимизации маршрутов сбора и вывоза отходов, рассматривая варианты решения на примере различных городов с применением ГИС-приложений, агентных моделей, организационных решений, таких как создание промежуточных накопительных станций и т.п. При этом следует отметить, что в большинстве своем эти статьи посвящены перевозкам в городских условиях. В то же время труды отечественных ученых в сфере грузовых автомобильных перевозок позволяют применять их результаты при изучении вопросов перевозки ТКО.

Возможно, менее значительное внимание, уделяемое отечественными исследователями вопросам перевозки ТКО и расчету затрат на осуществление этих процессов, связано с тем, что ранее задача борьбы с ТКО решалась на государственном уровне, и существовала система постановлений и стандартов, регламентирующих процессы сбора, вторичной переработки и захоронения ТКО¹⁷.

Согласно ГОСТ 19433–74¹⁸, все грузы по степени опасности подразделялись на 9 классов, ТКО относятся к 9-му классу. Перевозка опасных грузов регулировалась инструкцией о порядке перевозки опасных грузов автомобильным транспортом № 371 от 20.11.1980 г.¹, в которой оговаривались требования к перевозке грузов всех классов опасности, кроме 9-го. Грузы этого класса опасности должны были перевозиться согласно правилам перевозки грузов¹⁹, с применением специализированного подвижного состава. Затраты на перевозку рассчитывались в соответствии с методикой Трансфинплана²⁰. В настоящее время в России построение системы утилизации и вторичной переработки ТКО было начато заново²¹. В 1998 г. был принят Федеральный закон²², а в 2014 г. предпринята так называемая «мусорная» реформа²³, согласно которой в регионах РФ необходимо разработать «территориальную схему обращения с отходами производства и потребления», где описываются «системы организации и осуществления деятельности по сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвре-

¹⁷ Министерство Внутренних Дел СССР (1980) Приказ Министерства Внутренних Дел СССР «Инструкция о порядке перевозки опасных грузов автомобильным транспортом», № 371 20 ноября 1980 года, Москва. Министерство жилищно-коммунального хозяйства РСФСР (1974) Методические рекомендации Министерства жилищно-коммунального хозяйства РСФСР «Методические рекомендации по организации сбора и вывоза пищевых отходов», 20 января 1974 года, Москва. Министерство здравоохранения СССР (1984) Приказ Министерства здравоохранения СССР «Порядок накопления, транспортировки, обезвреживания и захоронения токсичных промышленных отходов (санитарные правила)», № 3183-84 29 декабря 1984 года, Москва.

¹⁸ ГОСТ 19433–74. Комитет стандартов, мер измерительных приборов при Совете министров СССР. М.: 1974.

¹⁹ Правила перевозок грузов автомобильным транспортом [Текст]: изд. в соотв. с Уставом автомобильного транспорта РСФСР / Сост. В.В. Коноплин, Д.И. Половинчик, А.Н. Просолова, В.В. Иванов; ред. Г.Д. Тишина. 2-е изд., с изм. и доп. М.: Транспорт, 1984. 167 с.

²⁰ Трансфинплан автотранспортного объединения, предприятия [Текст] / М.Д. Столярова, В.И. Кузнецов, Т.А. Толмаджова и др. М.: Транспорт, 1984. 215 с.

²¹ Черп О.М., Виниченко В.Н. Проблема твердых бытовых отходов: комплексный подход. М: Эколайн-Ecologia. 1996. 43 с. [https://www.waste.ru/uploads/library/o.m.cherp_v.n.vinichenko._problema_tverdyx_bytovyx_otxodov._kompleksnyj_podhod_\(1996\)\(ru\).pdf](https://www.waste.ru/uploads/library/o.m.cherp_v.n.vinichenko._problema_tverdyx_bytovyx_otxodov._kompleksnyj_podhod_(1996)(ru).pdf) (дата обращения: 02.10.2024)

²² Федеральный закон Правительства Российской Федерации «Об отходах производства и потребления», № 89-ФЗ 24 июня 1998 года, Москва.

²³ Федеральный закон Правительства Российской Федерации «О внесении изменений в Федеральный закон «Об отходах производства и потребления», отдельные законодательные акты Российской Федерации и признании утратившими силу отдельных законодательных актов (положений законодательных актов) Российской Федерации», № 458-ФЗ 29 декабря 2014 года, Москва.

живанию, захоронению отходов, в том числе ТКО, образующиеся на территории субъекта Российской Федерации, и направления ее развития на определенный период»²⁴. Также в соответствии со статьями 5 и 24.9 Федерального закона «Об отходах производства и потребления»⁶ принято постановление Правительства РФ «О ценообразовании в области обращения с твердыми коммунальными отходами», № 484 от 30.05.2016²⁵, определяющее «систему, принципы и методы регулирования тарифов на товары (работы, услуги) организаций, осуществляющих регулируемые виды деятельности в области обращения с твердыми коммунальными отходами, критерии их применения». Расходы на транспортирование ТКО учитываются при определении предельных тарифов на осуществление регулируемых видов деятельности в области обращения с ТКО, установленных органами регулирования тарифов (тарифы). Для определения размера тарифов принят Приказ «Об утверждении Методических указаний по расчету регулируемых тарифов в области обращения с твердыми коммунальными отходами», № 1638/16 от 21.11.2016²⁶. Следует отметить, ни в постановлении Правительства РФ № 484 от 30.05.2016⁸, ни в Приказе № 1638/16 от 21.11.2016⁹ методики постатейного расчета затрат на транспортировку ТКО не приведено. Это позволяет утверждать, что в настоящее время отсутствует нормативное регулирование определения затрат на транспортировку ТКО. Для решения вопроса расчета затрат на перевозку ТКО следует применять нормативные положения, регулирующие работу транспорта общего пользования: Приказ Министерства транспорта Российской Федерации «Об утверждении Особенности режима рабочего времени и времени отдыха, условий труда водителей автомобилей», Постановле-

ние Правительства Российской Федерации «Об утверждении Правил перевозок грузов автомобильным транспортом и о внесении изменений в пункт 2.1.1 Правил дорожного движения Российской Федерации»²⁷, а также Приказ Федеральной антимонопольной службы «Об утверждении Методических указаний по расчету регулируемых тарифов в области обращения с твердыми коммунальными отходами»²⁶.

МАТЕРИАЛЫ МЕТОДЫ

Цель исследования – разработать оперативный план перевозок ТКО и выполнить оценку полученного результата. Задачи: 1. Подготовить исходные данные. 2. обосновать подходы и методику проектирования; оценить выполнимость плана перевозок грузов; рассчитать затраты на перевозку ТКО.

Чтобы выполнить рассматриваемое исследование были использованы лоты № 0400700004820000001 - № 0400700004820000010 и, соответствующие им технические задания²⁸. При построении исходного варианта применялся нормативный подход, описанный в правилах перевозок грузов, определяющий изолированное планирование работы грузоотправителя с каждым грузополучателем. Для планирования такой работы применены модели описания функционирования областных автотранспортных систем перевозок грузов, созданные И.В. Погуляевой¹⁵, учитывающие дискретный характер протекания транспортного процесса. Однако условиями работы грузоотправителей наложено ограничение на количество погрузочно-разгрузочных механизмов (ПРМ), имеющих в наличии, их количество меньше числа грузополучателей, что определяет необходимость согласования созданных пла-

²⁴ Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Омской области «Об утверждении территориальной схемы обращения с отходами производства и потребления в Омской области и признании утратившими силу отдельных приказов Министерства природных ресурсов и экологии Омской области», № 39 от 26 мая 2020 года, Омск.

²⁵ Постановление Правительства Российской Федерации «О ценообразовании в области обращения с твердыми коммунальными отходами», № 484, 30 мая 2016 года, Москва.

²⁶ Федеральная антимонопольная служба Российской Федерации (2016) Приказ Федеральной антимонопольной службы «Об утверждении Методических указаний по расчету регулируемых тарифов в области обращения с твердыми коммунальными отходами», № 1638/16, 21 ноября 2016 года, Москва.

²⁷ Министерство транспорта Российской Федерации (2020) Приказ Министерства транспорта Российской Федерации «Об утверждении Особенности режима рабочего времени и времени отдыха, условий труда водителей автомобилей», № 424 от 16 октября 2020 года, Москва. Постановление Правительства Российской Федерации «Об утверждении Правил перевозок грузов автомобильным транспортом и о внесении изменений в пункт 2.1.1 Правил дорожного движения Российской Федерации», № 2200, 21 декабря 2020 года, Москва.

²⁸ Официальный сайт Единой информационной системы в сфере закупок (ЕИС) <https://zakupki.gov.ru/epz/main/public/home.html> (дата обращения: 02.10.2024)

нов работы путем построения расписания. При разработке проекта расписания применен принцип обслуживать первым самого удаленного клиента, что в условиях ограничения времени освоения заявленного объема перевозок позволит выполнить его перевозку сначала в наиболее удаленные пункты. При планировании расписания работы вернувшихся из рейса транспортных средств использован принцип FIFO.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим применение нормативных положений автотранспорта общего пользования для проектирования перевозок ТКО в областном сообщении, исходные данные представлены в таблице 1.

Согласно правилам перевозок грузов каждая заявка грузоотправителя (ГО) для заключения

договора рассматривается отдельно. Однако применение этого подхода может приводить к неверным результатам. Покажем это на примере. Перевозка ТКО осуществляется автотранспортным средством (АТС) в составе седельного тягача Mercedes-Benz Actros 2646LS и самосвального полуприцепа Grunwald, геометрическим объемом кузова 30 м³ грузополучателю (далее ГП). Погрузка выполняется экскаваторами, емкость ковша – 1 м³.

Используя математическую модель описания функционирования областных автотранспортных систем перевозок грузов, учитывающую дискретность протекания транспортного процесса¹⁵, за время работы системы 24 ч разработан план перевозок ТКО на каждом направлении отдельно. Затраты определены с использованием программно-математического обеспечения [24], результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 1

Исходные данные

Источник: составлено авторами по данным лотов № 0400700004820000001 – № 04007000004820000010 и технических заданий на оказание услуг по транспортированию твердых коммунальных отходов²⁹.

Table 1

Initial data

Source: Compiled by the authors based on data from lots No. 0400700004820000001 – No. 04007000004820000010 and technical specifications for the provision of services for the transportation of solid municipal waste.

№п/п	Направление перевозки «хвостов»	Пробег с грузом, км	Объем перевозок на сутки, т	Количество ездов на сутки, ед.	Объем перевозок на период контракта, т
1	ГО1-ГП4	35	330,244	15,0	40620
2	ГО1-ГП1	94	526,341	24,0	64740
3	ГО1-ГП5	100	548,537	25,0	67470
4	ГО1-ГП2	105	550,894	25,0	67760
5	ГО1-ГП6	121	529,919	24,0	65180
6	ГО1-ГП3	291	414,878	19,0	51030
1	ГО2-ГП4	48	348,049	16,0	42810
2	ГО2-ГП2	58	602,195	27,0	74070
3	ГО2-ГП1	152	336,260	15,0	41360
4	ГО2-ГП3	229	561,789	25,0	69100
ИТОГО:					584 140

²⁹ Официальный сайт Единой информационной системы в сфере закупок (ЕИС) <https://zakupki.gov.ru/epz/main/public/home.html> (дата обращения: 03.10.2024).

Таблица 2
Результаты расчета работы автосамосвалов
Источник: составлено авторами.

Table 2
Results of calculation of dump trucks operation
Source: compiled by the authors.

Маршрут перевозки «хвостов»	Выработка АТС, т/смену	Выработка АТС, ездов/ смену	Количество АТС на сутки, т	Затраты на смену, руб.	Затраты за смену на 1 АТС, руб.	Затраты на 1 т, руб.
ГО1-ГП4	247,5	11	1,33 (2)	82 010,72	41 005,36	248,33
ГО1-ГП1	112,5	5	4,67 (5)	297 042,35	59 408,47	564,35
ГО1-ГП5	112,5	5	4,87 (5)	323 926,68	64 785,34	590,53
ГО1-ГП2	112,5	5	4,89 (5)	335 846,00	67 169,20	609,64
ГО1-ГП6	90	4	5,88 (6)	377 455,09	62 909,18	712,29
ГО1-ГП3	45	2, посл.авто 1	9,21 (10)	692 908,37	69 290,84	1 670,15
ИТОГО:			30,85 (33)	2 109 189,22	63 914,82	727,10
ГО2-ГП4	202,5	9	1,71 (2)	106 545,82	53 272,91	306,12
ГО2-ГП2	157,5	7	3,82 (4)	215 698,19	53 924,55	358,19
ГО2-ГП1	67,5	3	4,98 (5)	296 682,04	59 336,41	882,30
ГО2-ГП3	45,0	2	12,48 (13)	747 131,64	57 471,66	1 329,92
ИТОГО:			22,99(24,0)	1 366 057,69	56 919,07	739,09

Таблица 3
Результаты расчета использования экскаваторов
Источник: составлено авторами.

Table 3
Results of calculation of excavator utilization
Source: compiled by the authors.

№ п/п	Направление перевозки «хвостов»	Возможное количество погрузок в смену	Плановое количество погрузок в смену	Потребность в экскаваторах, ед.	Потребность в экскаваторах (факт), ед.
1	ГО1-ГП4	58,0	15,0	0,258	1,0
2	ГО1-ГП1	58,0	24,0	0,414	1,0
3	ГО1-ГП5	58,0	25,0	0,431	1,0
4	ГО1-ГП2	58,0	25,0	0,431	1,0
5	ГО1-ГП6	58,0	24,0	0,414	1,0
6	ГО1-ГП3	58,0	19,0	0,328	1,0
ИТОГО:		348,0	132	2,278	6,0 (2,0)
1	ГО2-ГП4	58,0	16	0,275	1,0
2	ГО2-ГП2	58,0	27	0,465	1,0
3	ГО2-ГП1	58,0	15	0,259	1,0
4	ГО2-ГП3	58,0	25	0,431	1,0
ИТОГО:		232,0	83,0	1,431	4,0 (2)

На практике погрузку от каждого ГО выполняют по 2 экскаватора (HitachiZX 240 и HitachiZX 225), размер ковша – 1 м³, норма времени на погрузку³⁰ 1 м³ ТКО – 0,023 чел.-ч, по расчетам время погрузки АТС составит 0,41 ч. Согласно подходу по расчетам требуется 10 экскаваторов. Результаты расчета использования экскаваторов выполняются с использованием метода прямого счета при условии: время работы 24 ч, 1 экскаватор у ГО (таблица 3).

³⁰ Министерство труда Российской Федерации (2000) Постановление Министерства труда Российской Федерации «Об утверждении межотраслевых норм времени на погрузку, разгрузку вагонов, автотранспорта и складские работы», № 76, 17 октября 2000 года, Москва.

Из представленных в таблице 3 данных следует, что ресурсы экскаваторов у ГО2 превышают потребность в погрузках и два экскаватора используются на 71,55% от наличия (потребность в погрузках 83,0 ед., наличие 116,0 ед.), а у ГО1 наличие не соответствует потребности в погрузках на 0,139% (потребность в погрузках 132,0 ед. а наличие 116,0 ед.) и план перевозок поэтому не может быть исполнен.

Выполнению данного требования препятствует размерный ряд ковшей производителя, по первому экскаватору имеется ковш объемом 1,4 м³, по второму 1,2 м³. Тогда выполнение требования кратности погрузок возможно только путем замены экскаваторов. На практике в автосамосвал грузят 80% прессованных ТКО (20 тюков) и 20% россыпью, путем экскавации. Для проверки выполнения плана перевозок требуется установить принцип отгрузки, очередность обслуживания ГП на первой погрузке. Если отгружать наиболее удаленного ГП первым, то возвращающиеся автомобили от наиболее удаленного ГП меньше всего будут оказывать влияние на погрузку самосвалов к менее удаленным ГП. Используем также принцип FIFO «Прибыл первым, грузится первым» [23]. Расчет выполнен для ГО1. Сначала грузим первые ездки 10 авто для № 6 от ГО1, повторно на погрузку самосвалы встанут через время оборота, равного 13 ч (в 21,00). От начала времени первой смены работы ГП1 (8,00) окончание первой погрузки группы АТС составит 10,05 ч. Плановое количество ездов 19. Вторыми будем грузить первые ездки 6 авто для № 5 от ГО1, повторно на погрузку самосвалы придут через время оборота, равного 5,88 часа (в 15,94). Начало первой погрузки группы АТС в адрес № 5 от начала времени первой смены работы ГП1 в 10,06 ч, окончание первой погрузки группы АТС в адрес № 5 произойдет в 11,29 ч. Плановое количество ездов 24. Третьими будем грузить первые ездки 6 авто для № 4 от ГО1, повторно на погрузку самосвалы придут через время оборота, равного 5,08 ч (в 16,38). Начало первой погрузки группы АТС в адрес № 4 от начала времени первой смены работы полигона в 11,30 ч, окончание первой погрузки группы АТС в адрес № 4 произойдет в 12,53. Плановое количество ездов 25. Четвертыми будем грузить первые ездки 6 авто для № 3 от ГО1, повторно на погрузку самосвалы придут через время оборота, равного 4,96 ч (в 17,5). Начало первой погрузки группы АТС в адрес № 3 от начала времени первой смены

работы ГП1 в 12,54 ч, окончание первой погрузки группы АТС в адрес № 3 произойдет в 13,77 часа. Плановое количество ездов 25. Пятыми будем грузить первые ездки 6 авто для № 2 от ГО1, повторно на погрузку самосвалы придут через время оборота, равного 4,53 ч (в 18,31). Начало первой погрузки группы АТС в адрес № 2 от начала времени первой смены работы полигона в 13,78 ч, окончание первой погрузки группы АТС в адрес № 2 произойдет в 15,01 ч. Плановое количество ездов 24. Шестыми будем грузить первые ездки 6 авто для № 1 от ГО1, повторно на погрузку самосвалы придут через время оборота, равного 2,14 ч (в 17,16). Начало первой погрузки первого авто группы АТС в адрес № 1 от начала времени первой смены работы ГП1 в 15,02 ч, окончание первой погрузки группы АТС в адрес № 1 произойдет в 16,25. Плановое количество ездов 15. Установлен простой 6 авто по 0,32 ч (прибытие в 15,94, начало погрузки в 16,26).

Первыми будем грузить вторые ездки 6 авто для № 5 от ГО1, повторно на погрузку самосвалы придут через время оборота, равного 5,88 ч (в 22,14). Начало второй погрузки группы АТС в адрес № 5 от начала времени первой смены работы полигона в 16,26 ч, окончание второй погрузки группы АТС в адрес № 5 произойдет в 17,49 ч. Плановое количество ездов 24, выполнено 6. Простой 6 авто по 1,12 ч (прибытие в 16,38, начало погрузки в 17,50). Вторыми будем грузить вторые ездки 6 авто для № 4 от ГО1, повторно на погрузку самосвалы придут через время оборота, равного 5,08 ч (в 22,58). Начало первой погрузки группы АТС в адрес № 4 от начала времени первой смены работы ГО1 в 17,50 ч, окончание первой погрузки группы АТС в адрес № 4 произойдет в 18,73. Плановое количество ездов 25, выполнено 6.

Простой 6 авто по 1,58 ч (прибытие в 17,16, начало погрузки в 18,74). Третьими будем грузить вторые ездки 6 авто для №1 от ГО1, повторно на погрузку самосвалы придут через время оборота, равного 2,14 ч (в 20,88). Начало первой погрузки первого авто группы АТС в адрес № 1 от начала времени первой смены работы ГО1 в 18,74 ч, окончание первой погрузки группы АТС в адрес № 1 произойдет в 19,97. Плановое количество ездов 15, выполнено 6. Простой 6 авто по 2,48 ч (прибытие в 17,5, начало погрузки в 19,98). Четвертыми будем грузить вторые ездки 6 авто для № 3 от ГО1, повторно на погрузку самосвалы придут через время оборота, равного 4,96 ч (в 0,94).

Таблица 4
Плановые результаты перевозок
Источник: составлено авторами.

Table 4
Planned transportation results
Source: compiled by the authors.

№ п/п	Число ездок план, ед.	Число ездок факт, ед.	Простой в ожидании погрузки, ч.	Число ездов не выполнено, ед.	Затраты за смену, руб.	Затраты за смену на 1 АТС, руб.	Затраты на 1 т, руб.
6	19	19	1,89	0	694 278,31	69 427,83	1 673,45
5	24	18	1,92+19,26	6	294 827,89	58 965,58	727,97
4	25	18	6,72+24,06	7	254 580,68	63 645,17	628,59
3	25	18	14,88+17,34	7	246 346,64	61 586,66	608,26
2	24	18	29,82+11,16	6	236 207,38	59 051,85	583,23
1	15	15	9,48+10,92	0	87 098,82	43 549,41	263,74
ИТОГО:					1813 339,72	62 528,96	766,70

Начало первой погрузки группы АТС в адрес № 3 от начала времени первой смены работы ГО1 в 19,98 ч, окончание первой погрузки группы АТС в адрес № 3 произойдет в 21,21 ч. Плановое количество ездов 25, выполнено 6. Простой 9 авто по 0,21 ч (прибытие в 21,00, начало погрузки в 21,22). Один автомобиль в гараж. Пятыми будем грузить вторые езды 9 авто для № 6 от ГО1, повторно на погрузку самосвалы придут через время оборота, равного 13.00 (в 10,22). От начала времени первой смены работы ГО1 (8,00) начало второй погрузки составит 21,22 ч, окончание второй погрузки группы АТС составит 23,27 ч. Плановое количество ездов 19. выполнено 19. Простой 6 авто по 4,97 ч (прибытие в 18,31, начало погрузки в 23,28). Шестыми будем грузить вторые езды 6 авто для № 2 от ГО1, повторно на погрузку самосвалы придут через время оборота, равного 4,53 ч (в 3,81). Начало второй погрузки группы АТС в адрес № 2 от начала времени первой смены работы ГО1 в 23,28 ч, окончание второй погрузки группы АТС в адрес № 2 произойдет в 0,51 ч. Плановое количество ездов 24, выполнено 6. Простой 3 авто по 3,64 ч (прибытие в 20,88, начало погрузки в 0,52). 3 автомобиля в гараж.

Первыми будем грузить третьи езды 3 авто для № 1 от ГО1, повторно на погрузку самосвалы встанут через время оборота, равного 2,14 ч (в 2,66). Начало первой погрузки первого авто группы АТС в адрес № 1 от начала времени первой смены работы ГО1 в 0,52 ч, окончание третьей погрузки трех авто группы АТС в адрес № 1 произойдет в 1,34. Плановое количество ездов 15, выполнено 12. Простой 6 авто

по 3,21 ч (прибытие в 22,14, начало погрузки в 1,35). Вторыми будем грузить третьи езды 6 авто для № 5 от ГО1, повторно на погрузку самосвалы встанут через время оборота, равного 5,88 ч (в 7,23). Начало первой погрузки группы АТС в адрес № 5 от начала времени первой смены работы ГО1 в 1,35 ч, окончание первой погрузки группы АТС в адрес № 5 произойдет в 2,58 ч. Плановое количество ездов 24, выполнено 12. Простой 6 авто по 4.01 ч Э(прибытие в 22,58, начало погрузки в 2,59). Третьими будем грузить третьи езды 6 авто для № 4 от ГО1, повторно на погрузку самосвалы встанут через время оборота, равного 5,08 ч (в 7,67). Начало первой погрузки группы АТС в адрес № 4 от начала времени первой смены работы ГО1 в 2,59 ч, окончание первой погрузки группы АТС в адрес № 4 произойдет в 3,82. Плановое количество ездов 25, выполнено 12. Простой 6 авто по 2,89 ч (прибытие в 0,94, начало погрузки в 3,83). Четвертыми будем грузить третьи езды 6 авто для № 3 от ГО1, повторно на погрузку самосвалы встанут через время оборота, равного 4,96 ч (в 8,79). Начало первой погрузки группы АТС в адрес № 3 от начала времени первой смены работы ГО1 в 3,83 ч, окончание первой погрузки группы АТС в адрес № 3 произойдет в 5.06 ч. Плановое количество ездов 25, выполнено 12. Простой 6 авто по 1,86 ч (прибытие в 3,81, начало погрузки в 5,07). Пятыми будем грузить третьи езды 6 авто для № 2 от ГО1, повторно на погрузку самосвалы встанут через время оборота, равного 4,53 ч (в 9,6). Начало первой погрузки группы АТС в адрес № 2 от начала времени первой смены работы ГО1 в 5,07 ч,

окончание первой погрузки группы АТС в адрес № 2 произойдет в 6,3 ч. Плановое количество ездов 24, выполнено 12. Затраты на перевозку грузов рассчитаны согласно 16 [24]. Результаты расчета представлены в таблице 4.

В результате исследования установлено существование на практике достаточно редкой ситуации вывоза ТКО от нескольких ГО множеству ГП, в условиях областных перевозок, выполняемых для одного заказчика. В современной научной литературе планированию подобных перевозок не уделялось достаточного внимания. Поэтому на практике для разработки плана возможно применять подход, нормативные документы, в основе которых лежат теоретические положения оперативно-го планирования грузовых автомобильных перевозок, разработанные для автомобильного транспорта общего пользования, а также собственный опыт. Результаты счетного эксперимента позволили установить, что применение этих положений при оперативном планировании может приводить к ошибкам, т.к. не позволяет учесть взаимодействия автомобилей и погрузочных механизмов в грузовых пунктах, что проявляется в невыполнении плана перевозок (неосвоении грузооборота) в диапазоне от 23,05 до 26,48%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учет взаимодействия между транспортными средствами, а также с погрузочными механизмами позволяет получить более обоснованные оперативные планы перевозки грузов. Поскольку при этом использована методика планирования перевозок грузов автомобильным транспортом общего пользования, не учитывающая специфики груза (ТКО) и условий перевозки (областные перевозки по радиальному маршруту), то и вариант оперативного плана может быть не самым лучшим. На направлениях № 6 и № 1, где план перевозок выполняется, затраты на смену возросли, как и затраты на 1 т перевозимого груза. На направлениях № 2 – № 5, где план перевозок не выполняется, затраты на смену снизились, затраты на 1 т перевозимого груза возросли (от 2,2 до 3,34%). Так как затраты на перевозку напрямую зависят от результатов планирования, то можно утверждать, что размер затрат, рассчитанных на основе разработанного оперативного плана, также недостаточно верен. Это и определяет перспективы дальнейших исследований.

Поскольку исследование завершено разработкой оперативного плана перевозок ТКО, справедливо отметить, что цель достигнута.

Достижению цели способствовало решение задач – подготовка исходных данных, обоснован подход и методика решения задачи разработки оперативного плана перевозок ТКО в областном сообщении, проведена оценка разработанного плана перевозок грузов на выполнимость от разных ГО, определены затраты на перевозку ТКО по данному плану.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кирсанов С.А., Мустафин Г.В. Мировой и российский опыт утилизации твердых бытовых отходов // Вестник Омского университета. Серия «Экономика». 2014. №. 2. С. 114–120.
2. Степаненко Е.Е., Поспелова О.А., Зеленская Т.Г. Исследование химического состава фильтрационных вод полигона твердых бытовых отходов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11, №. 1–3. С. 525–527.
3. Шаповалов Д.А., Холин Р.Н., Скоробогатова У.Е. Моделирование и оценка загрязнения грунтовых и поверхностных вод фильтратом полигона твердых бытовых отходов // International agricultural journal. 2021. №. 2. С. 8–19.
4. Taşkın, Akif, and Nesrin Demir. Life cycle environmental and energy impact assessment of sustainable urban municipal solid waste collection and transportation strategies. *Sustainable Cities and Society* 61, 102339 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102339> (accessed: 02.12.2024).
5. Акимов Е.М., Семернин Д.А. Обращение с твердыми бытовыми отходами на основе концессионных соглашений и ГЧП-моделей в сфере ЖКХ // Экономика и предпринимательство. 2020. №. 12. С. 1354–1358.
6. Karadimas, Nikolaos V., et al. Routing optimization heuristics algorithms for urban solid waste transportation management. *wseas transactions on computers* 7.12, 2022–2031 (2008). <https://www.wseas.us/e-library/transactions/computers/2008/31-698.pdf> (accessed: 02.12.2024)
7. Koushki, P.A., U. Al-Duaij, and W. Al-Ghimlas. Collection and transportation cost of household solid waste in Kuwait. *Waste management* 24.9. 2004. 957–964. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.03.013> (accessed: 02.12.2024)
8. Елисеева И.В. Новая система обращения с твердыми бытовыми отходами: сущность, положительные и отрицательные аспекты // Концепт. 2019. №. 11. С. 15–15. DOI: 10.24411/2304-120X-2019-13069
9. Geng, Yong, Fujita Tsuyoshi, and Xudong Chen. Evaluation of innovative municipal solid waste management through urban symbiosis: a case study of Kawasaki. *Journal of cleaner production* 18.10-11 993–1000 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.03.003> Get rights and content (accessed: 02.12.2024)
10. Zhang, Yimei, Guo He Huang, and Li He. A multi-echelon supply chain model for municipal solid waste management system. *Waste management*.

2014. 34.2 553–561. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.002> (accessed: 02.10.2024)

11. Казарян М.Л., Рихтер А.А., Шахрамьян М.А., Недков Р.Д. Космический мониторинг объектов захоронения твердых бытовых отходов и промышленных отходов (ТБО и ПО): теоретико-методические и социально-экономические аспекты: монография. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2019. 278 с. (Научная мысль).

12. Арипов Н.Ю. Транспортировка бытовых отходов с применением гидравлических систем // *Science and Education*. 2020. Т. 1, №. 6. С. 65–73.

13. Кашников С.В. Перспективы использования твердых бытовых отходов в качестве альтернативного источника энергии // *Инновации и инвестиции*. 2021. №. 5. С. 148–150.

14. Османов И.Х. Экономико-математическая модель оптимального размещения и определения рациональных мощностей предприятий по переработке твердых бытовых отходов (ТКО) на региональном уровне // *Экономика строительства и природопользования*. 2020. №. 3 (76). С. 23–27.

15. Asefi, Hossein, and Samsung Lim. A novel multi-dimensional modeling approach to integrated municipal solid waste management. *Journal of cleaner production*. 2017; 166: 1131–1143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.061> (accessed: 02.10.2024)

16. Asefi, Hossein, Samsung Lim, and Mojtaba Maghrebi. A mathematical model for the municipal solid waste location-routing problem with intermediate transfer stations. *Australasian Journal of Information Systems*. 2015; 19: 21–35. DOI: <https://doi.org/10.3127/ajis.v19i0.1151> (accessed: 02.12.2024)

17. Inghels, Dirk, Wout Dullaert, and Daniele Vigo. A service network design model for multimodal municipal solid waste transport. *European Journal of Operational Research*. 2016; 254.1: 68–79 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.036> (accessed: 02.10.2024)

18. Das, Swapan, and Bidyut Kr Bhattacharyya. Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes. *Waste Management*. 2015; 43: 9–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.033> (accessed: 02.12.2024)

19. Nguyen-Trong, Khanh, et al. Optimization of municipal solid waste transportation by integrating GIS analysis, equation-based, and agent-based model. *Waste management*. 2017; 59: 14–22. (2017). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.048> (accessed: 02.10.2024)

20. Sanjeevi, V., and P. Shahabudeen. Optimal routing for efficient municipal solid waste transportation by using ArcGIS application in Chennai, India. *Waste Management & Research*. 2016; 34.1: 11–21. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X15607430> (accessed: 02.10.2024)

21. Yadav, Vinay, and Subhankar Karmakar. Sustainable collection and transportation of municipal solid waste in urban centers. *Sustainable Cities and Society*. 2020; 53 101937: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101937> (accessed: 02.10.2024)

22. Alam, R., et al. Generation, storage, collection and transportation of municipal solid waste—A case study in the city of Kathmandu, capital of Nepal. *Waste management*. 2008; 28.6 1088–1097. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.12.024> (accessed: 02.10.2024)

23. Оптимизация перевозок однородной продукции между оптовыми складами / Бахтин В.А. [и др.] // *Препринты Института прикладной математики им. МВ Келдыша РАН*. 2018. №. 65. С. 1–26.

24. Юрьева Н.И., Витвицкий Е.Е. Программно-математическое обеспечение «Расчет затрат на перевозку грузов в составе моделей микро и особо малой автотранспортных систем» // *Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование»*. 2015. №. 6. С. 71–71.

REFERENCES

1. Kirsanov S.A., Mustafin G.V. World and russian experience of utilization of solid domestic waste. *Herald of Omsk University. Series "Economics"*. 2014;2: 114–120. (in Russ.)

2. Stepanenko E.E., Pospelova O.A., Zelenskaya T.G. Research of the chemical composition of regenerated flows in hard human waste polygon. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2009; 11. (1-3): 525–527. (in Russ.)

3. SHapovalov D.A., Holin R.N., Skorobogatova U.E. Simulation and assessment of groundwater and surface water pollution by the filtrate of solid waste landfill. *International agricultural journal*. 2021; 2: 8–19. (in Russ.)

4. Taşkın, Akif, and Nesrin Demir. Life cycle environmental and energy impact assessment of sustainable urban municipal solid waste collection and transportation strategies. *Sustainable Cities and Society*. 2020; 61, 102339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102339> (accessed: 02.12.2024).

5. Akimova E.M., Semernin D.A. Olid waste management based on concession agreements and ppp-models in the housing-and-utilities sector. *Journal of Economy and entrepreneurship*. 2020; 12: 1354–1358. (in Russ.) <https://elibrary.ru/item.asp?id=44690518>

6. Karadimas, Nikolaos V., et al. Routing optimization heuristics algorithms for urban solid waste transportation management. *wseas transactions on computers* 7.12, 2022–2031 (2008). <https://www.wseas.us/e-library/transactions/computers/2008/31-698.pdf> (accessed: 02.12.2024)

7. Koushki P.A., U. Al-Duaij, and W. Al-Ghimlas. Collection and transportation cost of household solid waste in Kuwait. *Waste management*. 2004; 24.9: 957–964. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.03.013> (accessed: 02.12.2024)

8. Eliseeva I.V. New system of solid waste management: essence, positive and negative aspects. *Koncept*. 2019; 11:15–15. (in Russ.) DOI: 10.24411/2304-120X-2019-13069

9. Geng, Yong, Fujita Tsuyoshi, and Xudong Chen. Evaluation of innovative municipal solid waste management through urban symbiosis: a case study

of Kawasaki. *Journal of cleaner production*. 2010; 18. 10–11 993–1000. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.03.003>Get rights and content (accessed: 02.10.2024)

10. Zhang, Yimei, Guo He Huang, and Li He. A multi-echelon supply chain model for municipal solid waste management system. *Waste management*. 2014; 34.2 553–561. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.002> (accessed: 02.10.2024)

11. Kazaryan M.L., Richter A.A., Shakhramanov M.A., Nedkov R.D. *Space monitoring of solid domestic waste and industrial waste disposal facilities (SDW and PO): theoretical, methodological and socio-economic aspects*: monograph. Moscow: Limited Liability Company "Scientific and Publishing Center INFRA-M", 2019. 278 p. EDN ZAIMOL. (in Russ.)

12. Aripov N.YU. Transportation of household waste using hydraulic systems. *Science and Education*. 2020; 1(6): 65–73. (in Russ.)

13. Kashnikov S. V. Prospects for the use of municipal solid waste as an alternative source of energy. *Innovacii i investicii*. 2021; 5: 148–150. (in Russ.)

14. Osmanov I.H. Economic and mathematical model of optimal placement and determination of rational capacities of enterprises for the processing of municipal solid waste (MSW) at the regional level. *Construction economic and environmental management*. 2020; 3 (76): 23–27. (in Russ.) DOI: 10.37279/25-19-44-53-2020-3-23-27

15. Asefi, Hossein, and Samsung Lim. A novel multi-dimensional modeling approach to integrated municipal solid waste management. *Journal of cleaner production*. 2017; 166: 1131–1143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.061> (accessed: 02.10.2024)

16. Asefi, Hossein, Samsung Lim, and Mojtaba Maghrebi. A mathematical model for the municipal solid waste location-routing problem with intermediate transfer stations. *Australasian Journal of Information Systems*. 2015; 19: 21–35. DOI: <https://doi.org/10.3127/ajis.v19i0.1151> (accessed: 02.10.2024)

17. Inghels, Dirk, Wout Dullaert, and Daniele Vigo. A service network design model for multimodal municipal solid waste transport. *European Journal of Operational Research*. 2016; 254.1: 68–79 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.036> (accessed: 02.10.2024)

18. Das, Swapan, and Bidyut Kr Bhattacharyya. Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes. *Waste Management*. 2015; 43: 9–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.033> (accessed: 02.10.2024)

19. Nguyen-Trong, Khanh, et al. Optimization of municipal solid waste transportation by integrating GIS analysis, equation-based, and agent-based model. *Waste management*. 2017; 59: 14–22. (2017). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.048> (accessed: 02.10.2024)

20. Sanjeevi, V., and P. Shahabudeen. Optimal routing for efficient municipal solid waste transportation by using ArcGIS application in Chennai, India. *Waste Management & Research*. 2016; 34.1: 11–21. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X15607430> (accessed: 02.10.2024)

21. Yadav, Vinay, and Subhankar Karmakar. Sustainable collection and transportation of municipal solid waste in urban centers. *Sustainable Cities and Society*. 2020; 53 101937: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101937> (accessed: 02.10.2024)

22. Alam, R., et al. Generation, storage, collection and transportation of municipal solid waste—A case study in the city of Kathmandu, capital of Nepal. *Waste management*. 2008; 28.6 1088–1097. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.12.024> (accessed: 02.10.2024)

23. Bakhtin V.A., Bogdanov I.P., Osipov V.P., Rykov Y.G., Smirnov A.A., Sudakov V.A. Optimal scheduling of homogeneous products transportation. *Keldysh Institute PREPRINTS*. 2018; 65: 1–26. (in Russ.) DOI:10.20948/prepr-2018-65

24. YUr'eva N.I., Vitvitsky E.E. Software and mathematical support "Calculation of cargo transportation costs as part of models of micro and very small road transport systems". *Hroniki ob'edinennogo fonda elektronnykh resursov Nauka i obrazovanie*. 2015; 6: (in Russ.) 71–71.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Витвицкий Е.Е. Формирование направления, цели и задач исследования, теоретических положений, использование математических моделей и методов, результатов исследований в части определения пределов применения технологий областных перевозок ТКО автомобильным транспортом.

Галактионова Е.С. Включенное участие в подготовке, написании и корректировке статьи, анализ нормативной документации, регулирующей сбор и вывоз ТКО, а также исследований отечественных и зарубежных авторов, посвященных перевозке и переработке ТКО.

Юрьева Н.И. Включенное участие в подготовке, написании и корректировке статьи, расчет результатов работы автомобилей и затрат при перевозке ТКО.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Vitvitsky E.E. Formation of the direction, goals and objectives of the study, theoretical provisions, the use of mathematical models and methods, research results in determining the limits of the use of technologies for regional transportation of MSW by road.

Galaktionova E.S. Included participation in the preparation, writing and correction of the article, analysis of regulatory documentation regulating the collection and export of MSW, as well as research by domestic and foreign authors on the transportation and processing of MSW.

Yuryeva N.I. Included participation in the preparation, writing and correction of the article, calculation of the results of the work of cars and the costs of transporting MSW.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Витвицкий Евгений Евгеньевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Организация перевозок и безопасность движения» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644080, г. Омск, просп. Мира, 5), член-эксперт Комиссии по вопросам цифровой и низкоуглеродной трансформации отрасли, ускоренному внедрению новых технологий Общественного совета Минтранса России.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0155-8941>,

SPIN-код: 7136-0475,

e-mail: vitvitsky_ee@mail.ru

Галактионова Елена Сергеевна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Организация перевозок и безопасность движения» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644080, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6091-5910>,

e-mail: es_galaktionova@inbox.ru

Юрьева Наталья Ивановна – экономист отдела экономического анализа и тарифного регулирования ООО «Магнит» Регионального оператора по обращению с твердыми коммунальными отходами Омской области (644024 г. Омск, ул. Декабристов, 45/1).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1224-020X>,

SPIN-код: 6773-4214,

e-mail: yureva_ni@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vitvitsky Evgeny E. – Dr. of Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Transport Organization and Traffic Safety Transportation Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644080), expert member of the Commission on Digital and Low Carbon Transformation of the Industry, Accelerated Implementation of New Technologies of the Public Council of the Russian Ministry of Transport.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0155-8941>,

SPIN-code: 7136-0475,

e-mail: vitvitsky_ee@mail.ru

Galaktionova Elena S. – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department "Organization of Transportation and Traffic Safety", Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644080).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6091-5910>,

SPIN-code: 2954-7104,

e-mail: es_galaktionova@inbox.ru

Yurieva Natalya I. – economist at the Department of Economic Analysis and Tariff Regulation of Magnit LLC, a regional operator for solid municipal waste management in the Omsk Region (45/1 Dekabristov str., Omsk, 644024).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1224-020X>,

SPIN-code: 6773-4214,

e-mail: yureva_ni@mail.ru

Научная статья
УДК 656.072
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-882-899>
EDN: HAVOZZ



МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НАСЕЛЕНИЯ СУБЪЕКТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ОМСКОЙ ОБЛАСТИ

А.П. Жигadlo, А.Ю. Шонин, И.А. Эйхлер ✉

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

✉ ответственный автор
vaniaeichler@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. В рамках трансформации отрасли пассажирских перевозок Российской Федерации определена актуальность оценки текущего состояния системы транспортного обслуживания населения в субъектах Российской Федерации на основе параметров, заложенных в действующих и перспективных нормативно-правовых актах.

Материалы и методы. В работе использованы актуальные нормативно-правовые акты федерального и регионального уровня в области транспортного обслуживания населения, данные административно-территориального деления субъекта РФ, действующие реестры межмуниципальных и муниципальных маршрутов, статистическая информация по численности населения.

Использованы следующие методы исследования: анализ, опрос, формализация.

Результаты. В исследовании представлена разработанная авторами методика экспресс-оценки текущего состояния системы транспортного обслуживания населения в субъекте Российской Федерации, включающая алгоритм ее применения. Методика базируется на оценке шести критериев, являющихся укрупненными показателями параметров транспортного обслуживания населения в областях доступности, безопасности, надежности и комфортности.

Приведены результаты апробации методики на территории Омской области.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты позволяют определить проблемные территории, для которых необходимо разработать и реализовать мероприятия по повышению качества транспортного обслуживания населения в краткосрочной перспективе. Предложенная методика не является заменой методик, утвержденных действующими нормативно-правовыми актами, и может применяться на начальном этапе разработки и актуализации документов транспортного планирования субъекта Российской Федерации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система транспортного обслуживания населения, параметры системы транспортного обслуживания, управление пассажирскими автомобильными перевозками, транспортное планирование, критерии оценки функционирования системы транспортного обслуживания населения, пассажирские перевозки, узловой пункт маршрутной сети, маршрутная сеть, маршруты регулярных перевозок

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

Статья поступила в редакцию 03.11.2024; одобрена после рецензирования 11.12.2024; принята к публикации 16.12.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Жигadlo А.П., Шонин А.Ю., Эйхлер И.А., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Жигadlo А.П., Шонин А.Ю., Эйхлер И.А. Методика оценки состояния транспортного обслуживания населения субъекта Российской Федерации на примере Омской области // Вестник СиБАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 882-899. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-882-899>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-882-899>

EDN: HAVOZZ

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE STATE OF TRANSPORT SERVICES FOR THE POPULATION OF THE SUBJECT OF THE RUSSIAN FEDERATION ON THE EXAMPLE OF THE OMSK REGION

Alexander P. Zhigadlo, Anatoly Yu. Shonin, Ivan A. Eychler ✉

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

✉ corresponding author
vaniaeichler@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. Within the framework of the transformation of the passenger transportation industry of the Russian Federation, the relevance of assessing the current state of the public transport service system in the subjects of the Russian Federation is determined on the basis of the parameters laid down in current and prospective regulatory legal acts.

Materials and Methods. The research uses current regulatory legal acts of the federal and regional levels in the field of public transport services, data from the administrative-territorial division of the subject of the Russian Federation, current registers of inter-municipal and municipal routes, up-to-date statistical information on the population. The following research methods were used: analysis, survey, formalization.

Results. The research presents a methodology developed by the authors for rapid assessment of the current state of the public transport service system in the subject of the Russian Federation, including an algorithm for its application. The methodology is based on the assessment of six criteria, which are aggregated indicators of the parameters of public transport services in the areas of accessibility, safety, reliability and comfort. The results of the testing of the technique in the Omsk region are presented.

Discussion and conclusions. The results obtained allow us to identify problem areas for which it is necessary to develop and implement measures to improve the quality of public transport services in the short term. The proposed methodology is not a substitute for the methods approved by the current regulatory legal acts, and can be used at the initial stage of development and updating of transport planning documents of the subject of the Russian Federation.

KEYWORDS: Public transport service system, Parameters of the transport service system, Management of passenger automobile transportation, Transport planning, Criteria for evaluating the functioning of the public transport service system, Passenger transportation, Hub of the route network; Route network, Regular transportation routes

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

The article was submitted: 03.11.2024; approved after reviewing: 11.12.2024; accepted for publication: 16.12. 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. Zhigadlo A.P., Shonin A.Y., Eychler I.A. Methodology for assessing the state of transport services for the population of the subject of the Russian Federation on the example of the Omsk region. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): 882-899. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-882-899>

© Zhigadlo A.P., Shonin A.Y., Eychler I.A., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня отрасль пассажирских перевозок в Российской Федерации проходит стадию трансформации. Вектор развития смещается от минимизации финансовой нагрузки на бюджет в сторону полного и качественного обеспечения потребностей населения в транспортном обслуживании. Выполнение данной функции позволяет регионам обеспечить потребности населения в рабочих и культурно-бытовых поездках, при реализации которых покрываются потребности региона в рабочей силе, а также появляются перспективы для развития отдельных направлений для внутреннего туризма.

В Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом до 2035 г., утвержденной распоряжением правительства Российской Федерации № 3363-р от 27.11.2021 г., выделены следующие направления модернизации систем транспортного обслуживания населения:

- повышение транспортной доступности для граждан социально-экономических, туристских и культурных центров;
- повышение доступности транспортных услуг для жителей удаленных, труднодоступных и геостратегических территорий;
- повышение качества транспортных услуг в части комфортности и безопасности перевозок с минимизацией негативного воздействия на окружающую среду при сохранении ценовой доступности перевозок;
- повышение качества транспортных услуг в части скорости обслуживания пассажиров и, как следствие, увеличение подвижности населения;
- создание транспортной инфраструктуры для развития внутреннего туризма¹.

Указанные выше направления получили развитие в научных трудах, посвященных модернизации систем транспортного обслуживания. В работах И.В. Спирина рассматриваются возможности применения концепции устойчивого развития для пассажирского транспорта [1], в этом аспекте ключевую роль играют доку-

менты транспортного планирования, которые должны быть разработаны в каждом субъекте Российской Федерации. Проведенный анализ исследований в области разработки документов транспортного планирования, представленный в [1, 2, 3, 4, 5, 6]², позволил выделить следующие проблемы:

- отсутствие методологических разработок для проектировщиков транспортных систем;
- фрагментарная информационная база транспортного планирования;
- отсутствие достаточных и надежных оценочных показателей функционирования транспортных систем региона;
- устаревший стандарт транспортного обслуживания (ГОСТ Р 51004–96) в области номенклатуры показателей.

Текущие тенденции развития транспортных услуг в Российской Федерации рассмотрены в [7, 8], где представлен анализ объемов оказанных услуг, показателей безопасности, сохранности, экологичности, транспортной, экономической и информационной доступности, а также скорости перемещения и удобств в разрезе основных видов транспорта: автомобильного, железнодорожного и воздушного.

Выделенные в работах тенденции и проблемы эффективной организации работы систем транспортного обслуживания регионов характерны не только для Российской Федерации, как показано в работах [9, 10]. Перестройка транспортных систем с целью повышения качества транспортного обслуживания происходит и в странах ближнего зарубежья, где также ключевой позицией является внесение изменений в действующие федеральные нормативно-правовые базы, с последующей трансформацией региональной политики.

В Российской Федерации в большей степени сформирована достаточная на взгляд авторов федеральная нормативно-правовая база, предлагающая инструменты для проведения комплексной оценки систем транспортного обслуживания регионов с позиции социально-экономической эффективности:

1. Внесены изменения в Федеральный закон от 13 июля 2015 г. № 220-ФЗ «Об орга-

¹ Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом до 2035 г., утв. распоряжением правительства Российской Федерации №3363-р от 27.11.2021 [Электронный ресурс] // Правительство Российской Федерации. URL: <https://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZiOOpQhLI0nUT91RjCbeR.pdf>, свободный. Заглавие с экрана (дата обращения: 09.12.2024).

² Spirin I.V., Matantseva Yu.O., Grishaeva Y.M., Savosina M.I. Planning of passenger transportation in the cities of Russia on the basis of sustainable development // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. 632 (1). 012053.; Mochalin S., Koleber Y., Shonin A., Larin A. Modern issues of forming an assessment of the effectiveness of the functioning of public urban passenger transport systems // E3S Web of Conferences 471, 05012 (2024). DOI:10.1051/e3sconf/202447105012.

низации регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», касающиеся документов транспортного планирования – введены понятия «региональный план транспортного обслуживания» и «региональный стандарт транспортного обслуживания».

2. Проводятся слушания по введению в действие нового Национального стандарта услуги городского пассажирского транспорта.

3. Разработано распоряжение Министерства транспорта от 28 июня 2022 г. N АК-167-р «Об утверждении методических рекомендаций по организации процесса транспортного планирования в сельской местности» и приказ Минтранса РФ от 30 декабря 2021 г. N 482 «Об утверждении методических рекомендаций по оптимизации систем транспортного обслуживания городских агломераций, а также внедрению цифровых технологий оплаты проезда и мониторинга транспортного обслуживания населения», устанавливающие рекомендуемые значения отдельных показателей оценки функционирования транспортных систем.

4. Вступило в силу Постановление Правительства РФ от 8 декабря 2023 г. № 2086 «Об утверждении требований к региональному стандарту транспортного обслуживания населения».

5. Внесены изменения в Распоряжение Минтранса России от 31.01.2017 г. N НА-19-р «Об утверждении социального стандарта транспортного обслуживания населения при осуществлении перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом».

6. Утверждены Поручения Правительству РФ по итогам заседания Президиума Госсовета по вопросам развития транспорта (утверждены Президентом РФ 17.09.2023 г. № ПР-1855ГС), формирующие направления изменений в нормативно-правовую базу, касающуюся организации перевозок «по запросу».

Представленная нормативно-правовая база формирует методологическую базу оценки текущего состояния транспортного обслуживания в субъектах Российской Федерации, на основе которого возможно определение узких мест и разработка социально-экономических проектов по их устранению. Использованию представленной методологической базы посвящены работы [3, 5, 11, 12], выделяющие

в качестве ключевого ограничения неполноту данных по пассажирским перевозкам, а в качестве решения – создание единой информационной базы на уровне субъекта Российской Федерации.

Объединяя вышесказанное, авторы отмечают, что ключевыми элементами системы управления транспортным обслуживанием населения являются разработанные в субъектах Российской Федерации документы транспортного планирования: региональный стандарт транспортного обслуживания, региональный комплексный план транспортного обслуживания, программа комплексного развития транспортной инфраструктуры, комплексная схема транспортного обслуживания, а также социальные стандарты транспортного обслуживания муниципальных образований и субъекта Российской Федерации. Для их разработки необходимо иметь сведения о текущем состоянии системы. Вопросы организации мониторинга параметров транспортных систем субъектов Российской Федерации на их соответствие стандартам транспортного обслуживания представлены в работах сотрудников АО «НИИАТ» и других авторов [8, 12, 13].

Представленные в вышеперечисленных нормативно-правовых актах и работах методики оценки текущего состояния и последующей разработки транспортных моделей требуют достаточно больших временных и финансовых затрат для получения конкретного результата. Основной проблемой такого подхода является достаточно длительная реакция на проблемы, требующие решения в краткосрочной перспективе. В силу этого авторами предложена методика экспресс-анализа состояния транспортного обслуживания в субъекте Российской Федерации, позволяющая выявить проблемные участки, требующие срочных решений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Содержание методики

Согласно представленной нормативно-правовой базе и с учетом поручений по итогам заседания Президиума Госсовета по вопросам развития транспорта, утвержденных Президентом РФ 17.09.2023 г. № ПР-1855ГС, а также изучением существующих научных работ [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20], выделены параметры, оценивающие качество управления и организации транспортного обслуживания населения (таблицы 1, 2, 3, 4).

Таблица 1
Параметр «Доступность»
Источник: составлено авторами.

Table 1
The “Availability” parameter
Source: compiled by the authors.

Документ	Содержание
Распоряжение Минтранса РФ от 31 января 2017 г. N HA-19-р	1. Территориальная доступность остановочных пунктов. 2. Доступность остановочных пунктов, автовокзалов и автостанций для маломобильных групп населения. 3. Доступность транспортных средств для маломобильных групп населения. 4. Ценовая доступность поездок по муниципальным маршрутам регулярных перевозок. 5. Оснащенность автовокзалов, автостанций и остановочных пунктов средствами зрительного информирования пассажиров с актуальной информацией и прочими элементами обустройства. 6. Частота обслуживания остановочных пунктов
Постановление Правительства РФ от 8 декабря 2023 г. № 2086	1. Территориальная доступность регулярных перевозок пассажиров. 2. Ценовая доступность регулярных перевозок пассажиров. 3. Информационная доступность регулярных перевозок пассажиров. 4. Временная доступность регулярных перевозок пассажиров. 5. Иные показатели, характеризующие доступность регулярных перевозок пассажиров, порядок расчета целевых значений которых утверждается нормативными правовыми актами субъектов Российской Федерации
Распоряжение Минтранса РФ от 28 июня 2022 г. N АК-167-р	1. Обеспечить для каждого жителя сельского поселения возможность добираться до административного центра муниципального района на пассажирском транспорте общего пользования, используя при этом регулярные перевозки или перевозки по запросу
	2. Обеспечить минимальную частоту обслуживания муниципальными маршрутами населённых пунктов. 3. Предусмотреть автостанцию в административном центре каждого муниципального района
Приказ Минтранса РФ от 30 декабря 2021 г. N 482	1. Ценовая доступность проезда. 2. Территориальная доступность остановочных пунктов, где интенсивность движения составляет не менее 1 рейса в ч

Таблица 2
Параметр «Безопасность»
Источник: составлено авторами.

Table 2
The “Security” parameter
Source: compiled by the authors.

Документ	Содержание
Постановление Правительства РФ от 8 декабря 2023 г. № 2086	1. Показатели рейсовой безопасности. 2. Показатели технической безопасности. 3. Показатели дорожной безопасности. 4. Показатели экологической безопасности. 5. Иные показатели
Приказ Минтранса РФ от 30 декабря 2021 г. N 482	1. Число погибших и раненых в ДТП с участием пассажирского транспорта

Таблица 3
Параметр «Надежность»
Источник: составлено авторами.

Table 3
The “Reliability” parameter
Source: compiled by the authors.

Документ	Содержание
Распоряжение Минтранса РФ от 31 января 2017 г. N HA-19-р	Соблюдение расписания маршрутов регулярных перевозок

Таблица 4
Параметр «Комфортность»
Источник: составлено авторами.

Table 4
The “Comfort” parameter
Source: compiled by the authors.

Документ	Содержание
Распоряжение Минтранса РФ от 31 января 2017 г. N HA-19-р	1. Оснащенность транспортных средств средствами информирования пассажиров. 2. Оснащенность транспортных средств системой безналичной оплаты проезда. 3. Температура в салоне транспортных средств в любое время года. 4. Соблюдение норм вместимости. 5. Количество пересадок. 6. Экологичность. 7. Превышение установленного заводом-производителем срока службы транспортного средства. 8. Система информирования пассажиров
Постановление Правительства РФ от 8 декабря 2023 г. № 2086 (рег. стандарт)	1. Показатели комфортности регулярных перевозок пассажиров в части ожидания. 2. Показатели комфортности регулярных перевозок пассажиров в части передвижения. 3. Показатели комфортности регулярных перевозок пассажиров в части пересадок. 4. Показатели, определяющие количество транспортно-пересадочных узлов или иных мест пересадки пассажиров, обеспечивающих пересадку и проезд без дополнительной оплаты проезда. 5. Иные показатели
Распоряжение Минтранса РФ от 28 июня 2022 г. N АК-167-р. (планирование в сельской местности)	1. Предельная наполняемость транспортных средств на муниципальных маршрутах не более 3 чел. на 1 кв.м свободной площади салона
Приказ Минтранса РФ от 30 декабря 2021 г. N 482 (агломерации)	1. Индекс качества контрактов на транспортную работу. 2. Доля транспортных средств, оборудованных средствами безналичной оплаты

Оценка указанных параметров проводится в соответствии с действующим законодательством и является неотъемлемой частью Социальных и Региональных стандартов, однако их полная оценка сопряжена с большими финансовыми и временными затратами. Выполнение работ по разработке документов транспортного планирования (разработка регионального комплексного плана транспортного обслуживания населения) начинается от 45 млн руб., а время на их исполнение – 24 мес. Согласно действующей нормативно-правовой базе в субъектах Российской Федерации необходимо актуализировать следующие документы:

- Для субъекта Российской Федерации:
- региональный комплексный план транспортного обслуживания населения;
 - комплексная схема организации транспортного обслуживания;
 - региональный стандарт транспортного обслуживания.

- Для городской агломерации:
- программа комплексного развития транспортной инфраструктуры;

- комплексная схема организации транспортного обслуживания;
 - комплексная схема организации дорожного движения.
- Для муниципального образования:
- программа комплексного развития транспортной инфраструктуры;
 - документ планирования регулярных перевозок;
 - комплексная схема организации дорожного движения;
 - социальный стандарт транспортного обслуживания населения.

В силу количества, стоимости и времени на разработку и (или) актуализацию представленных выше документов возрастает актуальность получения быстрой оценки состояния транспортного обслуживания в субъекте Российской Федерации, позволяющая разработать перечень мероприятий, которые необходимо реализовать в краткосрочной перспективе.

Таблица 5
Критерии оценки целевых параметров качества управления
и организации транспортного обслуживания населения
Источник: составлено авторами.

Table 5
Criteria for evaluating the target parameters of the quality
of management and organization of public transport services
Source: compiled by the authors.

№ п/п	Параметр	Критерии оценки
1.	Доступность	Доступность для населения получения услуг по перевозке пассажиров и багажа автомобильным транспортом
		Обеспеченность населенных пунктов (поселений) муниципального района регулярным транспортным сообщением: автомобильным, водным и железнодорожным транспортом
2.	Безопасность	Число погибших и раненых в ДТП с участием пассажирского транспорта
3.	Надежность	Соблюдение расписания маршрутов регулярных перевозок
4.	Комфортность	Разрыв между временем прибытия и отправления муниципальных и межмуниципальных маршрутов
		Обеспечение потребности населения муниципального района гарантированными перевозками (маршрутами, работающими по регулируемым тарифам)
		Индекс качества контрактов на транспортную работу (для муниципальных районов, входящих в Омскую городскую агломерацию)

Предлагаемая авторами методика позволяет провести быструю оценку ключевых параметров транспортного обслуживания населения и выявить наиболее проблемные участки, требующие оперативного вмешательства. Показатели, предлагаемые к оценке, базируются на действующей и перспективной нормативно-правовой базе и позволяют оценивать параметры (см. таблицы 1,2, 3, 4) укрупненно.

С точки зрения авторов, ключевыми критериями, отраженными во всех проанализированных выше документах, и оценивающими каждый из вышеперечисленных параметров, являются критерии, приведенные в табл.5.

Параметры 2 и 3 позволяют оценивать эффективность системы управления транспортным обслуживанием. Параметры 1 и 4 – сложившуюся маршрутную сеть. Для предварительной оценки текущего состояния маршрутной сети Омской области была проведена оценка по параметрам «Доступность» (1) и «Комфортность» (4).

Параметр 1. Доступность. Одним из ключевых показателей состояния транспортной системы Омской области является показатель доступности, под которым понимается характеристика качества транспортного обслуживания населения, выраженная в наличии возможности получения населением услуг по перевозке пассажиров и багажа автомобильным транспортом.

В качестве критериев оцениваемого параметра использованы:

Критерий Кр1 – доступность для населения получения услуг по перевозке пассажиров и багажа автомобильным транспортом согласно требованиям Распоряжения Министерства транспорта Российской Федерации от 31 января 2017 г. N НА-19-р, определяемая по формуле

$$Kp1 = \frac{\sum_{i=1}^n \chi_{ni}^d}{\sum_{j=1}^m \chi_{nj}} \cdot 100\%,$$

(1)

где χ_{ni}^d – численность населения, проживающего в i-м населенном пункте, обеспеченном хотя бы одним маршрутом регулярных перевозок в муниципальном или межмуниципальном сообщении; m – общее количество населенных пунктов муниципального района, обеспеченных хотя бы одним маршрутом регулярных перевозок в муниципальном или межмуниципальном сообщении; χ_{nj} – численность населения, проживающего в j-м населенном пункте; n – общее количество населенных пунктов района.

Критерий Кр2 – обеспеченность населенных пунктов (поселений) муниципального района регулярным транспортным сообщением: автомобильным, водным, железнодорожным и воздушным транспортом, определяемая по формуле

Таблица 6
Шкала оценки критериев для параметра «Доступность»
Источник: составлено авторами.

Table 6
Evaluation scale of criteria for the “Accessibility” parameter
Source: compiled by the authors.

Критерий	Баллы*		
	0	1	2
Доступность для населения получения услуг по перевозке пассажиров и багажа автомобильным транспортом (Кр1), %	0–94	95–98	99–100
Обеспеченность населенных пунктов (поселений) муниципального района регулярным транспортным сообщением: автомобильным, водным, железнодорожным и воздушным транспортом (Кр2), %	0–79	80–89	90–100

*Шкала баллов:

0 – ситуация неудовлетворительная, требуется принятие срочных решений;
1 – ситуация удовлетворительная, решения необходимы, но принятие срочных решений не требуется;
2 – ситуация хорошая, решения по улучшению возможны, но принятие срочных решений не требуется.

$$Kp2 = \frac{N_i^A}{N_j} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где N_i^A – количество населенных пунктов, обеспеченных хотя бы одним маршрутом регулярных перевозок в муниципальном или межмуниципальном сообщении; N_j – общее количество населенных пунктов района (согласно закону субъекта Российской Федерации об административно-территориальном устройстве).

Для оценки текущего состояния организации транспортного обслуживания населения по параметру «Доступность» предложена шкала оценки по выделенным критериям (табл. 6).

Параметр 2. Комфортность. Данный параметр характеризует уровень удобства пользования услугами по перевозке пассажиров и багажа автомобильным, водным, железнодорожным и воздушным транспортом в межмуниципальном и муниципальном сообщении.

В качестве критериев оцениваемого параметра использованы:

Критерий Кр3 – разрыв между временем прибытия и отправления рейсов муниципальных и межмуниципальных маршрутов. Данный критерий определяет потери времени пассажиром при совершении пересадки, вызванной необходимостью выехать за пределы муниципального района. Оценка предложенного критерия производилась на основе сформированных таблиц расписаний узловых пунктов маршрутной сети. К узловым пунктам маршрутной сети в рамках рассматриваемой методики относится инфраструктурный объект и прилегающая территория, где осуществляется

пересадка пассажира с одного вида транспорта на другой. К таким пунктам принадлежат автовокзалы, железнодорожные станции, аэропорты местных линий и пристани. Источником данных для построения таблиц являлись утвержденные реестры муниципальных маршрутов муниципальных районов субъекта РФ (приложение 1). Оценка разрыва по времени вычислялась как разница между временем прибытия и отправления рейсов маршрутов (формулы (3, 4)).

При прибытии пассажира и необходимости выехать в населенный пункт муниципального образования субъекта Российской Федерации

$$Kp3 = \frac{\sum_{i=1}^n (T_0^M - T_n^{MM})}{n} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где T_0^M – время отправления рейсов муниципальных маршрутов; T_n^{MM} – время прибытия рейсов межмуниципальных маршрутов; n – количество отправок рейсов муниципальных маршрутов.

При прибытии пассажира из населенных пунктов муниципального образования субъекта Российской Федерации и необходимости добраться до места назначения, находящегося в другом образовании:

$$Kp3 = \frac{\sum_{i=1}^n (T_0^{MM} - T_n^M)}{n} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где T_0^{MM} – время отправления рейсов межмуниципальных маршрутов; T_n^M – время прибытия рейсов муниципальных маршрутов; n – количество отправок рейсов межмуниципальных маршрутов.

Критерий Кр4 – стабильность маршрутной сети позволяет оценить возможность получения населением услуги по перевозке в случае возникновения сложностей на межмуниципальных маршрутах, работающих по нерегулируемому тарифу. Расчет критерия производится по следующему алгоритму: определение максимального количества пассажиров ($N_{\text{пасс}}^{\text{max}}$), которое способны перевезти действующие в муниципальном районе межмуниципальные маршруты:

$$N_{\text{пасс}}^{\text{max}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (n_{ij}^p \cdot \text{ПВ}_j), \quad (5)$$

где n_{ij}^p – количество рейсов, выполняемых j-м классом подвижного состава по i-му межмуниципальному маршруту, имеющему конечный остановочный пункт внутри муниципального района; – определенная в соответствии с реестром межмуниципальных маршрутов максимальное количество мест для j-го класса подвижного состава; i – количество маршрутов, обслуживающих муниципальный район; j – класс подвижного состава, используемый на i-м маршруте.

Определение в соответствии с формулой (5) максимального количества пассажиров, которое способны перевезти действующие в муниципальном районе межмуниципальные маршруты, работающие по регулируемым тарифам ($N_{\text{пасс}}^{\text{рег}}$).

Определение коэффициента обеспечения потребности населения муниципального района гарантированными перевозками (маршрутами, работающими по регулируемым тарифам).

$$\text{Кр4} = \frac{N_{\text{пасс}}^{\text{рег}}}{\text{СП}}, \quad (6)$$

где СП – суточная потребность в перемещении населения муниципального района, получаемая в результате анализа отчетов перевозчиков, проведенных исследований пассажиропотока.

Вспомогательный критерий Кр5 определяется как количество перевозчиков на муниципальных маршрутах района. Критерий позволяет оценить возможность организации сочетания регулярных перевозок по муниципальным маршрутам с перевозками по запросу. Конкретные значения для каждого критерия приведены в выводах по муниципальным районам, для которых разработаны рекомендации по включению отдельных населенных

пунктов в реестр муниципальных маршрутов муниципального района.

Дополнительно для районов, входящих в городскую агломерацию, в соответствии с методическими рекомендациями, утвержденными приказом Минтранса РФ от 30 декабря 2021 г. № 482 предлагается использовать *индекс качества контрактов на транспортную работу (Кр6)*, который рассчитывается как сумма баллов за 3 компонента индекса: 0,3 балла, если все муниципальные перевозки в крупнейшем городе агломерации осуществляются по регулируемым тарифам; 0,2 балла, если все межмуниципальные маршруты регулярных перевозок осуществляются по регулируемым тарифам; 0,5 баллов, если перевозки осуществляются по контрактам на транспортную работу.

Для оценки текущего состояния организации транспортного обслуживания населения по параметру «Комфортность» предложена шкала оценки по выделенным критериям (таблица 7).

Представленные параметры позволяют на основе анализа, имеющейся в распоряжении органов исполнительной власти регионов, провести предварительную оценку состояния системы транспортного обслуживания и определить набор мероприятий, необходимых для достижения минимально требуемых новыми документами параметров.

Алгоритм оценки параметров

В рамках осуществлений расчетов параметров по предложенному в работе алгоритму необходимо:

1. Провести сбор данных о территориальном устройстве субъекта Российской Федерации, численности населения в целом по субъекту и по отдельным муниципальным образованиям, населенным пунктам (источник данных: закон субъекта Российской Федерации об административно-территориальном устройстве, статистическая информация о количестве проживающего населения в муниципальных образованиях субъектов дифференцировано по населенным пунктам).

2. Провести предварительную оценку территориальной доступности населенных пунктов на основе анализа информации о состоянии дорог субъекта Российской Федерации (источник данных: законодательные акты о перечне автомобильных дорог общего пользования местного, регионального и федерального значения, данные об обследовании состояния дорог).

Таблица 7
Шкала оценки критериев для параметра «Комфортность»
Источник: составлено авторами.

Table 7
Evaluation scale of criteria for the «Comfort» parameter
Source: compiled by the authors.

Критерий	Баллы*		
	0	1	2
Разрыв между временем прибытия и отправления рейсов муниципальных и межмуниципальных маршрутов (Кр3), мин	более 180	60–179	0–59
Обеспечение потребности населения муниципального района гарантированными перевозками (Кр4)	0–0,19	0,2 – 0,59	более 0,6
Индекс качества контрактов на транспортную работу (для муниципальных образований, входящих в городскую агломерацию) (Кр6)	0–0,19	0,2 – 0,49	более 0,5

* Шкала баллов:
0 – ситуация неудовлетворительная, требуется принятие срочных решений;
1 – ситуация удовлетворительная, решения необходимы, но принятие срочных решений не требуется;
2 – ситуация хорошая, решения по улучшению возможны, но принятие срочных решений не требуется.

3. Провести предварительную оценку доступности транспортного обслуживания для населения субъекта Российской Федерации на основе определения не включенных в действующие реестры регулярных перевозок населенных пунктов и численности постоянно проживающего на территории таких пунктов жителей (источник данных: реестр межмуниципальных маршрутов регулярных перевозок на территории субъекта Российской Федерации; реестры муниципальных маршрутов регулярных перевозок на территории муниципального образования субъекта Российской Федерации; реестр пригородных маршрутов железнодорожного транспорта на территории субъекта; реестры межмуниципальных и муниципальных маршрутов водного транспорта на территории субъекта; реестр пригородных (межмуниципальных) маршрутов воздушного транспорта).

4. Выполнить расчет критериев Кр1 и Кр2 по формулам (1) и (2) по каждому муниципальному образованию субъекта Российской Федерации.

5. Заполнить карточку муниципального образования, отражающую основные характеристики: количество населенных пунктов; количество населенных пунктов, не обеспеченных маршрутами регулярных перевозок автомобильным транспортом; количество проживающего населения (чел.); количество проживающего населения без транспортного обслуживания (чел.); суточное количество

пассажиров, чел.; количество межмуниципальных маршрутов, имеющих конечный ОП на территории района, ед. (из них на регулируемом тарифе); количество межмуниципальных маршрутов, транзитом проходящих по территории района, ед.; количество муниципальных маршрутов, ед. (из них на регулируемом тарифе).

6. Провести предварительную оценку согласованности муниципальных маршрутов с прочими маршрутами на территории муниципального образования субъекта Российской Федерации путем составления сводного расписания узловых пунктов маршрутной сети (источник данных: планируемое расписание для каждого остановочного пункта по межмуниципальным и муниципальным маршрутам регулярных перевозок различными видами транспорта в субъекте).

7. Выполнить расчет критерия Кр3 по формулам (3) и (4).

8. Провести анализ достаточности сложившейся сети межмуниципальных маршрутов для осуществления транспортного обслуживания района:

а. Определить количество пассажиров, выезжающих и въезжающих на территорию муниципального образования субъекта Российской Федерации (источник данных: данные о количестве перевезенных пассажиров по межмуниципальным и междугородним маршрутам регулярных перевозок; отчеты перевозчиков, работающих на маршрутной сети, о ко-

личестве перевезенных пассажиров, объемах реализованной билетной продукции на территории субъекта Российской Федерации).

б. Оценить максимально возможное количество перевезенных пассажиров района по формуле (5) (источник данных реестр межмуниципальных маршрутов регулярных перевозок; реестры муниципальных маршрутов регулярных перевозок на территории муниципального образования; реестр пригородных маршрутов железнодорожного транспорта; реестры межмуниципальных и муниципальных маршрутов водного транспорта; реестр пригородных (межмуниципальных) маршрутов воздушного транспорта).

9. Произвести оценку стабильности маршрутной сети Кр4 по формуле (6).

10. Если муниципальное образование входит в городскую агломерацию района, произвести оценку Кр6 (источник данных: реестр межмуниципальных маршрутов регулярных перевозок на территории субъекта Российской Федерации; реестры муниципальных маршрутов регулярных перевозок на территории муниципального образования).

11. Пункты 3–10 выполнить для каждого муниципального образования субъекта Российской Федерации.

12. Составить сводную таблицу в разрезе муниципальных образований субъекта Российской Федерации.

13. Определить перечень мероприятий, необходимых к реализации в краткосрочной перспективе.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработанная авторами методика была апробирована на территории Омской области. В статье приведен пример расчета предложенных критериев для Большеуковского муниципального района Омской области.

Краткая характеристика Большеуковского муниципального района в части организации транспортного обслуживания населения приведена в таблице 8.

Оценка текущего состояния Большеуковского муниципального района по параметру «Доступность».

Критерии Кр1=99% и Кр2=84% свидетельствуют об удовлетворительном состоянии исследуемого параметра.

Анализ действующих реестров муниципальных и межмуниципальных маршрутов позволил определить, что в маршрутной сети

муниципального района отсутствуют: село Листвяги, село Аев, деревня Чебачиха.

С. Листвяги расположено на расстоянии 80 км от районного центра с. Большие Уки в труднодоступной местности с автомобильной дорогой, находящейся в неудовлетворительном состоянии, что не позволяет организовать регулярное автобусное сообщение.

С. Аев примыкает к с. Большие Уки и обслуживается маршрутом № 1 Внутриселковский (Уки–Маслозавод). Согласно требованиям Социального стандарта транспортная доступность с. Аев находится в нормативных значениях и дополнительных решений не требует.

Оценка текущего состояния Большеуковского муниципального района по параметру «Комфортность».

Для Кр3 среднее время ожидания для населения, прибывающего в с. Большие Уки на муниципальных маршрутах с целью продолжения движения по направлению в г. Омск, составляет 265 мин. При прибытии из г. Омска и необходимости выезда в населенные пункты района, не обеспеченные межмуниципальными маршрутами, – 80 мин (при этом 2 рейса муниципальных маршрутов выполняемых до д. Белогривка (маршрут № 101 и № 101р) обеспечивают только муниципальные перемещения и не связаны с межмуниципальным транспортом) и при необходимости прибывшего пассажира воспользоваться данными маршрутами ожидание будет превышать 24 ч. Значения коэффициентов получены на основе данных таблиц 9, 10. В связи с этим рекомендуем при разработке Социального стандарта транспортного обслуживания населения Большеуковского муниципального района пересмотреть расписания муниципального транспорта с целью повышения согласованности маршрутов.

Критерий Кр4. Максимальное количество пассажиров, которые могут быть перевезены по направлению Большеуковский муниципальный район – другие районы Омской области (включая г. Омск) составляет 82 чел., из них маршрутами, действующими на регулируемом тарифе (1074 Омск – Большие Уки и 1240 Большие Уки–Тара) может быть перевезено 40 чел. Значение Кр4=1,33, что по предложенной шкале оценивает состояние транспортного обслуживания населения муниципального района как хорошее – система устойчива к возможным рискам изменения условий перевозок по нерегулируемым тарифам.

Таблица 8
Характеристика Большеуковского муниципального района
в части организации транспортного обслуживания населения
Источник: составлено авторами.

Table 8
Characteristics of the Bolsheukovsky municipal district in terms
of the organization of public transport services
Source: compiled by the authors.

Параметр		Значение
Количество населенных пунктов		19
Количество населенных пунктов, не обеспеченных маршрутами регулярных перевозок автомобильным транспортом		2
Количество проживающего населения (чел.)		5942
Количество проживающего населения без транспортного обслуживания (чел.)		30
Суточное количество пассажиров, чел.	Оценочный показатель	60
	Фактические данные по результатам замеров	30
Количество межмуниципальных маршрутов, имеющих конечный ОП на территории района, ед. (из них на регулируемом тарифе)		3 (1)
Количество межмуниципальных маршрутов, транзитом проходящих по территории района, ед.		-
Количество муниципальных маршрутов, ед. (из них на регулируемом тарифе)		9 (9)

Таблица 9
Разрыв по времени между прибывающими рейсами муниципальных маршрутов района
и отправляемыми из района рейсами межмуниципальных маршрутов
(Большеуковский муниципальный район)
Источник: составлено авторами.

Table 9
Time gap between incoming flights of municipal routes of the district and flights
of intermunicipal routes departing from the district
(Bolsheukovsky municipal district)
Source: compiled by the authors.

Время	Прибытие (в с. Большие Уки)	Отправление (из с. Большие Уки)	
	Муниципальные маршруты	Межмуниципальные маршруты (по направлению в г. Омск)	Межмуниципальные маршруты автомобильного транспорта (в другие районы)
4:30		9063 Становка-Большие Уки-Омск (автовокзал)	
6:00		1074 Омск-Большие Уки	
8:05	103 Большие Уки-Форпост 103р Большие Уки-Форпост		
8:55		1076 Омск-Чаунино	
9:05	101 Большие Уки-Белогривка 101р Большие Уки-Белогривка		
9:20			1240 Большие Уки-Тара (пн; вт; ср; пт; сб; вс)
17:05		9063 Становка-Большие Уки-Омск (автовокзал)	

Таблица 10

Разрыв по времени между прибывающими в район рейсами межмуниципальных маршрутов и отправляемыми рейсами муниципальных маршрутов района (Большеуковский муниципальный район)

Источник: составлено авторами.

Table 10

Time gap between flights of intermunicipal routes arriving in the district and flights of municipal routes departing from the district (Bolsheukovsky municipal district)

Source: compiled by the authors.

Время	Прибытие (в с. Большие Уки)		Отправление (из с. Большие Уки)
	Межмуниципальные маршруты (по направлению из г. Омска)	Межмуниципальные маршруты автомобильного транспорта (по направлению из других муниципальных районов)	Муниципальные маршруты
4:30	9063 Становка-Большие Уки-Омск (автовокзал)		
6:00	1074 Омск-Большие Уки		
8:05			103 Большие Уки-Форпост 103р Большие Уки-Форпост
8:55	1076 Омск-Чаунино		
9:05			101 Большие Уки-Белогривка 101р Большие Уки-Белогривка
9:20		1240 Большие Уки-Тара (пн; вт; ср; чт; сб; вс)	
17:05	9063 Становка-Большие Уки-Омск (автовокзал)		

Подобным образом был выполнен анализ и по другим районам Омской области и составлена сводная таблица (таблица 11).

Таблица 11

Балльная оценка критериев организации транспортного обслуживания населения в муниципальных районах Омской области

Источник: составлено авторами.

Table 11

Scoring criteria for the organization of public transport services in the municipal districts of the Omsk region

Source: compiled by the authors.

Муниципальный район	«Доступность»		«Комфортность»			
	Кр1	Кр2	Кр3		Кр4	Кр6
			(3)	(4)		
Азовский	2	2	2	2	0	0
Горьковский	2	2	1	1	2	0
Кормиловский	2	2	2	2	2	0
Любинский	1	1	2	2	0	0
Марьяновский	1	1	2	2	2	0
Таврический	2	2	2	2	0	0
Шербакульский	2	2	2	2	1	0
Омский	2	2	-	-	-	0
Большереченский	1	0	2	2	2	-
Большеуковский	2	1	0	1	2	-

Муниципальный район	«Доступность»		«Комфортность»			
	Кр1	Кр2	Кр3		Кр4	Кр6
			(3)	(4)		
Знаменский	1	0	1	1	2	-
Исилькульский	2	2	2	2	2	-
Калачинский	2	2	2	2	1	-
Колосовский	1	2	1	1	2	-
Крутинский	2	1	1	2	2	-
Москаленский	2	2	1	2	0	-
Муромцевский	2	1	2	1	2	-
Называевский	1	2	1	1	2	-
Нижнеомский	1	2	2	2	2	-
Нововаршавский	2	2	1	1	1	-
Одесский	2	2	1	2	0	-
Оконешниковский	0	0	2	2	2	-
Павлоградский	2	2	2	2	0	-
Полтавский	2	2	1	2	0	-
Русско-Полянский	2	1	2	2	0	-
Саргатский	2	2	1	2	0	-
Седельниковский	1	1	2	0	2	-
Тарский	1	0	1	2	2	-
Тевризский	2	1	1	0	2	-
Тюкалинский	2	2	2	2	2	-
Усть-Ишимский	1	1	0	0	0	-
Черлакский	2	2	1	2	0	-

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценивая полученные результаты (см. таблицу 11), отмечаем, что маршрутная сеть Омской области характеризуется:

- 1. Относительной доступностью транспортных услуг для населения (например, в Оконешниковском районе Кр1 оценивается как неудовлетворительный), 4 района из 32 имеют неудовлетворительную оценку по критерию Кр2, что свидетельствует о недостаточном развитии сети муниципальных и межмуниципальных маршрутов.
- 2. Низкой степенью устойчивости к рискам изменений условий поездок по нерегулируемым тарифам (для 12 районов из 32 оценка по критерию Кр4 находится на неудовлетворительном уровне). Анализ устойчивости маршрутной сети Омской области к рискам изменений условий перевозок по нерегулируемому

- тарифу позволил определить районы, население которых в меньшей мере обеспечено гарантированными перевозками:
- 2.1. По Омской городской агломерации – Азовский, Любинский, Марьяновский, Таврический муниципальные районы.
- 2.2. По другим муниципальным районам – Москаленский, Нововаршавский, Павлоградский, Русско-Полянский, Саргатский, Усть-Ишимский и Черлакский муниципальные районы Омской области.
- 3. Высокой степенью согласованности расписаний муниципальных и межмуниципальных маршрутов (только 4 района из 32 имеют неудовлетворительную оценку по Кр3).
- По результатам анализа были сформированы следующие предложения:
В части повышения параметра «Доступность»:

1. Предлагается внести в реестр межмуниципальных маршрутов регулярных перевозок для части маршрутов остановок «по требованию». Данное решение не потребует изменения трассы маршрутов, что не вызовет перепробегов и, как следствие, рост затрат на обслуживание маршрута. Основными критериями оценки возможности применения данного решения являются:

- нахождение вносимого остановочного пункта на трассе межмуниципального маршрута;

- удаленность населенного пункта от трассы маршрута регулярных перевозок не превышает максимального расстояния пешеходной доступности, предложенного в региональном стандарте и равного 3 км (рекомендованное значение удаленности не должно превышать 1,5 км, согласно приказу Министерства транспорта Российской Федерации от 30 декабря 2021 г. № 482).

2. Организация перевозок по запросу. Предложение обосновано следующими нормативно-правовыми актами: Распоряжением от 28 июня 2022 г. N АК-167-р Министерства транспорта Российской Федерации рекомендуется обеспечить для каждого жителя сельского поселения возможность добираться до административного центра муниципального района на пассажирском транспорте общего пользования, используя при этом регулярные перевозки или перевозки по запросу.

Для обеспечения транспортной доступности жителей таких населенных пунктов предложено распоряжение Министерства транспорта и дорожного хозяйства Омской области обязать органы местного самоуправления внести изменения в реестры их муниципальных маршрутов. Изменения касаются отдельных маршрутов в части включения новых остановочных пунктов, расположенных в ранее не обслуживаемых населенных пунктах, и изменения соответствующих расписаний с указанием «заезд при наличии запроса».

В части повышения параметра «Комфортность»:

1. Корректировка расписаний муниципальных маршрутов для уменьшения разрыва между временем прибытия и отправления рейсов муниципальных и межмуниципальных маршрутов. В рамках произведенной оценки критерия Кр3 в первую очередь корректировать расписания необходимо в Большеуковском, Седельниковском, Тевризском и Усть-Ишимском муниципальных районах Омской области. Перепроектирование муниципальной

маршрутной сети указанных районов предлагается совместить с разработкой Социальных стандартов для указанных муниципальных районов.

2. Повышение устойчивости маршрутной сети Омской области к рискам изменений условий перевозок по нерегулируемому тарифу (Кр4 и Кр6) за счет совершенствования каркаса маршрутной сети. Для этого предлагается рассмотреть возможность перевода части маршрутов на регулируемые тарифы.

Приоритетными районами для введения маршрутов, работающих на регулируемом тарифе, являются:

- для районов, входящих в Омскую городскую агломерацию, $N_p^{гп}$ выше 0,5 рейсов в сутки;

- для прочих районов – $N_p^{гп}$ выше 1 рейса в сутки.

Для районов, где $N_p^{гп}$ менее установленных значений – перевод на регулируемый тариф предлагается рассматривать при наличии в бюджете Омской области необходимых денежных средств.

Согласно полученным значениям приоритетными муниципальными районами для внесения изменений являются: Азовский, Любинский, Таврический, Саргатский и Черлакский.

Использование предложенной авторами методики и полученные в ходе ее апробации результаты позволяют говорить о перспективности ее применения для оценки текущего состояния системы транспортного обслуживания населения и принятия оперативных управленческих решений по его улучшению. Однако при формировании плана мероприятий по развитию системы на долгосрочную перспективу необходимо проведение дополнительных исследований и анализа ситуации по критериям, указанным в новых нормативно-правовых актах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аредова А.К., Гришаева Ю.М., Матанцева О.Ю., Спирин И.В. Перевозки пассажиров транспортом общего пользования по регулируемым тарифам // Вестник РМАТ. 2021. № 4. С. 33–39.

2. Матанцева О.Ю., Белогребень А.А., Спирин И.В. Совершенствование порядка определения начальной (максимальной) цены контракта при осуществлении закупок в сфере регулярных пассажирских перевозок автомобильным и городским наземным электрическим транспортом при переходе на брутто-модель взаимодействия с перевозчиками // Научный вестник автомобильного транспорта. 2021. № 2. С. 5–15.

3. Сенин И.С., Замбрицкая А.А. Особенности формирования регионального стандарта транс-

портного обслуживания населения // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2024. № 2. С. 83–85.

4. Соболев С.А. Формирование инструментария стратегического планирования для управления развитием российских агломераций // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2023. № 2. С. 75–87. DOI: <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-2-75>.

5. Скворцова Г.Г. Стандарт транспортного обслуживания как основа повышения качества пассажирских перевозок транспортом общего пользования // Russian Journal of Management. 2023. Т. 11, № 4. С. 58–68.

6. Якунин Н.Н., Якунина Н.В., Любимов И.И. Региональные пассажирские автотранспортные системы: постановка задачи, первые результаты оценивания // Вестник СибАДИ. 2023; 20(6): 748–761. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-748-761>

7. Капелюк З.А., Попова Я.В. Тенденции развития транспортных услуг // Научно-теоретический журнал «Вестник СибУПК». 2020. № 2 (32). С. 30–34.

8. Капелюк З.А., Попова Я.В. Показатели качества транспортных услуг для оценки качества обслуживания населения // Научные исследования и разработки. Экономика. 2023. Т. 11, № 1. С. 54–60.

9. Назаров М.И., Омонтурдиев А.М. Территориальная организация транспортного обслуживания населения Сурхандарьинской области // Экономика и социум. 2024. № 5-1 (120). С. 1459–1473.

10. Синютин К.В. Актуализация существующих стандартов в сфере транспортного обслуживания населения общественным транспортом Республики Беларусь // Вестник Брестского государственного технического университета. 2022. № 2 (128). С. 182–185.

11. Асиян Л.В., Бичахчан Э.С., Матвеев Т.И. Правовые основы деятельности органов местного самоуправления в сфере муниципального транспорта // Современная школа России. Вопросы модернизации. 2022. № 5-1 (42). С. 14–15.

12. Михеева Т.В., Бадритдинов Б.Р., Асадуллин Т.Р. Единая статистическая база как инструмент мониторинга соблюдения стандартов транспортного обслуживания населения ПТОП // Научный вестник автомобильного транспорта. 2023. № 2. С. 31–40.

13. Ушаков Р.И. Оценка уровня развития социальной инфраструктуры сельских территорий на примере Московской области // Региональные проблемы преобразования экономики. 2024. № 5 (163). С. 42–53. DOI: <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2024-5-42-53>

14. Фадеев А.И., Ильянков А.М. Управление транспортным предложением на регулярных междугородных автобусных линиях // Вестник СибАДИ. 2023; 20(5): 632–648. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-632-648>. EDN: WMBMDI

15. Jingxu Chen, Zhiyuan Liu, Senlai Zhu, Wei Wang. Design of limited-stop bus service with capacity constraint and stochastic travel time // Transportation

Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2015; Volume 83: 1-15. DOI: doi.org/10.1016/j.tre.2015.08.007

16. Курохтина А.О., Фирсова В.П., Полягалова О.В., Прокофьева О.С. Исследование регулярных перевозок пассажиров на примере города Иркутска // Молодежный вестник ИрГТУ. 2024. Т. 14, № 1. С. 45–50.

17. Чебокичина Н.М., Капсаргина С.А. Организация транспортного обслуживания населения в Таштыпском районе // Аграрное и земельное право. 2024. № 3 (231). С. 52–55. https://doi.org/10.47643/1815-1329_2024_3_52.

18. Ланцева В.Ю., Восканян А.А. Критерии качества и доступности транспортных услуг, оказываемых населению // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова. 2023. № 2 (43). С. 118–120.

19. Кривко Е.В. Основные положения методики учета общественных затрат времени пассажиров в проектах дорожно-транспортной сферы // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15, № 2. URL: <https://esj.today/PDF/38ECVN223.pdf>

20. Yakimov M.R. Features of the use of geospatial data in the development of transport planning documents // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. 2022. Т. 5. No 1. pp. 400–404.

REFERENCES

1. Aredova A.K., Grishaeva Ju.M., Matanceva O.Ju., Spirin I.V. Transportation of passengers by public transport at regulated tariffs. *Vestnik RIAT*. 2021; 4: 33–39. (In Russ).

2. Matantseva O.YU., Belogreben A.A., Spirin I.V. Improving the procedure for determining the initial (maximum) contract price when purchases in the field of regular passenger transportation by road and urban ground electric transport in the transition to the gross model interaction with carriers. *The bulletin of road transport research*. 2021; 2: 33–39. (In Russ).

3. Senin I.S., Zambrzhitskaya A.A. Features of the formation of a regional standard of transport services for the population. *SCIENCE. ENGINEERING. TECHNOLOGY (polytechnical bulletin)*. 2024; 2: 83–85. (In Russ).

4. Sobolev S.A. [Forming a strategic planning toolkit to manage the development of russian agglomerations]. *Intellekt. Innovacii. Investicii [Intellect. Innovations. Investments]*. 2023; Vol. 2: 75–87. DOI: <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-2-75>.

5. Skvorcova G. Transport service standard as the basis for improving the quality of passenger transportation by public transport. *Russian Journal of Management*. 2023; 11 (4): 58–68. (In Russ).

6. Yakunin N.N., Yakunina N.V., Lyubimov I.I. Regional passenger motor transport systems: problem statement, first estimation results. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(6): 748–761. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-748-761>

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

8. Kapelyuk Z.A., Popova Ya.V. Quality Indicators of Transport Services to Assess the Quality of Public Services. *SCIENTIFIC RESEARCH AND DEVELOPMENT. ECONOMICS*. 2023; 11(1): 54–60. (In Russ).

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

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

11. Asilyan L., Bichakhchan E., Matevosyan T. Legal bases for the activities of local government bodies in the field of municipal transport. *Sovremennayas-hkola Rossii. Voprosy` modernizacii*. 2022; 5-1 (42): 14–15. (In Russ).

12. Mikheyeva T.V., Badritdinov B.R., Asadulin T.R. Database of statistics as a tool for monitoring transport service standards. *The bulletin of road transport research*. 2023; 2: 31–40. (In Russ).

13. Ushakov R. I. Assessment of the level of development of the social infrastructure of rural areas on the example of the Moscow region. *Regional'ny`eproblemy` preobrazovaniya ekonomiki*. 2024; 5 (163): 42–53. (In Russ). DOI: <https://doi.org/10.26726/1812-7096-2024-5-42-53>

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

15. Jingxu Chen, Zhiyuan Liu, Senlai Zhu, Wei Wang. Design of limited-stop bus service with capacity constraint and stochastic travel time. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2015; Volume 83: 1–15. DOI: doi.org/10.1016/j.tre.2015.08.007

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

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

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

19. Krivko E.V. Analysis of domestic methods of accounting for the impact of passenger time spent on assessing the social effectiveness of investments in road transport projects. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(2). URL: <https://esj.today/PD-F/38ECVN223.pdf>

20. Yakimov M.R. Features of the use of geoanalytical data in the development of transport planning documents. *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications*. 2022; 5 (1): 400–404.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Жигадо А.П. Концептуализация, валидация.

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

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

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Zhigadlo A.P. Conceptualization, validation.

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

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

SPIN-код: 6598-1490,

Scopus Author ID: 57202984669,

Researcher ID: N-6758-2017.

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

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

e-mail: antex@bk.ru

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

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

SPIN-код: 7562-4729,

Scopus Author ID: 57728886700,

e-mail: vaniaeichler@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

SPIN-code: 6598-1490,

Scopus Author ID: 57202984669,

Researcher ID: N-6758-2017.

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

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

e-mail: antex@bk.ru

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

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

SPIN-code: 7562-4729,

Scopus Author ID: 57728886700,

e-mail: vaniaeichler@gmail.com

Научная статья
УДК 629.113.001
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-900-913>
EDN: SEATMZ



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЯГОВО-ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОЛЁСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ГИБРИДНОЙ СИЛОВЫМИ УСТАНОВКАМИ НА СТЕНДАХ С БЕГОВЫМИ БАРАБАНАМИ

П.А. Киселёв ✉, А.И. Федотов, О.С. Яньков, С.Н. Кривцов
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия
✉ ответственный автор
pavel.kiselev.97.97@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Современные колесные транспортные средства (КТС) с электрическими и гибридными силовыми установками (ЭСУ и ГСУ) становятся все более распространенными. Очевидно, что с ростом количества КТС с ЭСУ и ГСУ возникает необходимость в проведении полноценного и качественного исследования рабочих процессов КТС как на этапах производства и доводки на предприятиях-изготовителях, так и в условиях эксплуатации на станциях технического обслуживания (СТО) и прочих организациях. Исследование технического состояния КТС с ЭСУ и ГСУ с классической компоновкой силового агрегата и трансмиссии (привод на переднюю или заднюю ось) вполне возможен на существующих стендах. Но при исследовании КТС с ЭСУ и ГСУ с полным приводом или с электродвигателем-генератором (ЭГ) на каждое ведущее колесо возникает проблема, связанная с отсутствием методов и средств для измерения силы тяги, индивидуально на каждом колесе.

Материалы и методы. В данном разделе приводится анализ возможностей проведения исследования технического состояния КТС с ЭСУ и ГСУ на современных силовых и инерционных стендах, реализующих принцип обратимости движения.

Результаты. Разработаны методы исследования тягово-динамических свойств КТС с ЭСУ и ГСУ, в ходе реализации которых предлагается использовать созданный исследовательский стендовый комплекс, включающий гибридный стенд с управляющими и измерительными системами, позволяющими определять силы и мощность на ведущих колёсах КТС, а также временные и кинематические параметры процесса его функционирования. В ходе экспериментальных исследований получены результаты процессов функционирования автомобилей Kia Soul EV и Toyota Prius NHW20, выполнен анализ их силовых и кинематических параметров.

Заключение. В результате исследования доказано, что для обеспечения высокоинформативных и стабильных тестовых режимов функционирования КТС в процессе исследования их тягово-динамических свойств необходимо использовать гибридные стенды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электрические силовые установки, гибридные силовые установки, исследование, испытание, диагностика, контроль технического состояния, стенды с беговыми барабанами

Статья поступила в редакцию 01.10.2024; одобрена после рецензирования 24.10.2024; принята к публикации 16.12.2024.

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: Киселёв П.А., Федотов А.И., Яньков О.С., Кривцов С.Н. Исследование тягово-динамических свойств колёсных транспортных средств с электрической и гибридной силовыми установками на стендах с беговыми барабанами // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 900-913. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-900-913>

© Киселёв П.А., Федотов А.И., Яньков О.С., Кривцов С.Н., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-900-913>
EDN: SEATMZ

INVESTIGATION OF TRACTION AND DYNAMIC PROPERTIES OF WHEELED VEHICLES WITH ELECTRIC AND HYBRID POWER PLANTS ON THE TEST STANDS WITH RUNNING DRUMS

Pavel A.I. Kiselyov ✉, **Alexander I. Fedotov**, **Oleg S. Yan'kov**, **Sergey N. Krivtsov**
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia
✉ corresponding author
pavel.kiselev.97.97@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Modern wheeled vehicles with electric and hybrid power plants are becoming more and more widespread. It is obvious that with the increasing number of wheeled vehicles with electric and hybrid power plants, there is a need to conduct a full-fledged and qualitative study of the working processes of wheeled vehicles both at the stages of production and fine-tuning at manufacturing enterprises, and in operating conditions at the service stations and other organizations. The research of the technical condition of a wheeled vehicle with electric and hybrid power plants with a classic layout of the power unit and transmission (front or rear axle drive) is quite possible to be conducted on existing stands. But when testing wheeled vehicles with electric and hybrid power plants with all-wheel drive or with an electric motor generator for each drive wheel, a problem arises due to the lack of methods and means to measure traction force on each wheel individually.

Materials and methods. This section provides an analysis of the possibilities of conducting a study of the technical condition of wheeled vehicles with electric and hybrid power plants on modern power and inertia stands that apply the principle of reversibility of motion.

Results. Methods have been developed to study the traction and dynamic properties of wheeled vehicles with electric and hybrid power plants, to implement it was proposed to use developed research stand complex, which includes a hybrid stand with control and measuring systems that allow to determine forces and power on the driving wheels of vehicles, as well as time and kinematic parameters of its functioning process. During the experimental studies, the results of Kia Soul EV and Toyota Prius NHW20 operation processes were obtained, their power and kinematic parameters were analyzed.

Conclusion. As a result of the study, it has been proved that in order to ensure highly informative and stable test modes of wheeled vehicle's operation in the process of studying their traction and dynamic properties, it is necessary to use hybrid stands.

KEYWORDS: electric power plants, hybrid power plants, research, testing, diagnostics, control of technical condition, stands with running drums

The article was submitted: 1.10.2024; approved after reviewing: 24.10.2024; accepted for publication: 16.12.2024.

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. Kiselyov P.A., Fedotov A.I., Yan'kov O.S., Krivtsov S.N. Investigation of traction and dynamic properties of wheeled vehicles with electric and hybrid power plants on the test stands with running drums. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): 900-913. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-900-913>

© Kiselyov P.A., Fedotov A.I., Yan'kov O.S., Krivtsov S.N., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

На автомобильных дорогах нашей страны наблюдается активный рост КТС с ЭСУ и ГСУ. Согласно исследованию статистики продаж¹ КТС с ЭСУ средний годовой темп роста количества зарегистрированных в Российской Федерации автомобилей на период с 2015 по 2023 г. составил 134,8%. По состоянию на март 2024 г. продажи новых КТС с ЭСУ составляют 2,5 тыс. автомобилей, что является самым высоким показателем за всё время². В соответствии с «Концепцией производства и развития электротранспорта в России» за прошлый год объём выпуска КТС с ЭСУ составил 9740 ед., а к концу 2024 г. планируется выпустить около 17 500 ед. транспорта. При этом отечественными марками КТС с ЭСУ являются «Атом» (АО «Кама»), «Амберавто» («Авто-тор») и Lada e-Largus («АвтоВАЗ»). Продажи КТС с ГСУ, по состоянию на декабрь 2023 г., составляли всего 5,9 тыс. сделок, что на 44% выше, чем в ноябре 2023 г. В феврале 2024 г. в Российской Федерации было совершено 7,3 тыс. сделок (на 52% выше, чем в январе 2024 г.). Активно увеличивается доля КТС с ГСУ на рынке. Так, в декабре 2023 г. она составляла 5%, в январе 2024 – 6%, а в феврале уже 7,1%³. Очевидно, что с ростом количества КТС с ЭСУ и ГСУ возникает необходимость в проведении полноценного и качественного исследования рабочих процессов КТС как на этапах производства и доводки на предприятиях-изготовителях, так и в условиях эксплуатации на станциях технического обслуживания (СТО) и прочих организациях.

На сегодняшний день существует множество различных компоновок гибридных автомобилей: последовательные, параллельные и последовательно-параллельные схемы⁴. Последовательно-параллельная схема ГСУ совместила все положительные качества последовательной и параллельной схемы ГСУ. Основными элементами привода для такой компоновки являются двигатель внутреннего сгорания (ДВС) и, как правило, один или несколько электродвигателей-генераторов (ЭГ). Наиболее ярким примером является Toyota Prius и Mitsubishi Outlander, в ГСУ которых применяется несколько ЭГ и устройство для разделения мощности (рисунок 1).

Для КТС с ЭСУ характерна как классическая типовая компоновка силового агрегата и трансмиссии, так и компоновка с разнесёнными ЭГ индивидуально на каждое ведущее колесо (рисунок 2). В первом случае подвод крутящего момента на ведущие колёса КТС осуществляется одним ЭГ через редуктор и шарниры равных угловых скоростей (рисунок 2, а). Во втором случае ЭГ установлены возле каждого ведущего колеса, и КТС оснащён системой векторизации крутящего момента, которая вычисляет оптимальную тягу для каждого из колёс (рисунок 2, б).

Исследованиям КТС с ЭСУ и ГСУ посвящены труды^{5,6} [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Однако в основном в данных работах рассматривались вопросы проектирования КТС с ЭСУ и ГСУ, и их испытаниям в дорожных условиях.

¹ СБЕР Про: Заряд для автопрома. Как развивается индустрия электромобилей. Режим доступа. URL: <https://sber.pro/publication/zaryad-dlya-avtoproma-kak-razvivaetsya-industriya-elektromobilei>. [Электронный ресурс] (дата обращения: 30.09.2024).

² Автостат. Аналитическое агентство. Статистика Продаж новых электромобилей в РФ. Режим доступа. URL: <https://www.autostat.ru/news/57294>. [Электронный ресурс] (дата обращения: 30.09.2024).

³ Специальный проект Автопарк. Чем вызван всплеск спроса на гибриды и электрокары в России. Режим доступа. URL: <https://rg.ru/2024/03/15/chem-vyzvan-vsplesk-sprosa-na-gibridy-i-elektrokar-v-rossii.html>. [Электронный ресурс] (дата обращения: 30.09.2024).

⁴ Яньков О.С. Колёсные транспортные средства с электрическим и гибридным приводом: для обучающихся по направлениям подготовки 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», уровень образования – «магистратура», 23.06.01 «Техника и технологии наземного транспорта», уровень образования – «аспирантура». Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. 246 с. ISBN 978-5-8038-1740-6.

⁵ Maharun M., Mohamad Noor Iman Mohd Nor A Study of Torque Vectoring and Traction Control for an All-Wheel Drive Electric Vehicle (2014) MATEC Web of Conferences 13,01003.

⁶ Pawar V.T. Active Torque Vectoring for All Wheel Drive FSAE Electric Car. Dissertation of Master of Science in Mechanical Engineering. 2016. 80 p.

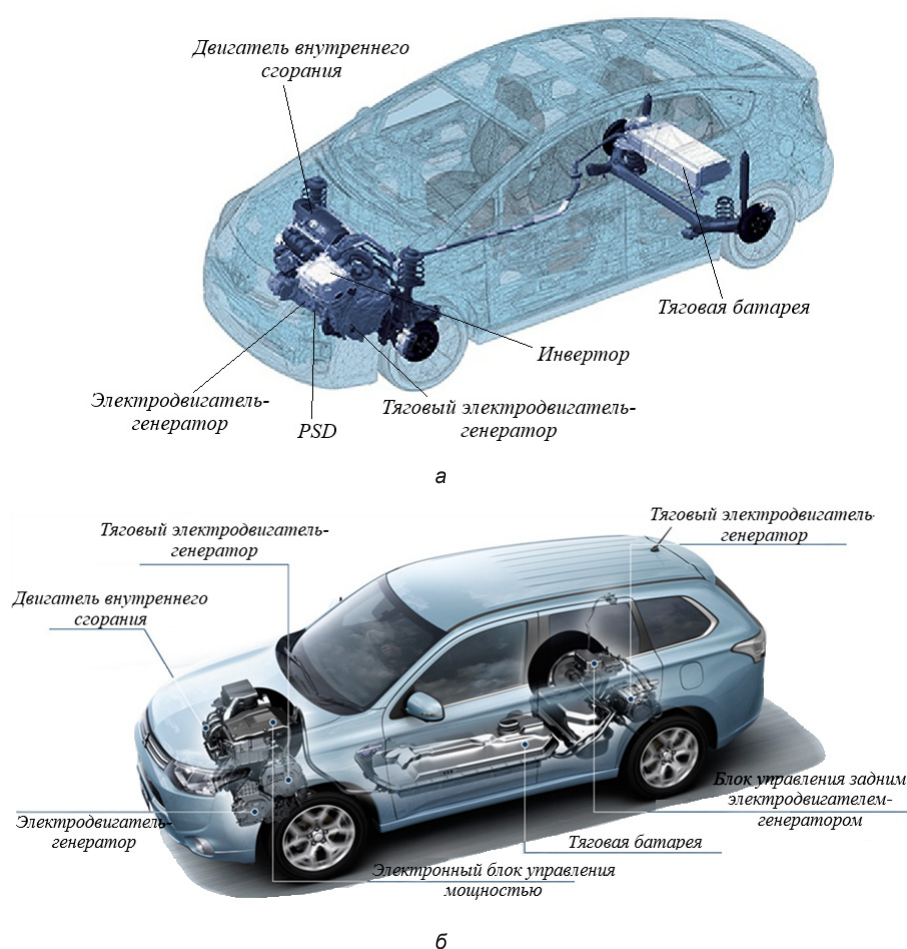


Рисунок 1 – Внешний вид гибридных колесных транспортных средств:
 а – гибридный автомобиль Toyota Prius NHW20;
 б – гибридный автомобиль Mitsubishi Outlander PHEV
 Источник: из открытых интернет-ресурсов.

Figure 1 – Exterior design of hybrid wheeled vehicles:
 а – Toyota Prius NHW20 hybrid car;
 б – Mitsubishi Outlander PHEV hybrid car
 Source: from open Internet resources.

Также в соответствии с ГОСТ Р ЕН 1986-1-2011⁷ и ГОСТ Р ЕН 1986-2-2011⁸ исследование технического состояния КТС с ЭСУ и ГСУ с классической компоновкой силового агрегата и трансмиссии (привод на переднюю или заднюю ось) вполне возможен на существующих стендах. Но при исследовании КТС с ЭСУ и ГСУ с полным приводом или с ЭГ на каждое ведущее колесо возникает проблема, связан-

ная с отсутствием методов и средств для измерения силы тяги индивидуально на каждом колесе. Немаловажным фактором является и то, что помимо измерения силы тяги на ведущих колёсах есть необходимость измерять тормозные силы, действующие на колёсах КТС, когда силовая установка функционирует в режиме рекуперации.

⁷ ГОСТ Р ЕН 1986-1-2011 Автомобили с электрической тягой. Измерение энергетических характеристик. Часть 1. Электромобили. М.: Стандартинформ, 2007. 23 с.

⁸ ГОСТ Р ЕН 1986-2-2011 Автомобили с электрической тягой. Измерение энергетических характеристик. Часть 2. Гибридные транспортные средства. М.: Стандартинформ, 2007. 16 с.

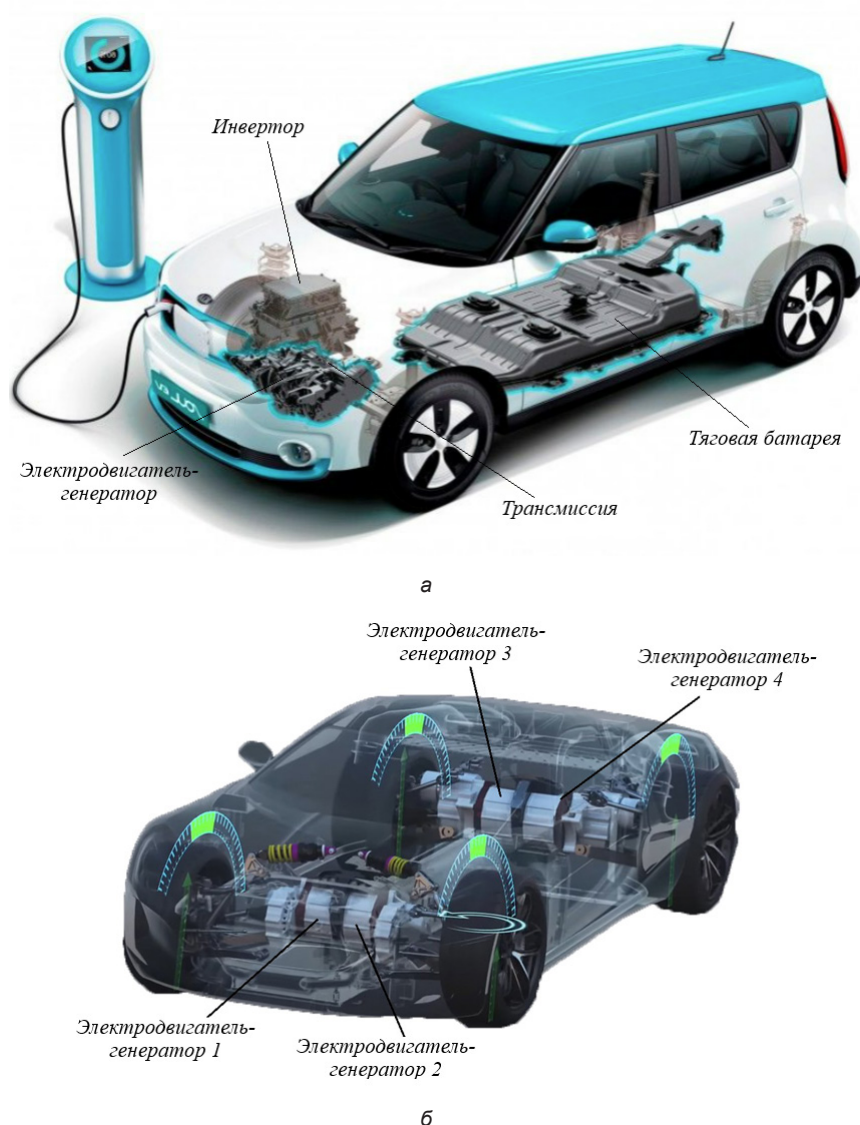


Рисунок 2 – Внешний вид современных электрических колесных транспортных средств:
 а – электромобиль Kia Soul EV; б – электромобиль Rimac Concept One
 Источник: из открытых интернет-ресурсов.

Figure 2 – Exterior design of modern electric wheeled vehicles:
 а – Kia Soul EV electric car
 б – Rimac Concept One electric car
 Source: from open Internet resources

Для реализации методик и тестовых режимов исследования эксплуатационных свойств КТС с ЭСУ и ГСУ в динамических и установившихся режимах необходима разработка гибридных (инерционно-силовых) стендов. Такие стенды позволяют воздействовать на КТС так, как оно функционирует в реальных условиях эксплуатации. Современное стендовое диагностическое оборудование такую возможность не обеспечивает.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Далеко не все стенды с беговыми барабанами и методы, ими реализуемые, четко отражают тяговые свойства автомобилей. Относительно корректные и информативные с диагностической точки зрения параметры дают силовые стенды. Они позволяют измерять силовые параметры: силу тяги, мощность на колесах, силу и мощность, затрачиваемые на прокручивание трансмиссии.

Большинство современных силовых стендов (рисунок 3) состоят из блоков с беговыми барабанами 1 и 2. Опорные беговые барабаны 1 соединены между собой муфтами, а также с нагружающим устройством 5, как правило, представляющим собой электродинамический тормоз. Беговые барабаны 2 являются поддерживающими. Скорость колес автомобиля отслеживается датчиками 3. Сила, с которой электродинамический тормоз 5 стремится нагрузить трансмиссию КТС, определяется при помощи датчика 4.

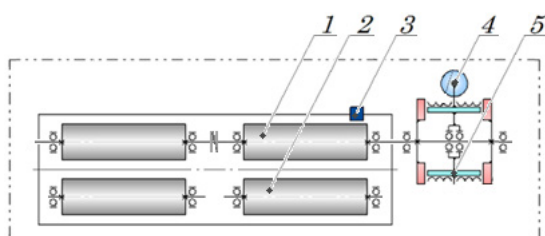


Рисунок 3 – Кинематическая схема силового стенда:

- 1 – опорный беговой барабан;
- 2 – поддерживающий беговой барабан;
- 3 – датчик скорости беговых барабанов;
- 4 – датчик силы;
- 5 – электродинамический тормоз

Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Kinematic diagram of the power stand:

- 1 – supporting running drum;
- 2 – co-supporting running drum;
- 3 – speed sensor of running drums;
- 4 – force sensor; 5 – electrodynamic brake.

Source: compiled by the authors.

К сожалению, при исследовании функциональных свойств КТС с ЭСУ и ГСУ на стендах, реализующих силовой метод, имеется возможность определять их характеристики только в установившемся режиме, например, задавать движение с постоянной скоростью с заданной нагрузкой. Однако в реальных условиях функционирование КТС в большинстве случаев сопровождается динамическими режимами – разгон и выбег. Значительное количество неисправностей при функционировании КТС можно выявить именно в этих режимах. Поэтому для полного и информативного исследования технического состояния КТС на стендах с беговыми барабанами необходимо имитировать разгон и выбег автомобиля, причём с максимальным приближением кинетической энергии разгона в стендовых условиях к условиям дорожным. На силовых тяговых стендах это выполнить невозможно.

Инерционные стенды с беговыми барабанами реализуют динамические методы исследования эксплуатационных свойств КТС. Инер-

ционные стенды (рисунок 4) состоят из блоков с опорными 4 и поддерживающими беговыми барабанами 5. Каждый беговой барабан 4 соединён муфтой с редуктором 2, который, в свою очередь, имеет механическую связь с маховой массой 1, выполняющей функцию нагружающего устройства. Скорость колес автомобиля отслеживается датчиками 3.

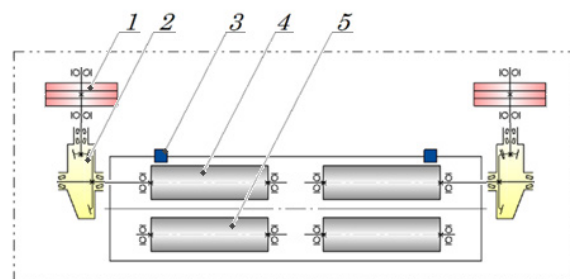


Рисунок 4 – Кинематическая схема инерционного стенда:

- 1 – маховая масса; 2 – редуктор; 3 – датчик скорости;
- 4 – опорный беговой барабан;
- 5 – поддерживающий беговой барабан

Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Kinematic diagram of the inertial stand:

- 1 – flywheel mass; 2 – gearbox; 3 – speed sensor;
- 4 – supporting running drum;
- 5 – co-supporting running drum

Source: compiled by the authors.

В отличие от силовых инерционные стенды позволяют измерять только временные и кинематические параметры, к которым относят: время и путь разгона, а также время и путь выбега. Анализ конструкций стендов тяговых качеств показывает, что существуют ещё и инерционно-силовые стенды, реализующие силовой и инерционный методы задания тестовых режимов, за счёт добавления в конструкцию стенда электродинамического тормоза. Измерения силовых параметров на них производится датчиком силы, установленным на балансирном тормозе, аналогично рисунку 3.

Измеряемые на инерционных стендах кинематические и временные параметры крайне нестабильны, малоинформативны и требуют большого количества измерений. Но при этом динамические методы, реализуемые этими стендами, имитируют очень важные с точки зрения исследования технического состояния КТС с ЭСУ и ГСУ режимы разгона и выбега. Однако для определения тяговых качеств таких автомобилей необходима зависимость силы тяги на их ведущих колесах от скорости. Следовательно, для качественного анализа тяговых свойств КТС необходимо выполнять

контроль их функционирования как в установившихся, так и в динамических режимах. Сказанное подразумевает индивидуальное применение названных режимов и их разумное совмещение.

Анализ существующих методов и кинематических схем, реализующих их стендов, показывает, что на сегодняшний день нет оборудования, позволяющего измерять силы тяги на каждом ведущем колесе КТС, и при этом обеспечивать применение силового и динамического методов как индивидуально, так и совместно. Ещё одним существенным недостатком является невозможность измерения разнонаправленных сил на колёсах КТС. Именно измерение тяговых сил в динамических и установившихся режимах, например, при разгоне КТС, и тормозных сил в режиме рекуперации энергии, позволит наиболее качественно оценить их эксплуатационные свойства.

Таким образом, актуальным становится разработка гибридных, совмещающих в себе достоинства как инерционных, так и силовых стендов, реализующих названные методы и тестовые режимы. Стенды именно такой конструкции позволяют нагружать КТС так, как они функционируют в реальных условиях эксплуатации. Очень важно при этом измерять, прежде всего, силовые параметры, которые являются более информативными и стабильными, чем время и кинематические параметры – путь и скорость.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С целью решения изложенной проблемы был разработан исследовательский стендовый комплекс, состоящий из гибридного полноопорного стенда с измерительными и управляющими системами, являющийся хорошей альтернативой существующим инерционным и силовым стендам, поскольку он реализует силовые и динамические методы и тестовые режимы. Структурная схема стенда представлена на рисунке 5. Стенд состоит из двух блоков беговых барабанов: переднего и заднего. Передний блок выполнен как единое целое с рамой стенда, которая расположена по всей длине стенда. Задний блок стенда установлен

на полозьях рамы и имеет возможность перемещения вдоль этих полозьев, что позволяет изменять расстояние между блоками беговых барабанов, настраивая стенд для колёсной базы испытуемого КТС. Конструктивно оба блока беговых барабанов идентичны полностью. Каждый блок состоит из двух пар беговых барабанов: задних 3 и передних 5. Скорости беговых барабанов измеряются датчиком 7. Оба беговых барабана 3 и 5 кинематически соединены между собой цепной передачей 13 и симметричным дифференциалом 12 или обгонной муфтой⁹, которые предназначены для компенсации паразитной циркулирующей мощности в замкнутом контуре «Шина – Барабан – Цепная передача – Барабан – Шина» [9, 10, 11]. Между беговыми барабанами 3 и 5 размещён ролик следящей системы 4, соприкасающийся с беговой дорожкой шины. Скорость ролика следящей системы определяется датчиком 14. На выходном валу беговых барабанов размещён датчик силы 11.

Чтобы уменьшить влияние радиальных сил на работу датчика 11, выходной вал, идущий от беговых барабанов 3 и 5, соединяется с промежуточным валом через отдельный подшипниковый корпус. Промежуточный вал, в свою очередь, связан с трансмиссией стенда с помощью цепной передачи 10. Поток мощности, передающийся от беговых барабанов к трансмиссии стенда или наоборот, проходит через фрикционную муфту 9. Конструктивно муфта 9 объединена со звёздочкой привода маховой массы 8, которые работают как аккумуляторы энергии, поступающей от ведущих колёс КТС во время имитации режима разгона. А при задании режима выбега эта энергия возвращается обратно к колёсам КТС. Каждая пара беговых барабанов на стенде механически устроена аналогично.

Механическое соединение пары беговых барабанов в каждом блоке стенда осуществляется при помощи карданных передач 6 и редукторов 1. Механическое соединение редукторов блоков беговых барабанов реализовано карданной передачей 2. При этом поток мощности передаётся между блоками стенда через электродинамический тормоз 15. Тормоз 15 выполняет функции нагружающего силового

⁹ Патент на полезную модель № 213401 U1 Российская Федерация, МПК G01L 5/13, G01M 17/007. Стенд контроля технического состояния колесных транспортных средств с обгонной муфтой: № 2022106787: заявл. 16.03.2022; опубл. 09.09.2022 / А.И. Федотов, О.С. Яньков, М.В. Холманских, А.С. Чернышков; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

го устройства, обеспечивающего проведение исследований с дополнительной нагрузкой в установившихся режимах. Для контроля процесса функционирования тормоза 15 используются датчик силы торможения 16 и датчик

частоты вращения ротора 17. Таким образом, механическое соединение всех беговых барабанов позволяет автомобилю на стенде функционировать так же, как в реальных дорожных условиях.

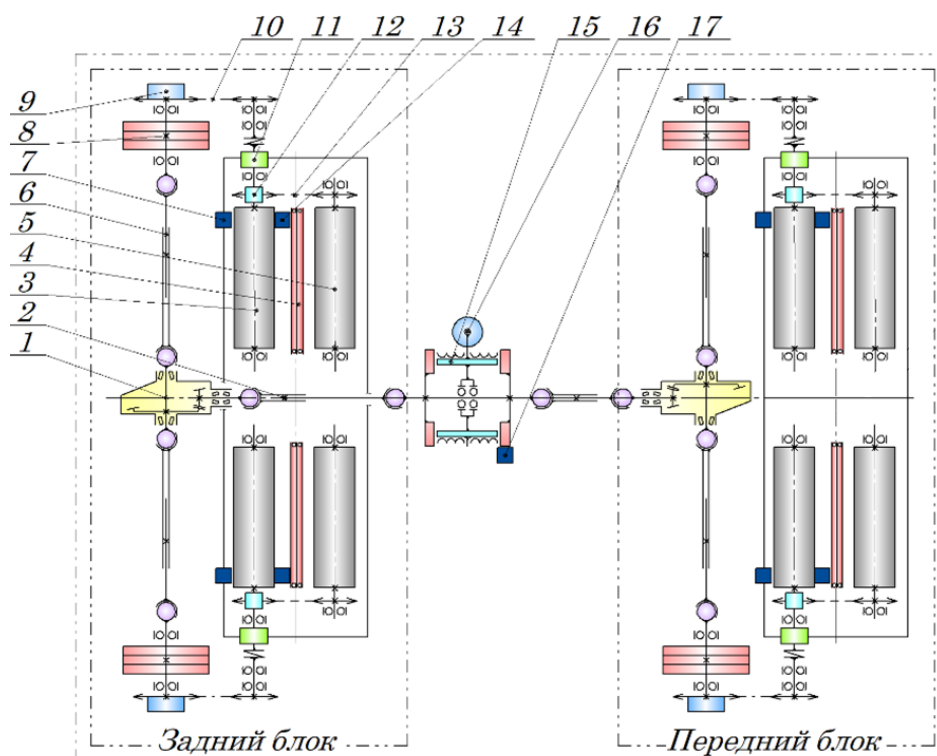


Рисунок 5 – Структурная схема исследовательского стендового комплекса ИРНИТУ10:

- 1 – редуктор блока беговых барабанов; 2 – карданная передача привода электродинамического тормоза;
 3 – задний беговой барабан; 4 – ролик следящей системы;
 5 – передний беговой барабан; 6 – карданная передача привода пары беговых барабанов;
 7 – датчик скорости беговых барабанов; 8 – маховая масса; 9 – фрикционная муфта;
 10 – цепная передача привода маховых масс; 11 – датчик силы; 12 – симметричный дифференциал;
 13 – цепная передача привода переднего бегового барабана; 14 – датчик скорости ролика следящей системы;
 15 – электродинамический тормоз; 16 – датчик силы торможения электродинамического тормоза;
 17 – датчик скорости ротора электродинамического тормоза

Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Structural diagram of the research stand complex developed by Irkutsk National Research Technical University:

- 1 – gearbox of the running drum block; 2 – gimbal transmission of the electrodynamic brake drive;
 3 – rear treadmill drum; 4 – roller of the tracking system; 5 – front treadmill drum;
 6 – gimbal drive of a pair of running drums; 7 – speed sensor of running drums;
 8 – flywheel mass; 9 – friction clutch; 10 – chain transmission of the flywheel drive mass;
 11 – force sensor; 12 – symmetrical differential; 13 – chain transmission of the front running drum drive;
 14 – roller speed sensor of the tracking system; 15 – electrodynamic brake;
 16 – braking force sensor of the electrodynamic brake; 17 – rotor speed sensor of the electrodynamic brake

Source: compiled by the authors.

¹⁰ Патент на полезную модель № 199093 У1 Российская Федерация, МПК G01L 5/13. Гибридный универсальный полноопорный стенд для контроля технического состояния колесных транспортных средств: № 2020111732: заявл. 23.03.2020; опубл. 13.08.2020 / А.И. Федотов, О.С. Яньков, А.С. Чернышков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»). EDN QULBNR.

Датчик силы, действующей на беговых барабанах, представляет собой цилиндрический корпус 5 с концентрично размещёнными внутри катушками 3 и 4, соединение которых образует две измерительные обмотки и одну обмотку возбуждения (рисунок 6)^{11,12}. Между валом 2 и сердечниками катушек 3 и 4 присутствует постоянный зазор. Корпус 5 датчика установлен на подшипниках 6. Вместе с корпусом 5 и валом 2 сердечники 3 и 4 обмоток образуют магнитную систему, проницаемость которой зависит от механических напряжений в чувствительном элементе датчика – вала 2. Поскольку на беговой барабан 1 могут действовать разнонаправленные силы, то вал 2 будет нагружен разнонаправленным моментом, и, соответственно, испытывать разнонаправленные механические напряжения.

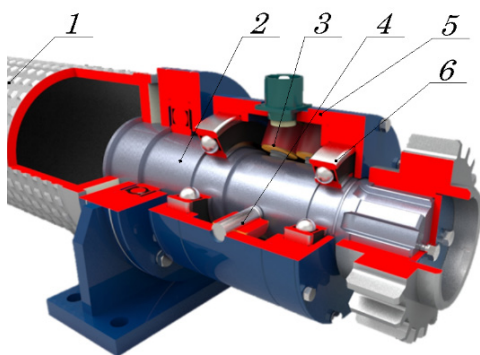


Рисунок 6 – Конструкция бесконтактного магнитоупругого датчика силы на беговом барабане:

- 1 – беговой барабан; 2 – приводной вал;
3 – катушка измерительной обмотки;
4 – катушка обмотки возбуждения;
5 – корпус; 6 – подшипники

Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Design of a non-contact magneto-elastic force sensor on a running drum:

- 1 – running drum; 2 – drive shaft; 3 – measuring winding coil;
4 – excitation winding coil; 5 – body; 6 – bearings.

Source: compiled by the authors.

На рисунке 7 представлен внешний вид КТС Kia Soul EV, установленного на исследовательский стендовый комплекс ИРНТУ.



Рисунок 7 – Автомобиль Kia Soul EV на исследовательском стендовом комплексе ИРНТУ^{13,14} [12]
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Kia Soul EV car at the research stand complex developed by Irkutsk National Research Technical University [12]
Source: compiled by the authors.

Процесс функционирования КТС Kia Soul EV в режимах разгона установившегося движения и выбега в ходе экспериментального исследования с нагрузкой 310 Н (что соответствует имитации движения с постоянной скоростью в гору, с подъёмом 5% (углом 2°52') показан в виде зависимости сил на ведущих колёсах и скорости на рисунке 8. График разделен на три участка, соответствующих имитируемым режимам: разгон, установившееся движение и выбег с рекуперативным торможением.

¹¹ Патент на полезную модель № 198516 U1 Российская Федерация, МПК G01L 5/28. бесконтактный измеритель для силового тормозного роликового стенда: № 2020113148: заявл. 26.03.2020; опубл. 14.07.2020 / А.И. Федотов, О.С. Яньков, А.С. Чернышков [и др.]; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Фритрейн». EDN REWMZI.

¹² Яньков О.С., Чернышков А.С. Совершенствование конструкции силоизмерительного магнитострикционного датчика тормозного стенда // Наземные транспортно-технологические средства: проектирование, производство, эксплуатация: II Всероссийская научно-практическая конференция, Чита, 30–31 октября 2018 года. Чита: Забайкальский государственный университет, 2018. С. 53–59. EDN ZCQRCP.

¹³ Патент № 2823398 C1 Российская Федерация, МПК G01M 17/007, G01L 5/13. Способ контроля технического состояния колесных транспортных средств с гибридной, электрической силовой установкой на стендах с опорными роликами в условиях эксплуатации и устройство для его осуществления: № 2023128983: заявл. 09.11.2023; опубл. 23.07.2024 / А.И. Федотов, О.С. Яньков, А.С. Чернышков, П.А. Кисилев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет». EDN XCYAER.

¹⁴ Чернышков А.С. Контроль технического состояния агрегатов электрического силового привода автомобилей на стендах с беговыми барабанами: дис. ... канд. техн. наук: 2.9.5. Иркутск, 2024.

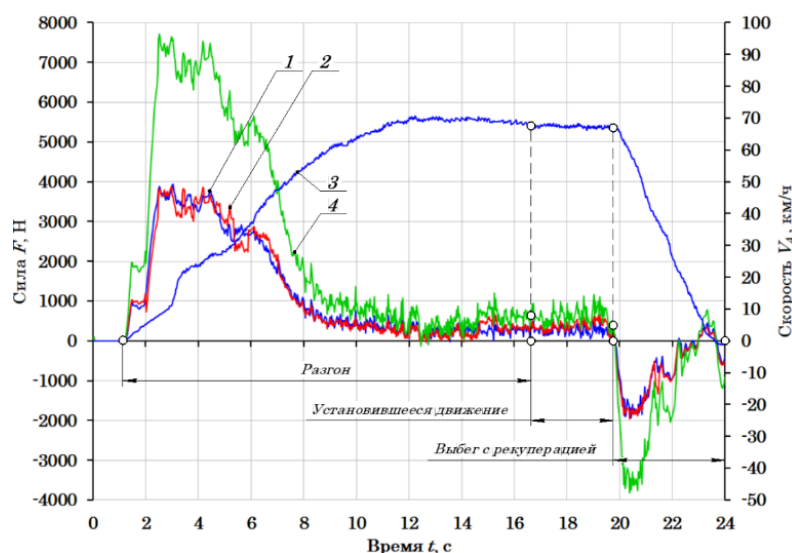


Рисунок 8 – Зависимости сил на ведущих колёсах и скорости в процессе имитации разгона, установившегося движения и выбега КТС KIA Soul EV от времени :
1 – сила на переднем левом колесе; 2 – сила на переднем правом колесе;
3 – скорость; 4 – силы ведущих колёсах
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Dependences of forces on the driving wheels and speed in the process of simulating acceleration, steady motion and run-out of the wheeled vehicle KIA Soul EV on time t :
1 – force on the front left wheel; 2 – force on the front right wheel;
3 – speed; 4 – forces of driving wheels.
Source: compiled by the authors

Участок разгона характеризуется увеличением скорости и сил тяги на ведущих колёсах КТС. Перепады в максимальных значениях сил тяги обусловлены возникновением в трансмиссии стенда и КТС крутильных колебаний в виду резкого увеличения крутящего момента ЭСУ. С последующим разгоном крутящий момент ЭСУ уменьшается из-за увеличения частоты вращения ротора ЭГ. На протяжении всего режима установившегося движения параметры и оставались практически неизменными. В результате уменьшения уровня активации органа управления силовой установкой исследуемый процесс переходит в режим выбега с рекуперативным торможением, о чём свидетельствует изменение знака сил на колёсах КТС.

На рисунке 9 показан внешний вид КТС Toyota Prius NHW20, установленного на исследовательский стендовый комплекс ИРНТУ.



Рисунок 9 – Автомобиль Toyota Prius NHW20 на исследовательском стендовом комплексе ИРНТУ¹⁵ [13,14]
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Toyota Prius NHW20 car at the research stand complex developed by Irkutsk National Research Technical University [13,14]
Source: compiled by the authors.

¹⁵ Патент № 2823398 С1 Российская Федерация, МПК G01M 17/007, G01L 5/13. Способ контроля технического состояния колесных транспортных средств с гибридной, электрической силовой установкой на стендах с опорными роликами в условиях эксплуатации и устройство для его осуществления: № 2023128983: заявл. 09.11.2023; опублик. 23.07.2024 / А.И. Федотов, О.С. Яньков, А.С. Чернышков, П.А. Кисилев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет». EDN XCYAER.

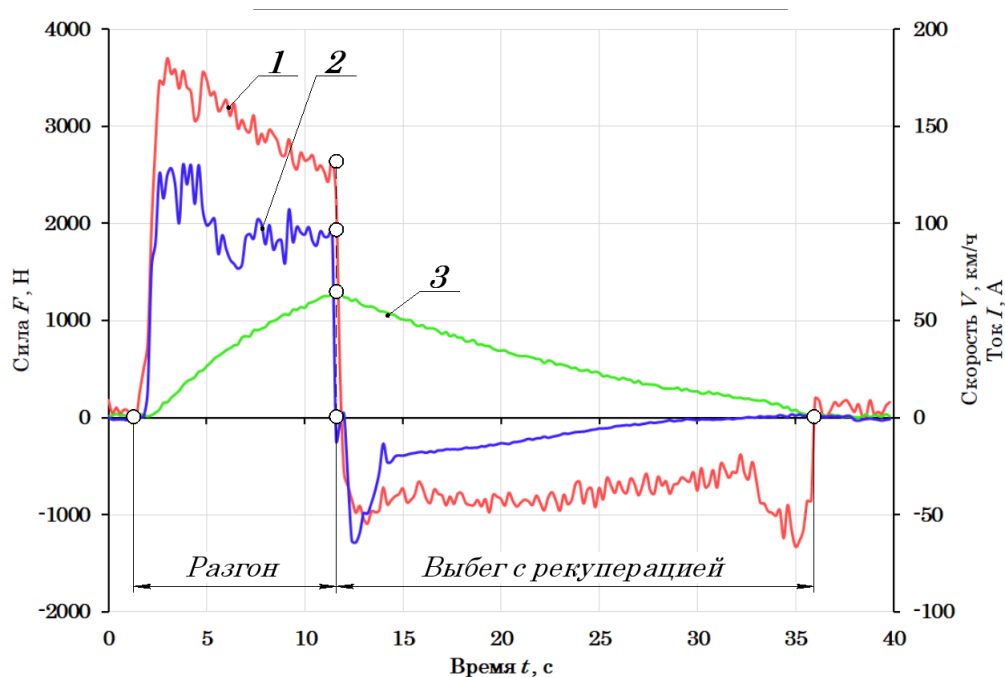


Рисунок 10 – Зависимости сил на ведущих колёсах, скорости и тока, поступающего на инвертор от ВВБ в процессе имитации разгона и выбега с рекуперацией КТС Toyota Prius HW20 от времени:

1 – сила на ведущем колесе;

2 – сила тока; 3 – скорость

Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Dependences of the forces on the driving wheels, the speed and the current, supplied to the inverter from the high-voltage battery in the process of simulating acceleration and run-out with the recovery of the wheeled vehicle Toyota Prius HW20 CCC on time t :

1 – the force on the driving wheel;

2 – the current; 3 – the speed .

Source: compiled by the authors

Процесс разгона и выбега КТС *Toyota Prius NHHW20* в результате экспериментального исследования без нагрузки показан на рисунке 10 в виде зависимостей силы на ведущем колесе, скорости КТС и тока, поступающего на инвертор от высоковольтной батареи. График разделён на два участка, соответствующих имитируемым режимам: разгон и выбег с рекуперативным торможением. Участок разгона характеризуется увеличением скорости и силы тяги на ведущем колесе КТС, а также тока. Неравномерность сил тяги обусловлена динамическими процессами в трансмиссии стенда и КТС в виду резкого увеличения крутящих моментов ДВС, ЭГ-1 и ЭГ-2 ГСУ, о чём свидетельствует значительное увеличение тока, поступающего на инвертор от высоковольтной батареи. С последующим разгоном

значение тока уменьшается. Кривая тока, поступающего на инвертор, отражает потребление энергии ГСУ на разгон ведущих колёс КТС. В результате уменьшения уровня активации органа управления силовой установкой исследуемый процесс переходит в режим выбега с рекуперативным торможением, о чём свидетельствует изменение знака сил на колёсах КТС, а также тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты экспериментальных исследований рабочих процессов КТС с ЭСУ и ГСУ показывают, что использование гибридных (инерционно-силовых) стендов с беговыми барабанами позволяет реализовывать высокоинформативные и стабильные тестовые режимы функционирования КТС в

процессе исследования их эксплуатационных свойств. Гибридные стенды в составе исследовательских комплексов позволят выполнять контроль технического состояния КТС с ЭСУ и ГСУ с применением как установившихся, так и динамических методов с измерением при этом силовых и кинематических параметров на каждом ведущем колесе как в режимах разгона и установившегося движения, так и в режиме выбега.

Такой подход открывает возможность для:

- обеспечения контроля технического состояния ЭСУ и ГСУ и трансмиссии КТС;
- разработки методологии проектирования стендов, реализующих принцип обратимости движения, а также исследований КТС и их компонентов на стендах с беговыми барабанами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Заватский А.М., Харитонов С.А. Развитие алгоритмов активного распределения момента по осям легкового автомобиля // Труды НАМИ. 2017. № 2 (269). С. 37–44.
2. Малышев А.Н., Груненков Е.А., Дебелов В.В. [и др.]. Имитационное моделирование системы контроля изоляции высоковольтной электросети транспортного средства с гибридной силовой установкой // Известия МГТУ МАМИ. 2021. Т. 15, № 2. С. 36–50. DOI 10.31992/2074-0530-2021-48-2-36-50. EDN KHWGZK.
3. Yin D., S. Oh & Y. Hori, Y. "A novel traction control for EV based on maximum transmissible torque estimation." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009. 56(6). pp. 2086–2094.
4. Kataoka H., Sado H., Sakai & Y. Hori I., "Optimal slip ratio estimator for traction control system of electric vehicle based on fuzzy inference". *Electrical Engineering in Japan*. 2001. 135(3). pp. 56–63.
5. Jason J. Poon, Michel A. Kinsy, Nathan A. Pallo, Srinivas Devadas, Ivan L. Celanovic. *Hardware-in-the-Loop Testing for Electric Vehicle Drive Applications*. 2012.
6. Lin C., Xu, Z. Wheel torque distribution of four-wheel-drive electric vehicles based on multi-objective optimization. *Energies*. 2015. 8 (5). pp. 3815–3831.
7. Sakai, S.-I., Sado, H., Hori, Y. Motion control in an electric vehicle with four independently driven in-wheel motors *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 1999. 4 (1). pp. 9–16.
8. Hori Y., Future vehicle driven by electricity and control-research on fourwheel-motored UOT Electric March II". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2004. 51(5). pp. 954–962.
9. Камнев А.В., Федотов А.И., Яньков О.С. Влияние давления воздуха в шинах на силовые потери при качении колес автомобиля по опорным роликам стенда // Автомобильная промышленность. 2022. № 10. С. 28–32. EDN MHPYZE.

10. Федотов А.И., Власов В.Г., Яньков О.С., Камнев А.В. Расчет силы сопротивления качению эластичной шины по цилиндрическим поверхностям беговых барабанов стенда // Автомобильная промышленность. 2022. № 11. С. 26–31. EDN LEQOJB.

11. Федотов А.И., Власов В.Г., Яньков О.С. Математическая модель для расчета нормальных и продольных касательных реакций в пятне контакта шины автомобильного колеса с поверхностями опорных роликов диагностического стенда // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21, № 3(122). С. 193–203. DOI 10.21285/1814-3520-2017-3-193-203. EDN YHPRAV.

12. Чернышков А.С., Федотов А.И., Яньков О.С. О функциональной диагностике автомобилей с электрической силовой установкой // *International Journal of Advanced Studies*. 2023. Т. 13, № 3. С. 203–223. DOI: <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-3-203-223>

13. Киселёв П.А., Федотов А.И., Яньков О.С., Лобов Н.В. Обоснование динамических тестовых режимов функционирования транспортного средства с гибридной силовой установкой // Грузовик. 2024. № 7. С. 27–37. DOI 10.36652/1684-1298-2024-7-27-37. EDN DMQTJQ.

14. Федотов А.И., Яньков О.С., Киселёв П.А., Ухватов Д.О. О диагностике автомобильных гибридных силовых установок на стендах с беговыми барабанами // *International Journal of Advanced Studies*. 2023. Т. 13, № 1. С. 42–61. DOI 10.12731/2227-930X-2023-13-1-42-61. EDN OUDNVJ.

REFERENCES

1. Zavatskiy A.M., Kharitonov S.A. Development of algorithms for active torque distribution along the vehicle axes. *Trudy NAMI*. 2017; (2): 37–47. (In Russ.)
2. Malyshev A.N., Grunenkov YE.A., Debelov V.V., Mizin M.D., Kozlovskiy V.N. Simulation of the insulation monitoring system of the high-voltage electrical network of a vehicle with a hybrid power plant. *Izvestiya MG TU «MAMI»*. 2021; 2(48): 36–50 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2021-48-2-36-50
3. Yin D., S. Oh & Y. Hori, Y. A novel traction control for EV based on maximum transmissible torque estimation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009; 56(6): 2086–2094.
4. Kataoka H., Sado H., Sakai & Y. Hori I., Optimal slip ratio estimator for traction control system of electric vehicle based on fuzzy inference. *Electrical Engineering in Japan*. 2001; 135(3): 56–63.
5. Jason J. Poon, Michel A. Kinsy, Nathan A. Pallo, Srinivas Devadas, Ivan L. Celanovic. *Hardware-in-the-Loop Testing for Electric Vehicle Drive Applications*. 2012.
6. Lin C., Xu Z. Wheel torque distribution of four-wheel-drive electric vehicles based on multi-objective optimization. *Energies*. 2015; 8 (5): 3815–3831.
7. Sakai S.-I., Sado H., Hori Y. Motion control in an electric vehicle with four independently driven in-wheel motors. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 1999; 4 (1): 9–16.

8. Hori Y. Future vehicle driven by electricity and control-research on fourwheel-motored UOT Electric March II. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2004; 51(5): 954–962. 2004.

9. Kamnev A.V., Fedotov A.I., Yankov O.S. The effect of tire air pressure on power losses when the car wheels are rolling on the support rollers of the stand. *Automotive industry*. 2022; 10: 28–32. EDN MHPYZE. (in Russ.)

10. Fedotov A.I., Vlasov V.G., Yankov O.S., Kamnev A.V. Calculation of the rolling resistance force of an elastic tire on the cylindrical surfaces of the running drums of the stand. *Automotive industry*. 2022; 11: 26–31. EDN LEQOJB. (in Russ.)

11. Fedotov A.I., Vlasov V.G., Yankov O.S. A mathematical model to calculate normal and longitudinal tangential reactions in the vehicle wheel tire contact patch with chassis dynamometer bearing roller surfaces. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017; vol. 21, no. 3: 193–203. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2017-3-193-203.

12. Chernyshkov A.S., Fedotov A.I., Yan'kov O.S. About Functional Diagnostics of Cars with an Electric Power Plant. *International Journal of Advanced Studies*. 2023; vol. 13, no. 3: 203–223. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-3-203-223. (in Russ.)

13. Kiselev P.A., Fedotov A.I., Yankov O.S., Lobov N.V. Justification of dynamic test modes of operation of a vehicle with a hybrid power plant. *Truck*. 2024; 7: 27–37. DOI 10.36652/1684-1298-2024-7-27-37. EDN DMQTJQ. (in Russ.)

14. Fedotov A.I., Yankov O.S., Kiselev P.A., Ukhvatov D.O. About Diagnostics of Automotive Hybrid Power Plants on Stands with Running Drums. *International Journal of Advanced Studies*. 2023; Vol. 13, No. 1: 42–61. DOI 10.12731/2227-930X-2023-13-1-42-61. EDN OUDNVJ. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Киселёв П.А. Оформление и описание рисунков, подготовка текста статьи, выполнение экспериментальных, а также аналитических исследований.

Яньков О.С. Общая организация работы. Разработка методик экспериментальных исследований, подготовка текста статьи.

Федотов А.И. Научный руководитель, консультант, подготовка текста статьи.

Кривцов С.Н. Консультант, подготовка текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Kiselyov P.A. Design of drawings and their description, preparation of the article text, experimental and analytical research.

Yan'kov O.S. General organization of work, development of experimental research methods, text writing.

Fedotov A.I. Scientific supervising, consulting, work with the text material.

Krivtsov S.N. Consulting and monitoring, manuscript preparation.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1515-8973>,

SPIN-код: 4216-7292,

e-mail: pavel.kiselev.97.97@mail.ru

Яньков Олег Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6709-4820>,

SPIN-код: 3127-7106,

Scopus Author ID: 57212165852,

Researcher ID: AAG-5898-2022,

e-mail: yos913005@mail.ru

Федотов Александр Иванович – заслуженный деятель науки Российской Федерации, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8329-6785>,

SPIN-код: 1342-4073,

Scopus Author ID: 56341065000,

Researcher ID: AAZ-7059-2021,

e-mail: fai.abs@yandex.ru

Кривцов Сергей Николаевич – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83).

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

SPIN-код: 9278-4018,

Scopus Author ID: 57191268232,

e-mail: krivcov_sergei@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kiselyov Pavel Al. – postgraduate student of the Department of Automobile Transport, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov str., Irkutsk, 664074).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1515-8973>,

SPIN-code: 4216-7292,

e-mail: pavel.kiselev.97.97@mail.ru.

Yan'kov Oleg S. – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automobile Transport, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov str., Irkutsk, 664074).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6709-4820>,

SPIN-code: 3127-7106,

Scopus Author ID: 57212165852,

Researcher ID: AAG-5898-2022,

e-mail: yos913005@mail.ru

Fedotov Alexander Ivanovich – Honored Scientist of the Russian Federation, Dr. of Sci. (Eng.), Professor of the Department of Automobile Transport, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov str., Irkutsk, 664074).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8329-6785>,

SPIN-code: 1342-4073,

Scopus Author ID: 56341065000,

Researcher ID: AAZ-7059-2021,

e-mail: fai.abs@yandex.ru

Krivtsov Sergey Nikolaevich – Dr. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Automobile Transport, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov str. Irkutsk, 664074).

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

SPIN-code: 9278-4018,

Scopus Author ID: 57191268232,

e-mail: krivcov_sergei@mail.ru

УДК 629.015

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-914-930>

EDN: FHKCQK



ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АЛГОРИТМА ИМПУЛЬСНОГО ПОДАВЛЕНИЯ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА В ТОРМОЗНОМ РЕЖИМЕ МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.В. Климов^{1,2}¹ООО «Инновационный центр КАМАЗ»,

г. Москва, Россия

²Московский политехнический университет,

г. Москва, Россия

klimmanen@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Актуальность. При движении транспортного средства могут возникать режимы, сопровождающиеся повышенным скольжением колеса с отрицательным вязким трением, характеризующимся снижением силы трения при росте скорости скольжения. В данных случаях может возникать потеря устойчивости, влекущая за собой возбуждение автоколебательных явлений в электромеханической системе (дорога-колесо-механический привод-электродвигатель). Зарождение данного процесса резко повышает динамическую нагрузку системы, что может привести к выходу её из строя, поломке. Вследствие этого разработка методов подавления автоколебательных явлений считается актуальной задачей.

Цель исследования. Проверка работоспособности и эффективности метода подавления автоколебаний в электромеханической системе привода колеса при торможении транспортного средства.

Материалы и методы. С помощью анализа функции Ляпунова для электромеханической системы привода колеса обоснован метод подавления автоколебательных явлений. Исследование же работоспособности алгоритма выполнено с применением программного комплекса Matlab Simulink.

Результаты исследования. Доказана методами имитационного математического моделирования работоспособность и эффективность алгоритма, что позволяет в дальнейшем его использовать при разработке систем управления движением. В случае торможения транспортного средства, оснащённого антиблокировочной системой с функцией подавления автоколебаний на скользком опорном основании, наблюдается снижение амплитуд колебаний угловых скоростей колёс на 80% и тормозных моментов на 96%. При торможении данного транспортного средства на опорном основании с высоким коэффициентом сцепления амплитуды снижаются на 98% по угловым скоростям и на 81% по крутящим моментам. При имитационном моделировании динамики торможения транспортного средства на опорном основании с низкими сцепными свойствами также показано, что в данных случаях манёвр уклонения удаётся совершить, это свидетельствует о повышении управляемости и активной безопасности машины.

Заключение. Практическая ценность исследования заключается в возможности использования разработанного алгоритма подавления автоколебаний при практическом применении в составе систем управления транспортным средством. Разработанный алгоритм может быть использован на транспортных средствах различного класса, оснащённых индивидуальным тяговым электроприводом ведущих колёс.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автоколебания, отрицательное затухание колебаний, отрицательное вязкое трение, скольжение, шина, функция Ляпунова, демпфирование колебаний, импульсное подавление колебаний

Статья поступила в редакцию 03.10.2024; одобрена после рецензирования 26.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

© Климов А.В., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Климов А.В. Исследование работоспособности алгоритма импульсного подавления автоколебательных явлений в электромеханической системе тягового электрического привода в тормозном режиме методами имитационного моделирования // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, №. С. 914-930. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-914-930>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-914-930>

EDN: FHKCQK

ALGORITHM PERFORMANCE STUDY OF IMPULSE SUPPRESSION OF AUTO-OSCILLATION PHENOMENA IN THE ELECTROMECHANICAL SYSTEM OF ELECTRIC TRACTION DRIVE IN BRAKING MODE BY METHODS OF SIMULATION MODELING

Alexander V. Klimov^{1,2}

¹ООО «KAMAZ Innovation Center»,
Moscow, Russia

²Moscow Polytechnic University,
Moscow, Russia
klimmanen@mail.ru

ABSTRACT

Research relevance. Modes accompanied by increased sliding of a wheel with negative viscous friction, characterized by reduction of friction force at growth of sliding speed, can arise at the movement of the vehicle. In these cases, a loss of stability may occur, resulting in the excitation of auto-oscillation phenomena in the electromechanical system (road-wheel-mechanical drive-electric motor). The emergence of this process sharply increases the dynamic load of the system, which can lead to its failure or breakdown. As a consequence, the development of suppression methods of auto-oscillation phenomena is considered to be an urgent task.

Purpose of the research. Verification of operability and efficiency of the suppression method of auto oscillations in the electromechanical system of wheel drive during braking of the vehicle.

Materials and Methods. With the help of Lyapunov' function analysis for the electromechanical system of wheel drive the suppression method of auto oscillation phenomena is substantiated. The study of the algorithm performance has been carried out with the use of MATLAB Simulink program complex.

Research results. The operability and efficiency of the algorithm is proved by methods of simulation mathematical modeling, which allows its further use in the development of traffic control systems. In case of braking of the vehicle equipped with antilock braking system with the function of suppression of auto oscillations on a slippery support base the reduction of amplitudes oscillation of angular velocities of wheels by 80% and braking moments by 96% is observed. When this vehicle is braked on a high adhesion base, the amplitudes are reduced by 98% in angular velocities and 81% in torques. In simulation modeling of vehicle braking dynamics on a support base with low adhesion properties it has also been shown that in these cases the evasive maneuver can be performed, which indicates on the increase in controllability and active safety of the vehicle.

Conclusion. The practical value of the study lies in the possibility of using the developed algorithm for suppressing auto oscillations in practical application as part of vehicle control systems. The developed algorithm can be used on vehicles of different classes equipped with individual traction electric drive of driving wheels.

KEYWORDS: auto oscillations, negative oscillation damping, negative viscous friction, sliding, tire, Lyapunov function, oscillation damping, impulse oscillation suppression

The article was submitted: 03.10.2024 approved after reviewing: 26.11.2024; accepted for publication: 16.12.2024.

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.

© Klimov A.V., 2024



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

For citation. Klimov A.V. Algorithm performance study pulse suppression of auto-oscillation phenomena in the electromechanical system of the electric traction drive in braking mode electric traction drive system in braking mode by methods of simulation modeling. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): 914-930. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-914-930>

ВВЕДЕНИЕ

На надёжность и эффективность выполнения транспортной работы оказывает непосредственное влияние характер процессов, протекающих в зоне контакта колеса с дорогой. В случае контактного взаимодействия двух тел в ряде случаев возникают колебательные процессы, представляющие собой колебания частей тел относительно друг друга [1].

Контактное взаимодействие эластичной шины с дорогой характеризуется трением. Характер трения в зоне контакта оказывает непосредственное влияние как на безопасность движения колёсных транспортных средств [2, 3, 4, 5, 6], так и на их эффективность.

Для автомобильного транспорта издавна была известна проблема возникновения автоколебаний управляемых колёс, которая успешно решена путём оптимального пространственного положения осей поворота колёс с целью создания стабилизирующих крутящих моментов.

В работе [1] рассмотрено возникновение автоколебаний в период рабочего торможения автомобиля при блокировке колёс в случае их скольжения при снижении силы трения, приведены аналитические выражения, показывающие, какие параметры необходимо менять для снижения амплитуды автоколебаний. В данной работе не рассмотрен режим движения в период работы антиблокировочной системы при свободном и ведущем режиме качения колеса. Другие условия движения, при которых может возникать повышенное скольжение при снижении силы трения, не рассматривались.

В работах [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13] исследуются процессы, происходящие в зоне контакта эластичного колеса с опорным основанием в тормозном режиме работы, в том числе при функционировании антиблокировочной системы и свободном качении колеса, появление колебательных явлений и их влияние на устойчивость движения, появление вибраций и шумовых эффектов; однако процесс возбуждения автоколебаний не рассматривается.

В работе [14] представлены условия возникновения автоколебательных процессов в зоне взаимодействия эластичной шины с твёрдым опорным основанием при трёх режимах качения колеса: тяговом, ведомом и тормозном. Указано, что возникновение автоколе-

баний может быть диагностическим признаком потери сцепления колеса, позволяющим системам активной безопасности среагировать на потерю сцепления заранее. Однако в работе не рассматривается влияние на привод, не учитываются особенности самого электропривода, и не приводятся методы подавления автоколебательных явлений при их зарождении. Также не поставлены вопросы возникновения колебательных явлений при совместной работе систем торможения и привода.

В целом вопросы возбуждения автоколебаний для различных режимов качения колеса с учётом свойств электромеханического привода, в том числе при комплексной работе тягового привода и тормозной системы для колёсных транспортных средств, изучены слабо.

В трансмиссиях автомобилей имеется значительное количество трущихся элементов, а также непосредственных фрикционных узлов, элементы приводов имеют упругие связи и зазоры в зацеплениях, что может приводить к повышению динамической нагруженности из-за возбуждения колебательных явлений [15, 16].

В работе [17] рассматриваются методы динамической нагруженности силовых передач с фрикционными элементами на основе совершенствования модельных свойств с использованием выбора характеристик упруго-фрикционного гасителя крутильных колебаний. Однако не учитываются условия и факт возникновения автоколебательных явлений в трансмиссиях из-за нелинейных свойств характеристики трения в элементах, зазоров в зацеплении, упругости связей. В работе [18] исследованы особенности влияния параметров элементов и узлов трансмиссии автомобиля на уровень фрикционных автоколебаний, даны рекомендации по уменьшению склонности трансмиссии к фрикционным автоколебаниям, изучен процесс зарождения автоколебаний при трогании с места. В работе [19] изучены условия возникновения автоколебаний при переключении передач в механических трансмиссиях с увеличенным количеством передач со сближенными передаточными числами. Рассматривается метод уменьшения автоколебаний тормозных механизмов при подаче сжатого воздуха в зону пары трения.

Использование при транспортных операциях аккумуляторных колёсных транспортных средств приобретает всё большую долю. Из таковых можно выделить электробусы большого класса, осуществляющие пассажирские перевозки. Данные транспортные средства оснащены перезаряжаемой системой хранения электрической энергии (тяговой аккумуляторной батареей) и тяговым электрическим приводом ведущих колёс.

Для данных машин остро стоит вопрос по максимизации их энергоэффективности, поскольку потребители постоянно усиливают свои требования к данному эксплуатационному свойству, что выражается в увеличении запаса хода на одной зарядке перезаряжаемой системе хранения электрической энергии. Эксплуатирующие организации и потребители все больше ужесточают свои требования к дальности хода. Поэтому первоочередная задача разработчиков – снизить потери энергии в силовых установках, приводах и прочих вспомогательных системах. Значительные потери наблюдаются в тяговом электрическом приводе ведущих колёс.

Поэтому разработчикам необходимо постоянно решать задачу по увеличению запаса хода как за счёт применения компонентов и систем с меньшими потерями энергии, так и применением алгоритмов управления, позволяющими наиболее эффективно их эксплуатировать.

Автоколебательные явления в зоне взаимодействия колеса с грунтом при повышенном или полном скольжении для тракторного автопоезда приводят к галопированию, рысканию из-за вертикальных и продольных колебательных перемещений центров колёс [20]. Условия возникновения колебательных процессов в контакте пневматической шины с грунтом зависят от нормальной нагрузки на шину, скорости её изменения и жёсткости.

Особый интерес представляет превентивное распознавание процесса зарождения автоколебаний на ранней стадии с целью исключения потери устойчивости движения и недопущения повышения динамической нагрузки привода, по крайней мере, нужно свести к минимуму его последствия в особенности в случае работы систем активной безопасности.

В основном при торможении возникновение колебательных явлений в системах транспортной машины рассматривают либо как побочное явление, либо как диагностический признак повышенного скольжения, провоци-

рующего блокировку колёс. Однако классические системы АБС допускают начальную блокировку колеса, то есть работают после возникновения опасного явления, борясь с его последствиями. При блокировке колеса может произойти занос, в особенности при выполнении торможения, совмещённого с манёвром. Использование же этого признака позволяет улучшить работу системы АБС, исключив явление блокировки, не допуская его.

Для этого необходимо исследовать возможность зарождения автоколебаний, их причины, условия и места возникновения. Это можно сделать методами анализа системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс торможения, подтвердив выводы методами экспериментальных исследований торможения.

Целью исследования является разработка алгоритма управления, позволяющего подавлять автоколебательные явления, а также проверка его работоспособности и эффективности с помощью методов имитационного моделирования и экспериментальных исследований.

Метод импульсного подавления автоколебательного процесса в тяговом электроприводе при электродинамическом торможении

В работах [21, 22, 23, 24, 25] показано, что для электромеханической системы привода ведущих колёс транспортного средства автоколебательные явления могут возникать для поступательного движения подрессоренных масс, колёс, катящихся как в ведущем, так и в тормозном режиме, а также для их вращательного движения. Процесс зарождения автоколебательных процессов провоцируется повышенным скольжением колеса по опорному основанию. При этом рабочая точка электромеханической системы находится на падающем участке характеристики сопротивления движению, которому свойственно снижение силы трения при росте скорости скольжения, что не позволяет рассеивать энергию колебаний, поступающую в систему [26].

Расчётная схема системы с тремя степенями свободы взаимодействия эластичного колеса с твёрдым опорным основанием приведена на рисунке 1, б и описывается системой дифференциальных уравнений (1) [26], в которой движения каждого тела системы описываются двумя уравнениями. Для поступательного движения тел 1, 2 $\dot{x}_i = v$, $\dot{v}_i = a_i$, для вращательного движения тела 6, 7 $\dot{\varphi}_i = \omega_i$, $\dot{\omega}_i = \varepsilon_i$.

При качественном анализе на предмет возбуждения автоколебательных явлений для каждого конкретного вида движения тел системы (см. рисунок 1, б) по дифференциальным уравнениям, описывающим это движение, воспользуемся критерием Бендиксона

$$Q = \frac{\partial f_1}{\partial x_1} + \frac{\partial f_2}{\partial v_1} \equiv 0 \quad \text{или} \quad Q = \frac{\partial f_1}{\partial \varphi_1} + \frac{\partial f_2}{\partial \omega_1} \equiv 0 \quad \text{с}$$

использованием диагностического признака

$$L = \frac{1}{16} \frac{\partial^3 f}{\partial y^3} + \frac{1}{16\omega} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}. \quad \text{Для поступательного движения кузова и колеса } f_1 = \dot{x}_i, \quad f_2 = \dot{v}_i, \quad \text{для вращательного движения вала ротора электродвигателя и колеса } f_1 = \dot{\varphi}_i, \quad f_2 = \dot{\omega}_i.$$

При торможении электрифицированных транспортных средств возможен режим электродинамического торможения при применении электропривода, с задействованием рабочей тормозной системы ($M_t=0$), рекуперативном торможении ($M_k=0$) и комплексного торможения с использованием двух систем.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = V_1 \\ \dot{V}_1 = \frac{c}{M}(-x_1 + x_2) \\ \dot{x}_2 = V_2 \\ \dot{V}_2 = \frac{1}{m}(-F + cx_1 - cx_2) \\ \dot{\varphi}_k = \omega_k \\ \dot{\omega}_k = \frac{1}{J_k}[-c_m(\varphi_m - \varphi_k) + Fr_k - M_t U_{тр} - M_k] \\ \dot{\varphi}_m = \omega_m \\ \dot{\omega}_m = \frac{1}{J_m}[c_m(\varphi_m - \varphi_k) - M_t] \end{array} \right. \quad (1)$$

Исходя из анализа поведения критерия Бендиксона Q , автоколебания характерны для поступательного движения несущей системы машины ($Q=0$), что выражается в рывках и толчках, а также для вращательного движения вала ротора приводного двигателя ($Q=0$), что может проявляться в колебаниях потребляемого приводом тока.

Для поступательного движения колеса функция Q для режима частичного скольжения при рекуперативном, рабочем и комплексном торможении имеет вид

$$\frac{\partial f_1}{\partial \varphi_k} = 0.$$

Для рекуперативного торможения

$$\frac{\partial f_2}{\partial v_2} = \frac{2F_z}{m} \frac{\omega_k r_k}{v_2^2} \mu_p \left[\frac{1}{s_p} + 2s_p \left(1 - \frac{\omega_k r_k}{v_2} \right) \right] > 0.$$

Для рабочего торможения

$$\frac{\partial f_2}{\partial v_2} = \frac{2F_z}{m} \frac{\omega_k r_k}{v_2^2} \mu_p \left[\frac{1}{s_p} + 2s_p \left(1 - \frac{\omega_k r_k}{v_2} \right) \right] > 0.$$

Для комплексного торможения

$$\frac{\partial f_2}{\partial v_2} = \frac{2F_z}{m} \frac{\omega_k r_k}{v_2^2} \mu_p \left[\frac{1}{s_p} + 2s_p \left(1 - \frac{\omega_k r_k}{v_2} \right) \right] > 0.$$

Для всех случаев торможения $Q > 0$.

Так как функция Q знакопостоянна, автоколебания в зоне взаимодействия для поступательного движения колеса в данном случае невозможны.

Для вращательного движения колеса при торможении с частичным скольжением функция Q принимает вид

$$\frac{\partial f_1}{\partial \varphi_k} = 0.$$

Для рекуперативного торможения

$$\frac{\partial f_2}{\partial \omega_k} = \frac{1}{J_k} \left[2F_z r_k s_p \mu_p \left(2 \left(\frac{v - \omega r_k}{v} \right) \left(-\frac{r_k}{v} \right) + \left(-\frac{r_k}{v s_p^2} \right) \right) - (k - 2g_5 \omega_k + 4g_6 \omega_k^4) \right];$$

Для рабочего торможения

$$\frac{\partial f_2}{\partial \omega_k} = \frac{1}{J_k} \left[2F_z r_k s_p \mu_p \left(2 \left(\frac{v - \omega r_k}{v} \right) \left(-\frac{r_k}{v} \right) + \left(-\frac{r_k}{v s_p^2} \right) \right) - (k - 2g_3 \omega_k + 4g_4 \omega_k^4) \right].$$

Для комплексного торможения

$$\frac{\partial f_2}{\partial \omega_k} = \frac{1}{J_k} \left[2F_z r_k s_p \mu_p \left(2 \left(\frac{v - \omega r_k}{v} \right) \left(-\frac{r_k}{v} \right) + \left(-\frac{r_k}{v s_p^2} \right) \right) - (k - 2g_5 \omega_k + 5g_5 \omega_k^4) - (k - 2g_5 \omega_k + 5g_6 \omega_k^4) \right].$$

В этих случаях функция Q является знакопеременной, что указывает на возможность возникновения автоколебаний.

Для рекуперативного торможения

$$L = -\frac{1}{J_k} \left\{ \frac{3}{2} k g_6 \omega_k \right\} + \frac{1}{\omega_k J_k} \left\{ -\frac{1}{8} F_z r_k s_p \mu_p \frac{2r_k^2}{v^2} + \frac{1}{8} k g_5 - \frac{3}{4} k g_6 \omega_k^2 \right\} < 0.$$

Для рабочего торможения

$$L = -\frac{1}{J_k} \left\{ \frac{3}{2} k g_6 \omega_k \right\} + \frac{1}{\omega_k J_k} \left\{ -\frac{1}{8} F_z r_k s_p \mu_p \frac{2r_k^2}{v^2} + \frac{1}{8} k g_3 - \frac{3}{4} k g_4 \omega_k^2 \right\} < 0.$$

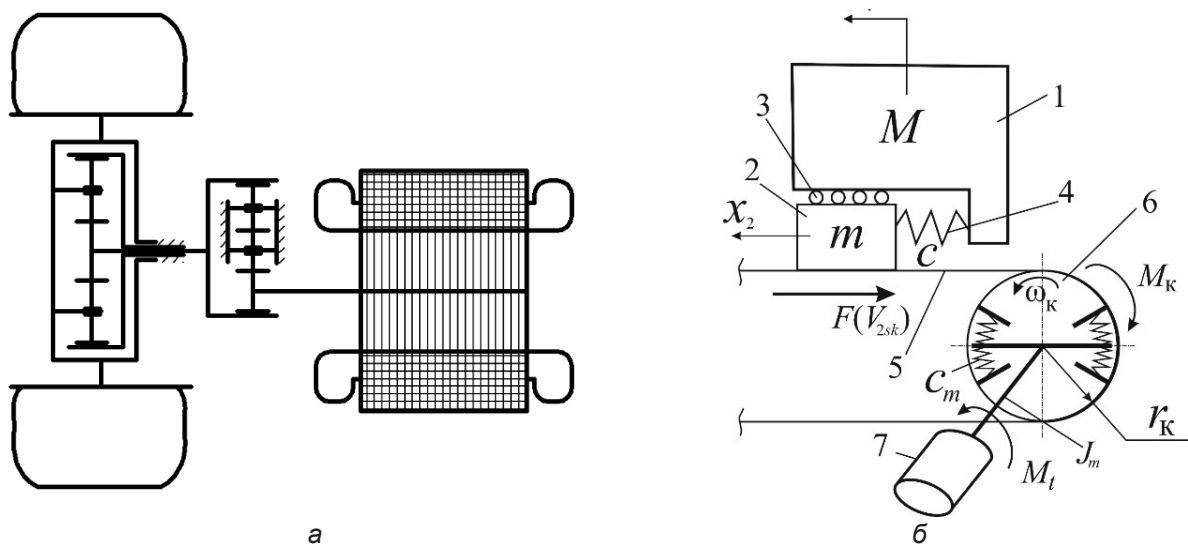


Рисунок 1 – Схема привода (а) и схема взаимодействия эластичного колеса с твёрдым опорным основанием (б):

1 – масса M поддресорных частей автомобиля, приходящаяся на колесо;
 2 – масса m колеса; 3 – ролики; 4 – пружина; 5 – опорное основание; 6 – вращающееся колесо;
 7 – тяговый электродвигатель (далее, ТЭД); c – жёсткость пружины;
 x_1, x_2 – продольные перемещения масс 1 и 2 соответственно;
 $F(v_{2sk})$ – сила трения, зависящая от скорости v_{2sk} скольжения колеса относительно опорного основания;
 ω_k – угловая скорость вращения колеса; r_k – расстояние от центра колеса до опорного основания;
 M_t – тормозной момент, развиваемый тяговым электродвигателем;
 c_m – угловая «электромагнитная жёсткость» тягового синхронного электродвигателя с постоянными магнитами;
 J_m – момент инерции вращающихся частей электродвигателя, приведённый к ротору;
 M_k – тормозной момент, развиваемый колёсным тормозным механизмом
 Источник: составлено автором.

Figure 1 – Drive scheme (a) and scheme of interaction of an elastic wheel with a solid support base (b):

1 – mass M of the vehicle's under sprung parts per wheel;
 2 – mass of the wheel (m); 3 – rollers; 4 – spring; 5 – support base; 6 – rotating wheel;
 7 – traction electric motor (hereinafter, TEM); c – spring stiffness;
 x_1, x_2 – longitudinal displacements of masses 1 and 2 respectively;
 $F(v_{2sk})$ – friction force depending on the velocity v_{2sk} of the wheel sliding relatively to the support base;
 ω_k – angular velocity of wheel rotation; r_k – distance from the wheel center to the support base;
 M_t – braking torque developed by traction electric motor;
 c_m – angular “electromagnetic stiffness” of traction synchronous electric motor with permanent magnets;
 J_m – inertia moment of electric motor rotating parts, led to the rotor;
 M_k – braking torque developed by the wheel braking mechanism.
 Source: compiled by the author.

Для комплексного торможения

$$L = -\frac{3}{2J_k} \{k g_4 \omega_k + k g_6 \omega_k\} + \\ + \frac{1}{\omega_k J_k} \left\{ -\frac{1}{8} F_z r_k s_p \mu_p \frac{2r_k^2}{v^2} + \frac{1}{8} k g_3 - \right. \\ \left. - \frac{3}{4} k g_4 \omega_k^2 + \frac{1}{8} k g_5 - \frac{3}{4} k g_6 \omega_k^2 \right\} < 0.$$

Имеем «мягкий» режим возбуждения автоколебаний. Такой режим нагружения трансмиссии является опасным, т.к. при интенсивном торможении амплитуды автоколебаний

резко увеличиваются, что может привести к «дёрганию» автомобиля в продольном направлении, к поломкам зубьев трансмиссионных агрегатов, карданных валов, шарниров и полуосей. Поэтому при интенсивном торможении при высоких начальных скоростях во избежание поломок необходимо снижать общий тормозной момент, например, за счёт снижения рекуперативного момента тягового электродвигателя.

При полном скольжении колеса система дифференциальных уравнений принимает вид (2):

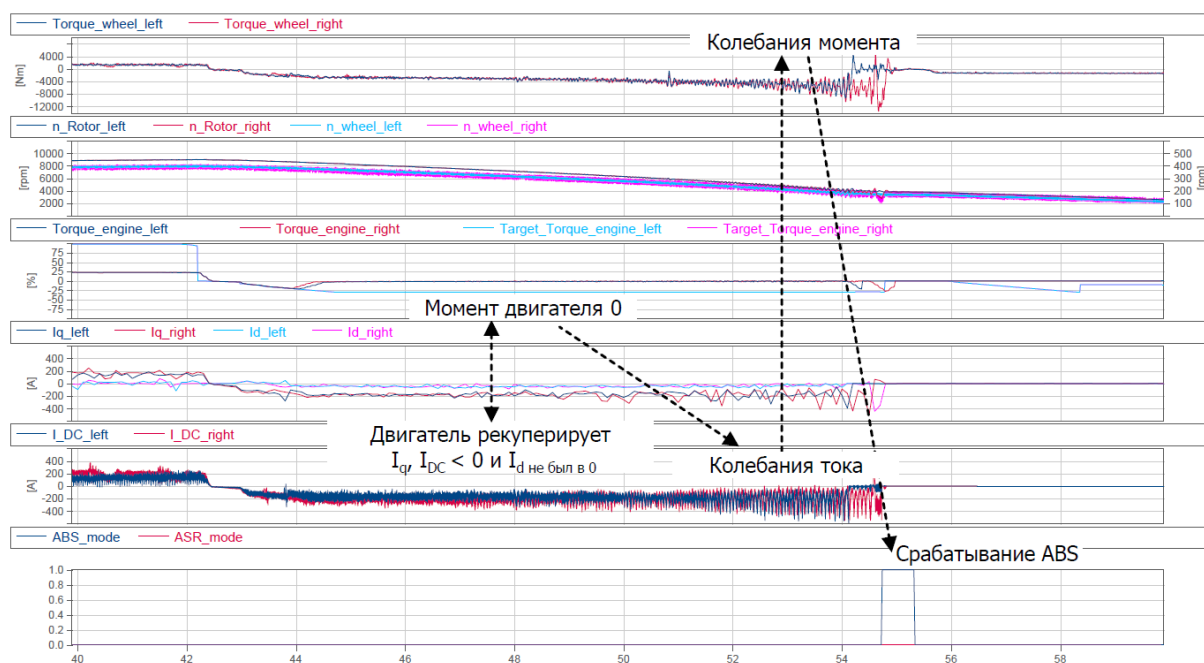


Рисунок 2 – Процесс торможения на мокром опорном основании
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Braking process on a wet support base
Source: compiled by the author.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = V_1 \\ \dot{V}_1 = \frac{c}{M}(-x_1 + x_2) \\ \dot{x}_2 = V_2 \\ \dot{V}_2 = \frac{1}{m}(-F + cx_1 - cx_2) \end{cases} \quad (2)$$

В данном случае функция Q знакопеременна, а диагностический критерий $L = \frac{1}{c} \left(-\frac{6k}{m} g_1 + \frac{60k}{m} V_{2sk}^2 \right) + \frac{1}{16\omega} \left(-\frac{6k}{m} g_1 V_{2sk} + \frac{20k}{m} V_{2sk}^3 \right) > 0$. Таким образом, имеем «жёсткий» режим возникновения автоколебаний.

Данные явления возбуждаются вследствие снижения силы трения при увеличении скорости скольжения колеса относительно опорного основания, сопровождаемого ростом амплитуды колебаний, и к возникновению явления отрицательного демпфирования, при котором колебания не затухают. Внешне эти процессы проявляются возникновением рывков и вибраций. Такие процессы передаются на вал ротора электродвигателя. Как правило, современные тяговые электрические двигатели имеют внешнюю механическую характеристику высокой жёсткости и лишены конструктивных элементов, демпфирующих колебания угловой скорости крутящего момента на валу ротора. Эти их особенности в сочетании с уменьшающейся силой трения при росте скорости сколь-

жения колеса способствуют зарождению колебательных явлений в силовом приводе.

Автоколебания в электромеханическом приводе могут возникать в тех случаях, когда в механическом приводе их нет. Но всё же возможность электропривода обеспечивать прямое управление моментом позволяет обеспечить их демпфирование и исключить их, хотя в этих условиях для механического привода они будут возбуждаться.

При натуральных исследованиях, связанных с интенсивным комплексным торможением электробуса большой вместимости на скользком опорном основании (рисунок 2).

Наблюдается зарождение автоколебательных явлений по крутящим моментам при повышенном скольжении колёс (см. рисунок 2).

Процесс зарождения автоколебательных явлений можно представить как потерю устойчивости движения в данной электромеханической системе [27]. Рассмотрим поступательное перемещение кузова, на котором автоколебания сказываются в виде толчков, рывков и вращательного движения ротора двигателя (см. рисунок 1), для которых свойственно возбуждение автоколебаний в процессе комплексного торможения.

Дифференциальные уравнения движения рассматриваемой системы для этих фазовых переменных имеют вид

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = V_1 \\ \dot{V}_1 = -\frac{c}{M}(x_1 - x_2) \\ \dot{\varphi}_m = \omega_m \\ \dot{\omega}_m = \frac{1}{J_m}[c_m(\varphi_m - \varphi_k) - M_t + K_w\omega_k] \end{cases} \quad (3)$$

Рассмотрим по отдельности вопрос устойчивости сначала по координате x_1 , затем по координате ω_m . В первом случае составим кандидата на функцию Ляпунова

$$U_x = \frac{1}{2}x_1^2 + \frac{1}{2}V_1^2 > 0. \quad (4)$$

Полная производная этой функции должна быть отрицательной или обращаться в 0, если сама функция положительна для устойчивости системы.

$$\frac{dU_x}{dt} = x_1 \left(1 - \frac{c}{M}\right) + \frac{c}{M}x_2 \leq 0. \quad (5)$$

Условие не всегда выполняется, что свидетельствует о неустойчивом характере поступательного движения поддрессоренной массы при торможении. Для обеспечения устойчивости и снижения риска возникновения автоколебаний необходимо при проектировании увеличивать жёсткость с упругой связи опорно-ходовых модулей транспортного средства с его поддрессоренной массой $\frac{x_1}{x_2} \left(1 - \frac{c}{M}\right) \leq \frac{c}{M}$. При условии малости амплитуд автоколебаний считаем $x_1 \approx x_2$, данное неравенство выполняется при соотношении $\frac{c}{M} < 0,5$, что позволяет добиться устойчивого движения поддрессоренной части транспортного средства.

Для вращательного движения ротора двигателя кандидата на функцию Ляпунова запишем так

$$U_{\varphi_m} = \frac{1}{2}\varphi_m^2 + \frac{1}{2}\omega_m^2 > 0. \quad (6)$$

Полная производная от функции

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\varphi_m} = \varphi_m\omega_m + \frac{\omega_m}{J_m}[c_m(\varphi_m - \varphi_k) - \\ - M_t + K_w\omega_k] \leq 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Слагаемое $\varphi_m\omega_m > 0$, но при этом ограничено по абсолютному значению.

Для второго слагаемого для повышения устойчивости необходимо обеспечить $\varphi_m \leq \varphi_k$, т.е. угловая скорость вращения колеса при торможении должна быть не меньше угловой скорости вращения ротора. Это условие эквивалентно требованию отсутствия блокировки колёс при торможении вплоть до необходимости применения антиблокировочной системы, принцип работы которой заключается в снижении тормозного момента M_t . И это условие противоречит формальному требованию увеличения слагаемого $-M_t < 0$. Таким образом, совместная работа трёх слагаемых $c_m(\varphi_m - \varphi_k) - M_t + K_w\omega_k$ должна быть построена на компромиссе между формальным требованием неположительности (7) и отсутствием блокировки колёс за счёт снижения отрицательного тормозного момента. Достичь указанного компромисса помогает слагаемое $K_w\omega_k$, которое должно обеспечивать снижение тормозного момента M_t в случае опасности возникновения как блокировки колёс, так и возбуждения автоколебаний.

Исходя из недопустимости блокировки, в крайнем случае, считаем, $\varphi_m = \varphi_k$, а $K_w \leq \frac{M_t}{\omega_k}$. Демпфирующий момент позволяет вывести избыток энергии колебаний, рассеивая её и меняя положение рабочей точки системы, переводя её на восходящий участок зависимости силы трения от скорости скольжения.

Исходя из вышеизложенного, можно представить алгоритм управления демпфирующим моментом следующим образом (рисунок 3)¹.

Система управления постоянно осуществляет расчёт и мониторинг диагностических признаков буксования ведущих колёс dw_2, dw_4 и функций f_{relay2} и f_{relay4} [8].

В случае угрозы блокировки колёс при повышенном скольжении $dw_i > 0,3$ пределяется коэффициент демпфирования K_w для левого и правого колёс по формуле $K_w \geq 2\sqrt{J_k C_{mi}}$, где угловую жёсткость C_{mi} для i -го колеса рассматриваем в процессе управления. Производится оценка тормозного, рекуперативного момента на колёсах, развиваемого тяговым электродвигателем M_{t2}, M_{t4} , осуществляется расчёт демпфирующего момента и корректировка момента, развиваемого электродвигателем.

¹ Патент № 2797069 С1 Российская Федерация, МПК В60К 17/12, В60L 15/20, В60L 3/10. Способ управления индивидуальным тяговым электроприводом ведущих колёс многоколёсного транспортного средства: № 2023103483: заявл. 16.02.2023; опубл. 31.05.2023 / А.В. Климов, Б.К. Оспанбеков, М.М. Жилейкин [и др.]; заявитель Публичное акционерное общество «КАМАЗ». EDN QAUBVR.

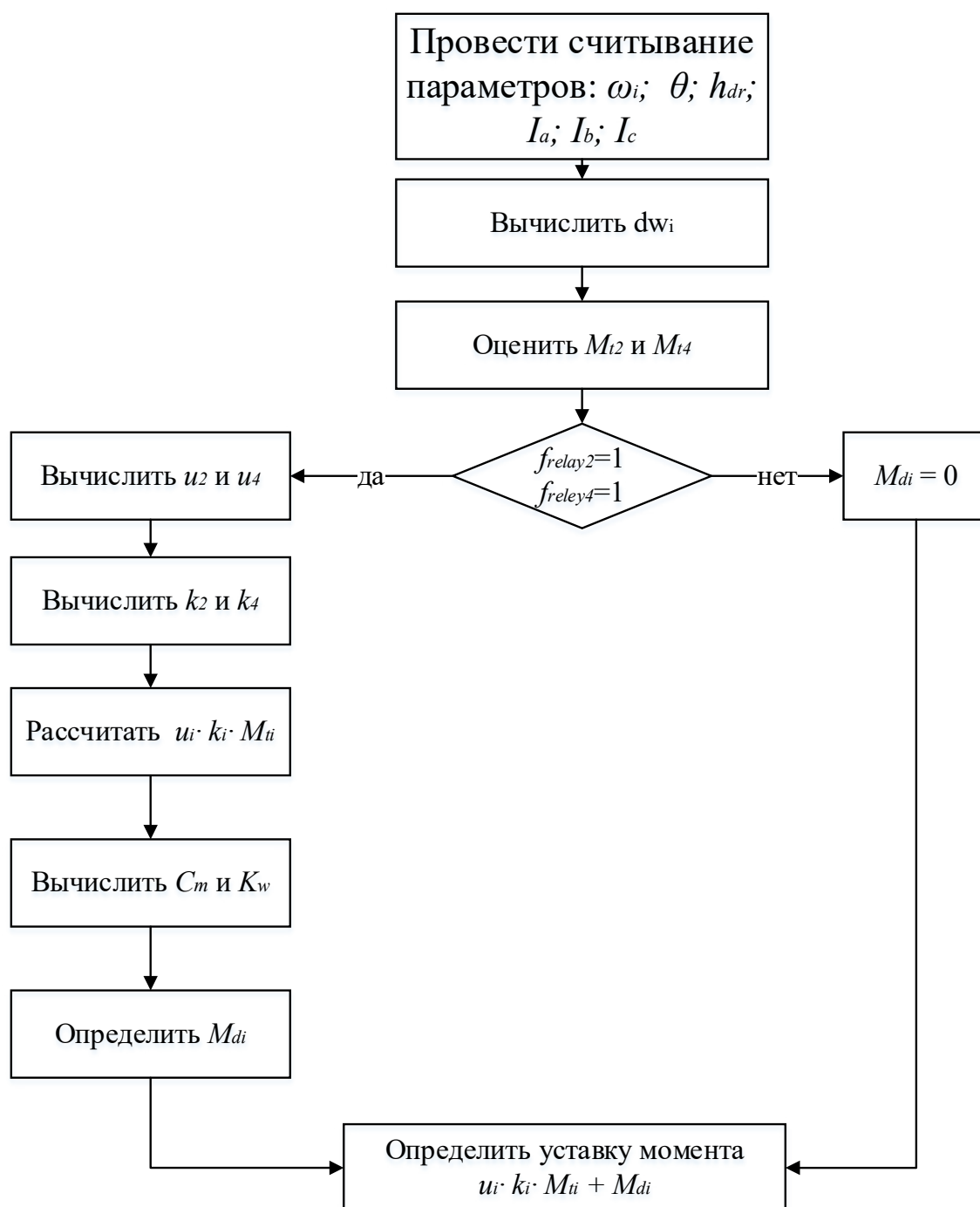


Рисунок 3– Алгоритм управления
Источник: составлено автором².

Figure 3 – Control Algorithm
Source: compiled by the author².

² Патент № 2797069 С1 Российская Федерация, МПК В60К 17/12, В60L 15/20, В60L 3/10. Способ управления индивидуальным тяговым электроприводом ведущих колёс многоколёсного транспортного средства: № 2023103483: заявл. 16.02.2023; опубл. 31.05.2023 / А.В. Климов, Б.К. Оспанбеков, М.М. Жилейкин [и др.]; заявитель Публичное акционерное общество «КАМАЗ». EDN QAUBVR.

Исследование эффективности алгоритма подавления автоколебаний при торможении

Для исследования эффективности были проведены испытательные виртуальные заезды с торможением со скорости 70 км/ч в повороте на разных опорных основаниях для двухосного транспортного средства категории М3 с полной массой 18000 кг³, оснащённого классической антиблокировочной системой [28] и системой с функцией, имеющей возможность демпфировать автоколебания при использовании математической модели динамики движения колёсной машины в MatLabSimulink.

Рассматривается торможение в повороте как наиболее тяжёлый случай из-за разгрузки внутреннего колеса относительно поворота, что дополнительно снижает силу трения в зоне взаимодействия колеса с дорогой.

В качестве критерия эффективности подавления автоколебаний принято значение

среднего относительного ε_0 изменения парных пиковых значений амплитуд колебаний для угловой скорости колёс ε_0^ω и для суммарного тормозного момента на ведущем колесе $\varepsilon_0^{M_m}$:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{k_0} \sum_{j=1}^{k_0} \frac{p_{j0} - p_{j2}}{p_{j0}} 100\%,$$

где p_{j0} , p_{j2} – j -е парные пиковые значения амплитуды колебаний для системы, не оснащённой функцией подавления автоколебаний и с данной функцией; k_0 – число парных пиков на реализации.

Если $\varepsilon_0 > 0$, то функция подавления автоколебаний приводит к снижению пиковых значений амплитуд и подавлению автоколебаний.

На рисунках 4, 5, 6, 7 показаны параметры процесса торможения транспортного средства в повороте на опорном основании с низким коэффициентом сцепления ($\mu = 0,35$).

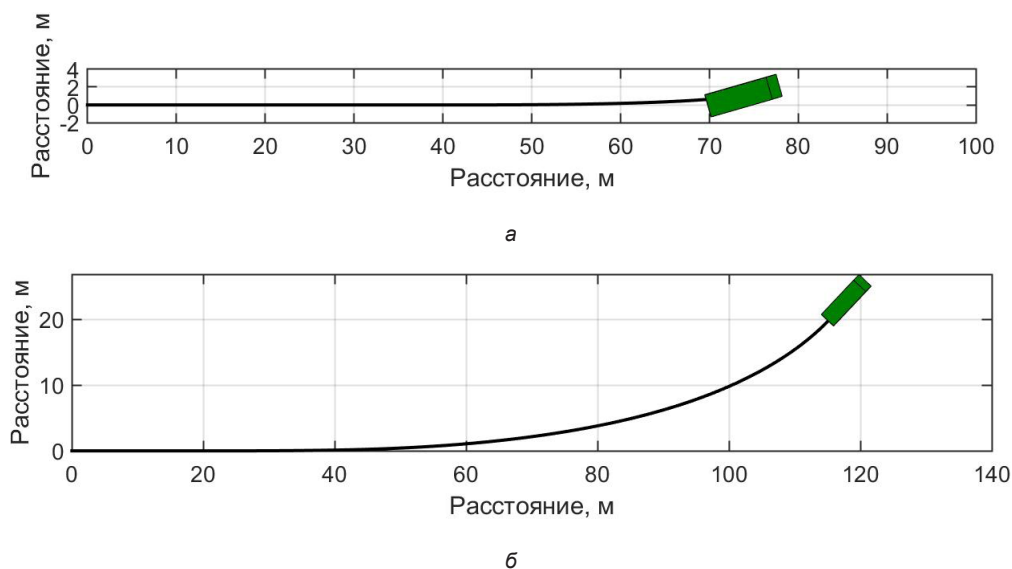
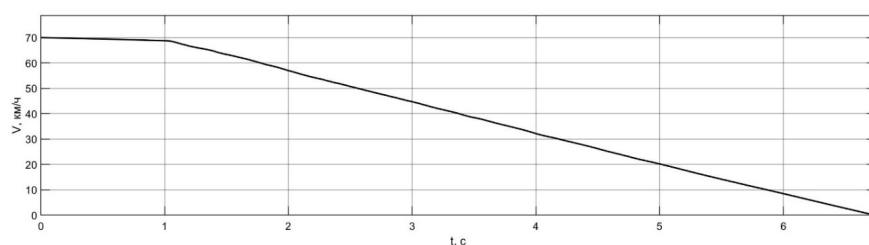


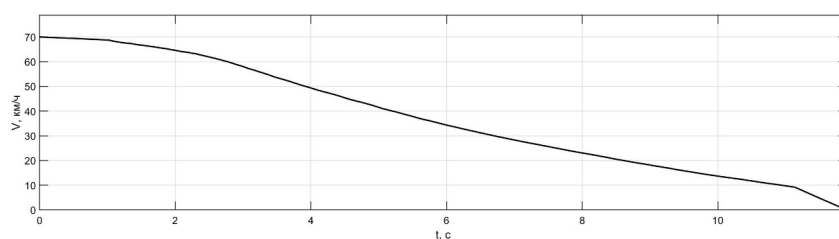
Рисунок 4 – Траектория:
а – без функции подавления автоколебаний;
б – с функцией подавления автоколебаний
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Trajectory:
a – without auto oscillation suppression function;
b – with auto oscillation suppression function
Source: compiled by the author.

³ Электробус КАМАЗ-6282 [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. https://kamaz.ru/production/buses/pdf_062023/Электробус%20КАМАЗ-6282.pdf (дата обращения: 04.03.2024).



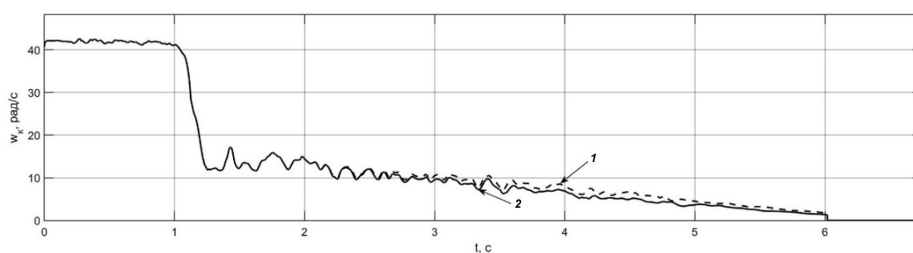
a



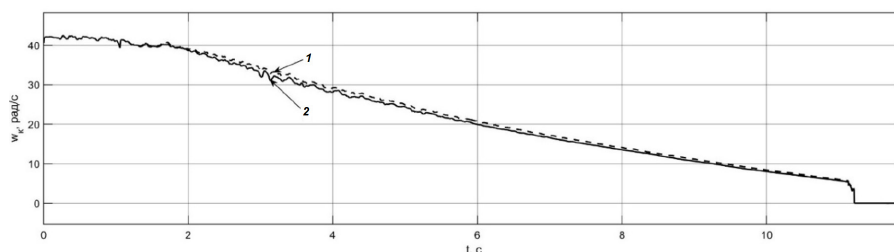
б

Рисунок 5 – Скорость:
a – без функции подавления автоколебаний;
б – с функцией подавления автоколебаний
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Speed:
a – without auto oscillation suppression function;
b – with auto oscillation suppression function
Source: compiled by the author.



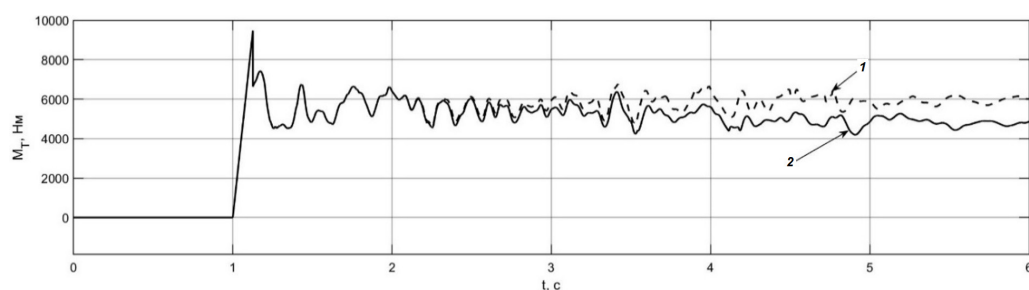
a



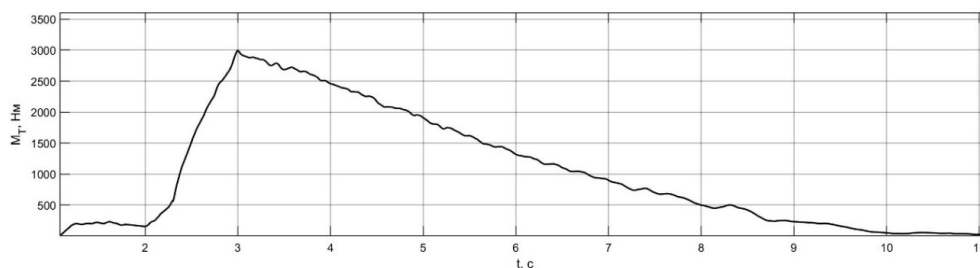
б

Рисунок 6 – Угловые скорости колёс:
a – без функции подавления автоколебаний;
б – с функцией подавления автоколебаний;
1 – левое ведущее колесо; 2 – правое ведущее колесо.
Источник: составлено автором.

Figure 6 – Angular velocities of the wheels:
a – without auto oscillation suppression function;
b – with auto oscillation suppression function;
1 – left driving wheel, 2 – right driving wheel
Source: compiled by the author.



а



б

Рисунок 7 – Тормозные моменты на колёсах:
 а – без функции подавления автоколебаний;
 б – с функцией подавления автоколебаний;
 1 – левое ведущее колесо; 2 – правое ведущее колесо
 Источник: составлено автором.

Figure 7 – Braking moments on the wheels:
 а – without auto oscillation suppression function;
 б – with auto oscillation suppression function;
 1 – left driving wheel, 2 – right driving wheel
 Source: compiled by author.

При резком торможении с использованием обычной АБС на скользкой опорной поверхности возникают автоколебательные процессы вращения колёс (рисунок 6, а) и тормозных моментов (рисунок 7, а), что приводит к ухудшению условий сцепления колёс с опорной поверхностью и снижению управляемости и траекторной устойчивости. В результате ма-

шина не может совершить полноценный манёвр уклонения от столкновения при торможении (рисунок 4, а).

На рисунках 8, 9, 10, 11 показаны параметры процесса торможения транспортного средства в повороте на опорном основании с высоким коэффициентом сцепления (сухой асфальт, $\varphi = 0,8$).

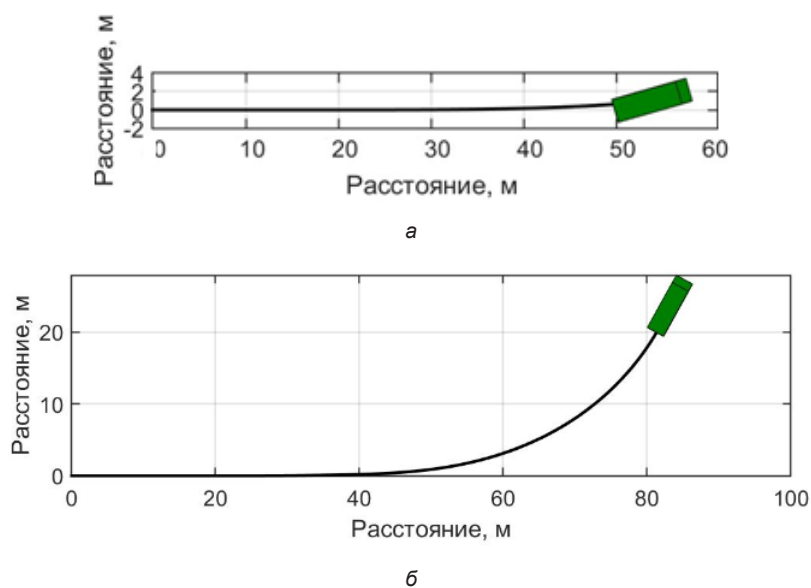


Рисунок 8 – Траектория: а – без функции подавления автоколебаний;
б – с функцией подавления автоколебаний
Источник: составлено автором.

Figure 8 – Trajectory: а – without auto oscillation suppression function;
б – with auto oscillation suppression function
Source: compiled by the author.

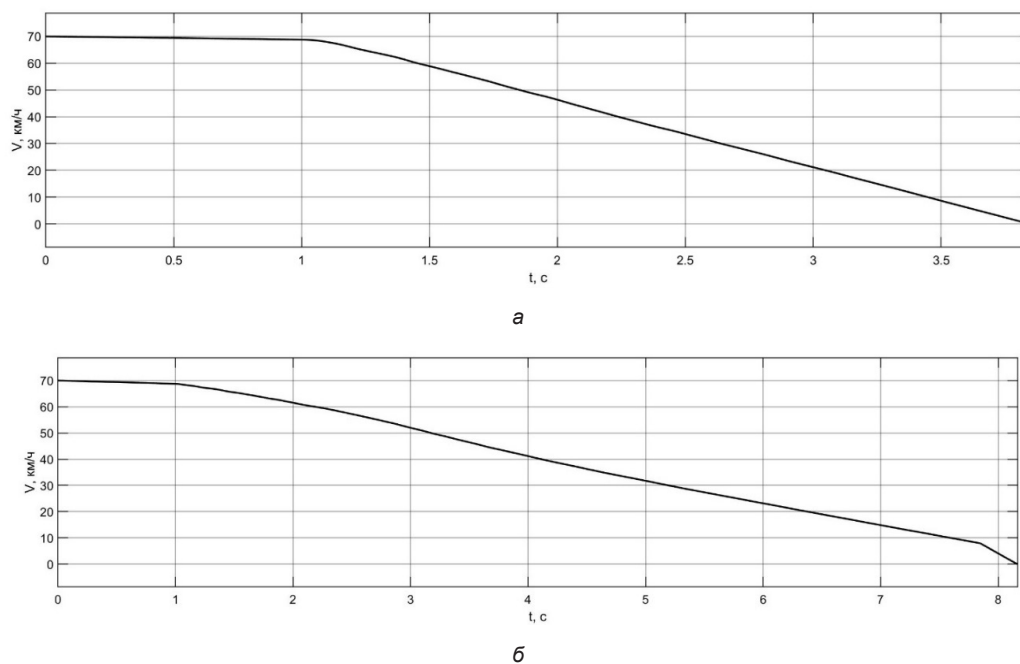


Рисунок 9 – Скорость:
а – без функции подавления автоколебаний;
б – с функцией подавления автоколебаний
Источник: составлено автором.

Figure 9 – Speed:
а – without auto oscillation suppression function;
б – with auto oscillation suppression function
Source: compiled by the author.

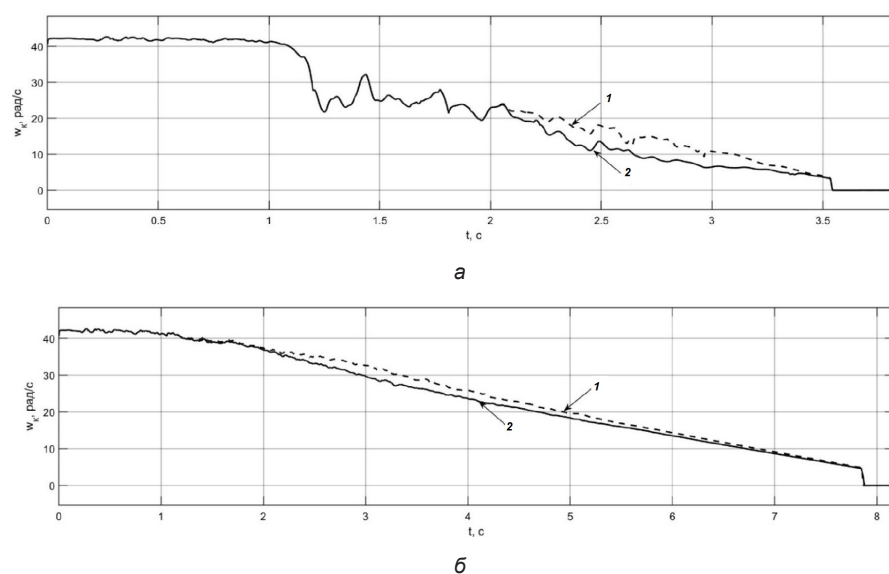


Рисунок 10 – Угловые скорости:
 а – без функции подавления автоколебаний;
 б – с функцией подавления автоколебаний;
 1 – левое ведущее колесо; 2 – правое ведущее колесо
 Источник: составлено автором.

Figure 10 – Angular velocities:
 a – without auto oscillation suppression function;
 b – with auto oscillation suppression function;
 1 – left driving wheel, 2 – right driving wheel.
 Source: compiled by the author.

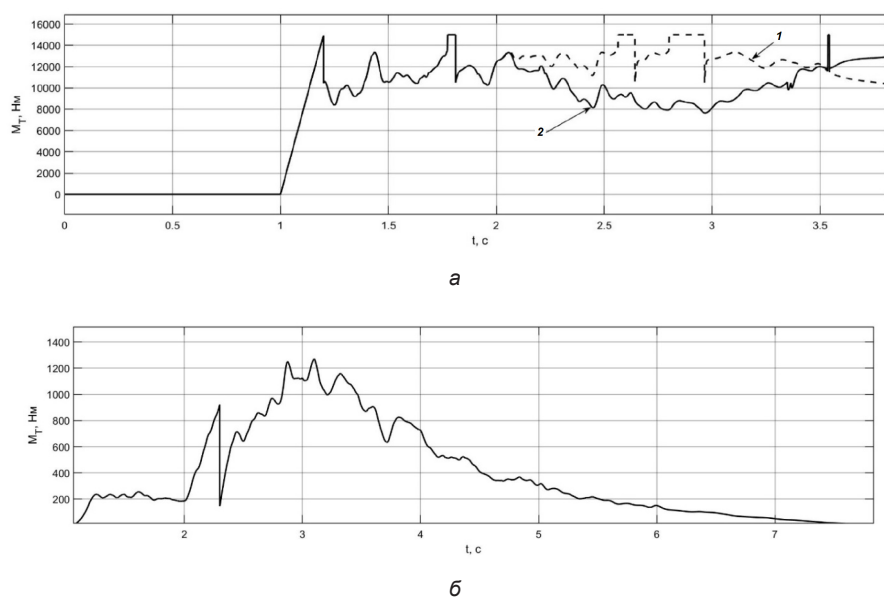


Рисунок 11 – Тормозные моменты:
 а – без функции подавления автоколебаний;
 б – с функцией подавления автоколебаний;
 1 – левое ведущее колесо; 2 – правое ведущее колесо
 Источник: составлено автором.

Figure 11 – Braking moments:
 a – without auto oscillation suppression function;
 b – with auto oscillation suppression function;
 1 – left driving wheel, 2 – right driving wheel.
 Source: compiled by the author.

Анализ представленных результатов моделирования торможения на мокром асфальте показывает, что характер работы обычной АБС и АБС с функцией подавления автоколебаний такой же, как и в случае торможения на льду. Наблюдается возбуждение колебательных явлений для угловых скоростей колёс (см. рисунок 10) и тормозных моментов (см. рисунок 11) для машины, оснащённой обычной АБС, что приводит к снижению сцепления колёс с дорогой и появлению вероятности снижения управляемости и траекторной устойчивости. При применении АБС с функцией подавления автоколебаний таковых явлений не обнаруживается.

ВЫВОДЫ

Методами аналитического анализа системы дифференциальных уравнений движения колёсной машины при замедлении установлена с помощью критерия Бендиксона возможность возбуждения автоколебаний несущей системы для поступательного движения, ротора тягового электродвигателя для вращательного движения, а также как для вращательного, так и поступательного движения колеса. Возбуждение автоколебаний также подтверждено при применении метода имитационного моделирования движения транспортного средства, и установлена возможность возбуждения автоколебательных явлений в зоне контакта работоспособности.

Работоспособность и эффективность алгоритма подавления автоколебаний в системе электромеханического привода ведущих колёс транспортного средства подтверждена с помощью методов имитационного моделирования движения машины и экспериментальных исследований, что позволяет рекомендовать его использование при разработке систем управления. В случае использования на транспортном средстве при торможении на скользкой опорной поверхности АБС с функцией подавления автоколебаний уровень автоколебаний угловых скоростей вращения колёс (см. рисунок 5, б) снизился, уровень суммарных тормозных моментов на ведущих колесах (см. рисунок 6, б) снизился. Манёвр уклонения при торможении удаётся выполнить в полном объёме, что свидетельствует о повышении управляемости и траекторной устойчивости электробуса с АБС с функцией подавления автоколебаний.

В случае использования на транспортном средстве при торможении на асфальте АБС с функцией подавления автоколебаний их уровень для угловых скоростей вращения колёс (см. рисунок 8) снизился на, для суммарных тормозных моментов на ведущих колесах

(см. рисунок 9) уровень снизился на. Манёвр уклонения при торможении удастся выполнить в полном объёме, что свидетельствует о повышении управляемости и траекторной устойчивости электробуса с АБС с функцией подавления автоколебаний при торможении на скользких опорных поверхностях.

Наблюдаемое увеличение тормозного пути на практике будет возникать лишь при возникновении скольжения (выше определённого порога), что в последующем приведет к снижению управляемости и траекторной устойчивости. При достаточном сцеплении такое явление наблюдаться не будет, поскольку система подавления в данном случае не функционирует. Для обеспечения эффективности тормозной системы в дальнейшем следует повысить адаптивность системы подавления автоколебаний под условия движения.

При этом значения динамических нагрузок в приводе также снижаются, повышая показатели надёжности элементов, за счёт уменьшения пиковых значений рекуперативных моментов и функционирования системы управления.

Практическая ценность исследования заключается в возможности использования предложенных законов управления для разработки системы управления тягового привода транспортных машин.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вильке В.Г., Шаповалов И.Л. Автоколебания в процессе торможения автомобиля // Вестник МГУ. Сер. 1. Математика, механика. 2015. № 4. С. 33–39.
2. Кручинин П.А., Магомедов М.Х., Новожилов И.В. Математическая модель автомобильного колеса на антиблокировочных режимах движения // Известия РАН. Серия МТТ. 2001. № 6. С. 63–69.
3. Awrejcewicz J., Dzyubak L., Gheorghi C. Estimation of chaotic and regular (stick-slip and ship-slip) oscillations exhibited by coupled oscillations with dry friction // Nonlinear Dynamics. 2005. V. 42. № 2. P. 383–394.
4. Pascal M. Dynamics and stability of a two-degrees of freedom oscillator with an elastic stop // Journal of Computational and Nonlinear Dynamics. 2006. V. 1. № 1. P. 94–102.
5. Shin K., Brennan M.J., Oh J.-E., Harris C.J. Analysis of disk brake noise using a two-degrees-of-freedom model // Journal of Sound and Vibration. 2002. V. 254. № 5. P. 837–848.
6. Kotiev G.O., Padalkin B.V., Kartashov A.B., et al. Designs and development of Russian scientific schools in the field of cross-country ground vehicles building // ARPN JEAS. 2017. vol. 12, no. 4. pp. 1064–1071.
7. Ергин А.А., Коломейцева М.Б., Котиев Г.О. Антиблокировочная система управления тормозным приводом колеса автомобиля // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2004. № 9. С. 11–13.

8. Soliman A., Kaldas M. An investigation of anti-lock braking system for automobiles // SAE Tech. Paper, 2012. no. 2012-01-0209. DOI: <https://doi.org/10.4271/2012-01-0209>
9. Sun C., Pei X. Development of ABS ECU with hard ware-in-the-loop simulation based on labcar system. SAE Int. J. Passeng. Cars – Electron. Electr. Syst. 2015. vol. 8, no. 1. pp. 14–21, DOI: <https://doi.org/10.4271/2014-01-2524>
10. Sabbioni E., Cheli F., d'Alessandro V. Analysis of ABS/ESP control logics using a HIL test bench. SAE Tech. Paper. 2011. no. 2011-01-0032. DOI: <https://doi.org/10.4271/2011-01-0032>
11. Marshak K.M., Guderman J.F.II., Jonson M.J. Performance of anti-lock braking system equipped passenger vehicles part I: braking as a function of brake pedal application force. SAE Tech. Paper. 2002. no. 2002-01-0304. DOI: <https://doi.org/10.4271/2002-01-0304>
12. Жилейкин М.М. Исследование автоколебательных процессов в зоне взаимодействия эластичной шины с твердым опорным основанием. Известия высших учебных заведений // Машиностроение. 2021. № 10. С. 3–15. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-10-3-15.
13. Белоутов Г.С., Клочков Э.С. Комбинированный метод расчета переходных процессов в трансмиссиях // Вопросы оборонной техники. Сер. 6. 1984. Вып. 1 (113). С. 45–48.
14. Альгин В.Б., Дробышевская О.В., Сорочан В.М., Успенский А.А. Схематизация и динамический расчет мобильной машины. Системы с переменной структурой // Механика мобильных машин. Минск, 2008. С. 16–24.
15. Альгин В.Б. Динамика многомассовых систем машин при изменении состояний фрикционных компонентов и направлений силовых потоков // Механика машин, механизмов и материалов. 2014. № 4 (29). С. 21–32.
16. Мясищев Д.Г., Вашуткин А.С., Лоренц А.С. Уменьшение резонанса релаксационных автоколебаний колесных тормозных механизмов лесовозных автомобилей // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2016. № 4(352). С. 112–120. DOI 10.17238/issn0536-1036.2016.4.112. EDN WJXSHF.
17. Жилейкин М.М., Сиротин П.В., Носиков С.С., Пуляев Н.Н. Метод выявления потери устойчивости движения тракторов при реализации тягового усилия на прицеп или сцепной агрегат // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 1. С. 39–48. DOI 10.17816/0321-4443-321266. EDN ZCQJYM.
18. Грабар И.Г., Опанасюк Е.Г., Бегерский Д.Б., Опанасюк О.Е. Определение условий начала автоколебательных процессов в контакте модели пневматической шины с сыпучим грунтом // Вісник СевНТУ. 2011. № 121. С. 139–142. EDN UMXAMR.
19. Ergin A.A., Kolomejtseva M.B., Kotiev G.O. Antiblocking control system of the brake drive of automobile wheel // Pribory i Sistemy Upravleniya. 2004. (9). pp. 11–13.
20. Klimov A.V., Ospanbekov B.K., Kelle A.V., Shadrin S.S., Makarova D.A., Furlotov Y.M. Research into the Peculiarities of the Individual Traction Drive Non-linear System Oscillatory Processes // World Electr. Veh. J. 2023. 14. 316. <https://doi.org/10.3390/wevj14110316>.
21. Климов А.В. Колебательные процессы в нелинейной системе индивидуального тягового электрического привода // Грузовик. 2023. № 7. С. 19–24. DOI 10.36652/1684-1298-2023-7-19-24. EDN RXPWMI.
22. Климов А.В., Антонян А.В. Исследование особенностей протекания колебательных процессов в нелинейной системе индивидуального тягового привода электробуса // Известия МГТУ «МАМИ». 2023. Т. 17, № 1. С. 87–96. DOI 10.17816/2074-0530-115233. EDN DVWXHE.
23. Климов А.В. Противобуксовочная система с функцией подавления автоколебаний колёс в тяговом режиме работы // Труды МАМИ. 2023. № 3(294). С. 44–56. DOI 10.51187/0135-3152-2023-3-44-56. EDN XJXUWX.
24. Климов А.В. Наблюдатель буксования ведущих колес с функцией подавления автоколебаний в тяговом режиме // Транспортные системы. 2023. № 2(28). С. 17–29. DOI 10.46960/2782-5477_2023_2_17. EDN HRSZDR.
25. Климов А.В. Подавление автоколебаний ведущих колес в тормозном режиме // Грузовик. 2023. № 9. С. 6–14. DOI 10.36652/1684-1298-2023-9-6-14. EDN PUCDXP.
26. Клепиков В.Б. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография. Изд-во: «Підручник НТУ «ХПІ»», 2014. 408 с. На рус. яз. ISBN 978-617-687-029-6.
27. Шамберов В.Н. Фрикционные автоколебания в механических системах // Известия вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, №2. С. 24–28.
28. Жилейкин М.М., Журкин М.М. Алгоритм работы антиблокировочной системы тормозов с функцией противодействия заносу для двухосных автомобилей с одной ведущей осью // Известия МГТУ «МАМИ». 2020. №1 (43). С. 51–56.

REFERENCES

1. Vil'ke V.G., Shapovalov I.L. Self-oscillations during car braking. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 1. Matematika. Mekhanika*. 2015; 4: 33–39. (in Russ.)
2. Kruchinin P.A., Magomedov M.Kh., Novozhilov I.V. Mathematical model of an automobile wheel for antilock modes of motion. *Mechanics of Solids*. 2001; 6: 63–69. (in Russ)
3. Awrejcewicz J., Dzyubak L., Grehori C. Estimation of chaotic and regular (stick-slip and shiplip) oscillations exhibited by coupled oscillations with dry friction. *Nonlinear Dynamics*. 2005; V. 42. no 2: 383–394.
4. Pascal M. Dynamics and stability of a two degrees of freedom oscillator with an elastic stop. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*. 2006; V.1. no 1: 94–102.
5. Shin K., Brennan M.J., Oh J.-E., Harris C.J. Analysis of disk brake noise using a two-degrees-of-freedom model. *Journal of Sound and Vibration*. 2002; V. 254. no 5: 837–848.
6. Kotiev G.O., Padalkin B.V., Kartashov A.B., Diakov A.S. Designs and development of Russian scientific schools in the field of cross-country ground vehicles building ARP. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017; 12 (4): 1064–1071.

7. Ergin A.A., Kolomejtseva M.B., Kotiev G.O. Antiblocking control system of the brake drive of automobile wheel. *Pribery i Sistemy Upravleniya*. 2004; (9): 11–13.
8. Soliman A., Kaldas M. An investigation of anti-lock braking system for automobiles. *SAE Tech. Paper*. 2012; 2012-01-0209. DOI: <https://doi.org/10.4271/2012-01-0209>
9. Sun C., Pei X. Development of ABS ECU with hard ware-in-the-loop simulation based on labcar system. *SAE Int. J. Passeng. Cars – Electron. Electr. Syst.* 2015; vol. 8, no. 1: 14–21, DOI: <https://doi.org/10.4271/2014-01-2524>
10. Sabbioni E., Cheli F., d'Alessandro V. Analysis of ABS/ESP control logics using a HIL test bench. *SAE Tech. Paper*. 2011; 2011-01-0032, doi: <https://doi.org/10.4271/2011-01-0032>
11. Marshek K.M., Guderman J.F.II., Jonson M.J. Performance of anti-lock braking system equipped passenger vehicles part I: braking as a function of brake pedal application force. *SAE Tech. Paper*. 2002; 2002-01-0304. DOI: <https://doi.org/10.4271/2002-01-0304>.
12. Zhileykin M.M. Research of Self-Oscillating Processes in the Zone of Interaction of an Elastic Tire with a Solid Support Base. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2021; 10: 3–15, DOI: 10.18698/0536-1044-2021-10-3-15. (in Russ.)
13. Beloutov G.S., Klockhov E.S. Combined method for calculating transients in transmissions. *Scientific and Technical Journal. Counter-terrorism technical devices..* Ser. 6. 1984; Issue 1 (113): 45–48. (in Russ.)
14. Algin V.B., Drobyshevskaya O.V., Sorochan V.M., Uspensky A.A. Schematization and dynamic analysis of mobile machine. variable-structure systems. *Mechanics of mobile cars*. Minsk, 2008: 16–24. (in Russ.)
15. Algin V.B. Dynamics of multibody systems of machines under changing states of frictional components and directions of power flows. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*. 2014; 4 (29): 21–32. (in Russ.)
16. Myasishchev D.G., Vashutkin A.S., Lorenz A.S. Reduction of Relaxation Oscillation Resonance of Wheel Brake Devices of Lumber Trucks. *Lesnoy zhurnal*. 2016; 4(352): 112–120. (in Russ.) DOI 10.17238/issn0536-1036.2016.4.112. EDN WJXSHF.
17. Zhileykin M.M., Sirotin P.V., Nosikov S.S., Pulyaev N.N. Method for detecting the loss of stability of the movement of tractors when towing a trailer or a coupled unit. *Tractors and agricultural machinery*. 2023; Vol. 90, No. 1: 39–48. (in Russ) DOI 10.17816/0321-4443-321266. EDN ZCQJYM.
18. Grabar I.G., Opanasyuk E.G., Begersky D.B., Opanasyuk O.E. Features of kinematics and dynamics of the multiwheel mover with dry soil interaction. *Visnik SevNTU*. 2011; 121: 139–142. (in Russ.) EDN UMX-AMR.
19. Ergin A.A., Kolomejtseva M.B., Kotiev G.O. Antiblocking control system of the brake drive of automobile wheel. *Pribery i Sistemy Upravleniya*. 2004; (9): 11–13.
20. Klimov A.V., Ospanbekov B.K., Kelle A.V., Shadrin S.S., Makarova D.A., Furletov Y.M. Research into the Particularities of the Individual Traction Drive Nonlinear System Oscillatory Processes. *World Electr. Veh. J.* 2023; 14: 316. <https://doi.org/10.3390/wevj14110316>
21. Klimov A.V. Oscillatory processes in a nonlinear system of an individual traction electric drive. *Truck*. 2023; 7: 19–24. DOI 10.36652/1684-1298-2023-7-19-24. EDN RXPWMI. (in Russ.)
22. Klimov A.V., Antonyan A.V. Research of features of oscillating process' behavior in the nonlinear system of individual traction drive of an electrobus. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2023; 17(1): 87–96. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-115233> (in Russ.)
23. Klimov A.V. Traction control system with function of suppression of wheels self-oscillation in traction mode. *Trudy NAMI*. 2023; (3): 44–56. (In Russ.) <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2023-3-44-56>
24. Klimov A.V. The observer of the slipping of the driving wheels with the function of suppressing self-oscillations in traction mode. *Transport systems*. 2023; 2(28): 17–29. (in Russ.) DOI 10.46960/2782-5477_2023_2_17. EDN HRSZDR.
25. Klimov A.V. Suppression of self-oscillations of the drive wheels in braking mode. *Truck*. 2023; 9: 6–14. DOI 10.36652/1684-1298-2023-9-6-14. EDN PUCDXP. (in Russ.)
26. Klepikov V.B. *Dynamics of electromechanical systems with nonlinear friction: monograph*. Publishing house: "The assistant of NTU "KHPI", 2014; 408. (In Russ.)
27. Shamberov V.N. Friction self-oscillations in mechanical system. *Journal of Instrument Engineering*. 2010; issue 53, No. 2: 24–28. (in Russ.)
28. Zhileykin M.M., Zhurkin M.M. Algorithm of anti-lock braking system with anti-skid function for two-axle cars with one driving axle. *Izvestiya MGTU «MAMI*. 2020; 1(43): 51–56. (in Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Климов Александр Владимирович – канд. техн. наук, руководитель службы электрифицированных автомобилей ООО «Инновационный центр КАМАЗ» (121205, г. Москва, Инновационный центр Сколково, Большой бульвар, 62, оф. С-203); доц. Перспективной инженерной школы электротранспорта Московского политехнического университета (107023, г. Москва, ул. Большая Семёновская, 38).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5351-3622>,

SPIN-код: 7637-3104,

e-mail: klimmanen@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Klimov Alexander V. – Cand. of Sci. (Eng), Head of the Electric Vehicles Service, KAMAZ Innovation Center (121205, Moscow, Skolkovo Innovation Center, 62 Bolshoi Boulevard St., office C-203); Associate Professor at the Prospective Engineering School of Electric Transport, Moscow Polytechnic University (107023, Moscow, 38 Bolshaya Semyonovskaya St.).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5351-3622>,

SPIN-code: 7637-3104,

e-mail: klimmanen@mail.ru

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Научная статья
УДК 625.712
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-932-947>
EDN: JHPSPG



РАСЧЕТНАЯ ВЛАЖНОСТЬ И ПОЛНАЯ ВЛАГОЕМКОСТЬ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

А.С. Александров ✉, Т.В. Семенова, Н.П. Александрова
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)
г. Омск, Россия
✉ ответственный автор
aleksandrov00@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Расчет дорожных одежд по критериям прочности выполняют для расчетного периода года, когда влажность грунтов достигает наибольших значений. Такая влажность называется расчетной и устанавливается путем определения наибольшего значения при заданной односторонней доверительной вероятности с учетом различных поправок на рельеф местности, конструкции земляного полотна и укрепления обочин. Казалось бы, сделано все правильно, но в ряде случаев расчетная влажность достигает больших значений, находящихся в пределах 80...90% от влажности на границе текучести. Такие значения расчетной влажности больше полной влагоемкости некоторых разновидностей грунтов. В этом случае нарушена физика процесса водонасыщения грунта.

Материалы и методы. Для вычисления полной влагоемкости использованы физические основы инженерной геологии, базирующиеся на трехфазной физической модели дисперсного грунта. В этой модели каждая из трех фаз (твердая, жидкая и газообразная) занимает определенный объем, а минеральные частицы и жидкость обладают массой и весом. На основе данной модели получены классические фундаментальные формулы, позволяющие определять любую физическую характеристику грунта. Для расчета полной влагоемкости применены данные фундаментальные зависимости. Расчет полной влагоемкости использован при построении линии нулевого содержания воздуха в грунте при его стандартном уплотнении. Показано, что полная влагоемкость, изображенная на этой линии, является наибольшей влажностью для грунта, уплотненного до данного состояния.

Результаты. Предложен способ вычисления полной влагоемкости грунта при различных коэффициентах уплотнения. В качестве минимально возможного коэффициента уплотнения принимается его величина в зимний период. Эта величина вычисляется с учетом поправки Ю.М. Васильева и А.С. Еремина, учитывающей разуплотнение грунта при замерзании воды. Полная влагоемкость грунта, вычисленная при минимальном коэффициенте уплотнения, представляет собой предельное значение, которое расчетная влажность превышать не может.

Заключение. Изложены представления авторов о физическом состоянии грунтов, согласно которым их расчетная влажность не может превышать полную влагоемкость при данной степени уплотнения. Поэтому величину расчетной влажности, выраженную в долях от влажности на границе текучести W_p / W_T , предлагается ограничить относительным значением полной влагоемкости W_{sat} / W_T .

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: расчетная влажность, полная влагоемкость, грунт, земляное полотно

Статья поступила в редакцию 18.11.2024; одобрена после рецензирования 05.12.2024; принята к публикации 16.12.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Александров А.С., Семенова Т.В., Александрова Н.П. Расчетная влажность и полная влагоемкость грунтов земляного полотна автомобильных дорог // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 932-947. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-932-947>

© Александров А.С., Семенова Т.В., Александрова Н.П., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-932-947>
EDN: JHPSPG

DESIGNED MOISTURE AND TOTAL MOISTURE CAPACITY OF SOILS OF THE EARTH BED OF MOTOR ROADS

Anatoly S. Aleksandrov ✉, Tatiana V. Semenova, Nataliya P. Aleksandrova
The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia
✉ corresponding author
aleksandrov00@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The calculation of road pavements according to strength criteria is performed for the design period of the year, when the soil moisture reaches its highest values. Such moisture is called design moisture and is established by determining the highest value at a given one-sided confidence probability, taking into account various corrections for the terrain, roadbed design and shoulder reinforcement. It would seem that everything is done correctly, but in some cases, the design moisture reaches high values, within 80...90% of the moisture at the fluidity limit. Such values of design moisture are greater than the full moisture capacity of some types of soil. In this case, the physics of the soil water saturation process is violated.

Materials and methods. To calculate the total moisture capacity, the physical principles of engineering geology are used, based on a three-phase physical model of dispersed soil. In this model, each of the three phases (solid, liquid and gaseous) occupies a certain volume, and mineral particles and liquid have mass and weight. Based on this model, classical fundamental formulas are obtained that allow determining any physical characteristic of the soil. These fundamental dependencies are used to calculate the total moisture capacity. The calculation of the total moisture capacity is used when constructing a line of zero air content in the soil with its standard compaction. It is shown that the total moisture capacity depicted on this line is the highest moisture content for soil compacted to this state.

Results. A method for calculating the total moisture capacity of the soil at different compaction coefficients is proposed. Its value in winter is taken as the minimum possible compaction coefficient, calculated taking into account the correction of Yu.M. Vasiliev and A.S. Eremin, which takes into account soil decompression during water freezing. The total moisture capacity of the soil, calculated with a minimum compaction coefficient, is a limit value that the calculated humidity cannot exceed.

Conclusion. The authors' ideas about the physical condition of soils are presented, according to which their calculated humidity cannot exceed the full moisture capacity at a given degree of compaction. Therefore, the value of the calculated humidity, expressed as a fraction of the humidity at the yield point W_p / W_T , is proposed to be limited to the relative value of the total moisture capacity W_{sut} / W_T .

KEYWORDS: calculated Moisture content, total moisture capacity, soil, roadbed

The article was submitted: 18.10.2024; approved after reviewing: 24.10.2024; accepted for publication: 16.12. 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. Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Aleksandrova N.P. Designed moisture and total moisture capacity of soils of the earthbed of motor roads. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): 932-947. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-932-947>

© Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Aleksandrova N.P., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Параметры прочности и деформируемости грунтов земляного полотна зависят от их влажности, поэтому при проектировании дорожных одежд влажность грунтов определяют по ПНСТ 542–2021¹ и ГОСТ Р 71404–2024² для расчетного периода года, вычисляя ее значение по формуле

$$W_p = (W_{\text{табл}} + \Delta + \Delta_1 W - \Delta_2 W) \cdot (1 + V_r \cdot t) - \Delta_3, \quad (1)$$

где $W_{\text{табл}}$ – среднее значение влажности грунта, выраженное в долях от влажности на границе текучести, регламентируемое таблицами стандартов РФ; Δ , $\Delta_1 W$, $\Delta_2 W$ и Δ_3 – поправки, регламентируемые стандартами РФ и учитывающие факторы, влияющие на процесс влагонакопления; V_r и t – параметры математической статистики, назначаемые в зависимости от принятой в расчете односторонней доверительной вероятности.

Из анализа формулы (1) следует, что стандарты России регламентируют вычисление расчетной влажности связных грунтов с применением правил математической статистики, учитывая физические аспекты процесса влагонакопления путем введения поправок (Δ , $\Delta_1 W$, $\Delta_2 W$ и Δ_3). Вследствие этого расчетная влажность может достигать больших значений. Так, приложения ГОСТ Р 71404–2024 содержат табличные функциональные зависимости модуля упругости, сцепления и угла внутреннего трения грунта от его влажности. Согласно этим таблицам, расчетная влажность W_p может достигать значений 0,90 и 0,95 от влажности на границе текучести W_L (ГОСТ Р 71404–2024, табл. В4 и В5).

Отметим, что для различных грунтов характерно разное соотношение полной влагоемкости $W_{\text{сут}}$ и влажности на границе текучести. Для одних грунтов характерно неравенство $W_{\text{сут}} \geq W_L$, благодаря чему относительная полная влагоемкость больше или равна единице ($W_{\text{сут}}/W_L \geq 1$). В этом случае применение зависимости (1) вполне обосновано, вследствие

чего решение (1) для таких грунтов можно считать однозначным. Тем не менее существуют разновидности уплотненных грунтов, для которых характерно иное неравенство $W_{\text{сут}} \leq W_L$. В этом случае относительная полная влагоемкость $W_{\text{сут}}/W_L$ будет меньше или равна единице. Тогда для разновидностей грунтов с относительной полной влагоемкостью $W_{\text{сут}}/W_L \leq 1$ применение зависимости (1) может приводить к физической ошибке, состоящей в том, что расчетная влажность, вычисленная по решению (1), превышает их полную влагоемкость. Причем для глинистых грунтов расчетная влажность грунта, вычисленная по формуле (1), превышает их полную влагоемкость при коэффициентах уплотнения 0,90 и выше. Для определения расчетной влажности наряду с ее вычислением по формуле (1) необходимо произвести расчет относительной полной влагоемкости. В этом случае расчетная влажность определяется как наименьшее из двух значений, вычисленных по формуле (1), и зависимости для определения относительной полной влагоемкости. При таком подходе физический смысл остается ненарушенным.

Сложность решения задачи о величине полной влагоемкости грунта состоит в том, что в процессе годового цикла грунты земляного полотна могут изменять объем. В данном случае плотность скелета и коэффициент уплотнения тоже изменяются. Механизм этих изменений лежит в деформациях морозного пучения, набухания и усадки грунтов. Деформации морозного пучения и набухания грунтов приводят как к появлению разрушений и деформаций на поверхности покрытия, так и к разуплотнению грунтов. В процессе разуплотнения грунта появляется дополнительная пористость, заполняемая водой. Негативное влияние процессов морозного пучения на транспортно-эксплуатационные показатели дорог многократно подтверждено специалистами дорожной отрасли [1, 2]. Для недопущения возникновения чрезмерных деформаций морозного пучения стандарты РФ регламентируют расчет дорожных одежд по критерию морозоустойчивости. Влияние деформаций морозного пучения на ров-

¹ ПНСТ 542–2021 (взамен ПНСТ 265–2018) (срок действия с 01.06.2021 г. до 01.06.2024 г.). Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 мая 2021 г. № 34-пнст. М.: Стандартинформ, 2021 // ИС «Техэксперт» / АО «Кодекс». Дата обновления: 11.11.2024.

² ГОСТ Р 71404–2024 (взамен ПНСТ 542–2021) (введен 01.09.2024 г.). Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 августа 2024 г. № 1022-ст. М.: Стандартинформ, 2024 // ИС «Техэксперт» / АО «Кодекс». Дата обновления: 11.11.2024.

ность проезжей части учитывается в научных работах настоящего столетия путем разработки новых методов расчета дорожной одежды [3, 4]. Но факт негативного влияния деформаций увеличения объема на плотность скелета грунта (плотность сухого грунта), а равно коэффициент уплотнения, как правило, остается «за кадром». При этом нужно отметить, что теоретические основы процесса накопления влаги в грунте учитываются специалистами, например, в виде уравнения водного баланса [5]. Физические характеристики грунтов, такие как пористость, коэффициент пористости, полная влагоемкость, относятся специалистами к интразональным факторам, подлежащим обязательному учету при дорожно-климатическом районировании [6]. Тем не менее, специалисты в области водно-теплого режима [6] приходят к выводу, что прогнозирование расчетной влажности грунта должно выполняться с применением методов математической статистики, позволяющих вычислять расчетное значение характеристики по выборке экспериментальных данных. В пользу статистического подхода говорят данные экспериментов по определению влажности в расчетный период года и ее изменению в течение года. Авторы работы³, проведя экспериментальные исследования влажности грунтов земляного полотна, установили, что она может значительно изменяться в зависимости от грунтово-гидрологических, погодно-климатических, географических и дорожных условий. Согласно данным этой работы, применительно к территории Волгоградской области, расчетная влажность глинистых грунтов земляного полотна изменяется в пределах 0,36...0,55, 0,38...0,60 и 0,39...0,62 от влажности на границе текучести соответственно при 1, 2 и 3 типе местности по условиям увлажнения. Очевидно, что наибольшие значения относительной влажности грунтов сопоставимы с их полной влагоемкостью при коэффициентах уплотнения 0,95 и выше, а наименьшие значения расчетной влажности не достигают величины полной влагоемкости.

Малые расчетные влажности могут быть обусловлены условиями увлажнения рабочего слоя, к которым относятся расстояние до источников увлажнения (грунтовые воды, воды в боковых канавах), количество осадков, глубина промерзания, рельеф местности, тип местности по условиям увлажнения и пр. факторы. Совокупность таких факторов приводит

к тому, что влажность грунта в расчетный период года не достигает значений полной влагоемкости. В этом случае практический интерес представляет сравнение низкой расчетной влажности с влажностью на пределе усадки (один из пределов Аттеберга). Если влажность грунта в расчетный период года окажется ниже этого предела, то деформации изменения объема грунта невозможны. Это означает полную устойчивость земляного полотна к деформациям пучения и набухания, а условия, приводящие к столь низкой влажности, необходимо изучать и искать способы их тиражирования на другие участки дорог с более высокой расчетной влажностью.

В работе [7] показана динамика изменения степени уплотнения глинистых грунтов по месяцам года, согласно которой наименьшее значение коэффициента уплотнения (чуть больше 0,92) приходится на февраль. В работах [7, 8] приведена динамика изменения влажности глинистых грунтов, в соответствии с которой наибольшая влажность характерна для периода оттаивания грунтов. Такое поведение грунтов объясняется их разуплотнением, происходящим в результате набухания и морозного пучения, с последующим обратным уплотнением, обусловленным усадкой и действием нагрузок, в периоды просыхания (уменьшения влажности). Суть этого процесса состоит в том, что повышение влажности грунтов в осенний расчетный период приводит к деформациям набухания и началу морозного пучения, которое продолжается зимой до промерзания грунтов на максимально возможную глубину. Деформации изменения объема неизбежны в том случае, если осенняя влажность этих грунтов превышает влажность на границе усадки. Образование дополнительной пористости от деформаций набухания и пучения приводит к уменьшению плотности сухого грунта и увеличению пористости, что обуславливает повышение полной влагоемкости. Разуплотнение грунтов подтверждено и данными георадиолокационных исследований [9, 10, 11]. Согласно работам А.М. Кулижникова, Р.А. Еремина и соавторов [9, 10, 11] при выполнении георадиолокационных исследований наблюдается увеличение амплитуды и снижение частоты отслеживаемого сигнала. Это свидетельствует о наличии в земляном сооружении зон разуплотненного грунта и зон повышенной влажности. В связи с таким поведением грунтов земляного

³ Алексиков С.В., Алексиков И.С., Симончук Д.Н. Проектирование оптимальных дорожных одежд: учебное пособие. Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ. 2015. 118 с.

полотна в научных работах расчетную влажность грунта вычисляют с учетом деформаций морозного пучения [12, 13].

Таким образом, выполненный нами обзор показывает, что влажность грунта земляного полотна не может превышать полную влагоемкость, обусловленную его пористостью. Но уменьшение степени уплотнения грунта приводит к увеличению пористости и полной влагоемкости, а значит, возможному повышению расчетной влажности. Отсюда следует необходимость ограничения расчетной влажности грунта величиной, соответствующей их полной влагоемкости, достигаемой с учетом сезонного разуплотнения грунта в результате морозного пучения зимой и набухания глинистых грунтов в расчетные периоды года. Поэтому целью нашей работы является определение полной влагоемкости грунта при различном его состоянии по степени уплотнения, для ограничения расчетной влажности, вычисляемой по статистической зависимости (1). Решение этой задачи состоит в применении физических основ инженерной геологии, позволяющих рассчитывать полную влагоемкость через другие характеристики физического состояния.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вывод формул, предназначенных для вычисления параметров физических свойств дисперсных грунтов, базируется на известной расчетной трехфазной модели, представляющей некоторую абстракцию реального строения грунта. Эта классическая модель приведена на рисунке 1, на котором схематично показано реальное строение дисперсного грунта.

В дисперсном грунте между минеральными частицами расположены поры, в которых находятся воздух (смесь газов) и жидкость (рисунок 1, а). В этом случае три фазы перемешаны. Поэтому в целях теоретического анализа применяют упрощенную модель фазового состава, в которой каждая из трех фаз занимает определенный объем (V_s , V_w , V_g), а твердые частицы и жидкость характеризуются весом (G_s и G_w соответственно), как показано на рисунке 1, б. Данная физическая модель позволяет определить любой из показателей физических свойств, она является традиционной и приводится в учебной литературе⁴.

Модель трехфазного строения дисперсного грунта имеет два частных случая. Первый ха-

рактеризуется нулевым содержанием воздуха в порах (рисунок 1, в), когда все поровое пространство заполнено жидкой фазой, а максимально возможная влажность грунта w равна его полной влагоемкости W_{sat} . Второй частный случай, наоборот, характеризуется нулевым содержанием жидкой фазы, когда в порах находится только воздух, вследствие чего вес всего объема грунта обусловлен только весом твердых частиц.

Для вывода формул, позволяющих вычислять плотности грунта ρ , скелета грунта ρ_d и минеральной части ρ_s , нужно составить выражения для определения объемного веса грунта γ , скелета грунта γ_d и минеральной части γ_s . Воспользовавшись обозначениями, показанными на рисунке 1, б, объемный вес грунта, скелета грунта и минеральной части находят по формулам:

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{G}{V} = \frac{G_s + G_w}{V_s + V_w + V_g} = \rho \cdot g; \\ \gamma_d &= \frac{G_s}{V} = \frac{G_s}{V_s + V_w + V_g} = \rho_d \cdot g; \\ \gamma_s &= \frac{G_s}{V_s} = \rho_s \cdot g,\end{aligned}\quad (2)$$

где g – ускорение силы тяжести, м/с^2 .

При дальнейшем анализе приходят к выводу, что каждая из плотностей ρ , ρ_d и ρ_s вычисляется отношением соответствующей массы и соответствующего объема, то есть по формулам:

$$\rho = \frac{m}{V}; \quad \rho_d = \frac{m - m_w}{V} = \frac{m_d}{V}; \quad \rho_s = \frac{m_s}{V_s}. \quad (3)$$

Выполняя аналогичные рассуждения, можно прийти к выводу, что влажность грунта находится по формулам:

$$w = \frac{G_w}{G - G_s} = \frac{G - G_s}{G_s} = \frac{G_w}{G_s}; \quad w = \frac{\gamma - \gamma_d}{\gamma_d}. \quad (4)$$

В последней формуле (4) вес грунта можно определить произведением соответствующей плотности и ускорения силы тяжести. Тогда несложно прийти к классическим зависимостям, связывающим влажность с плотностью грунта и плотностью скелета грунта. Эти формулы имеют вид:

⁴ Цытович Н.А. Механика грунтов: учебное пособие. М.: Госстройиздат, 1963. 636 с.

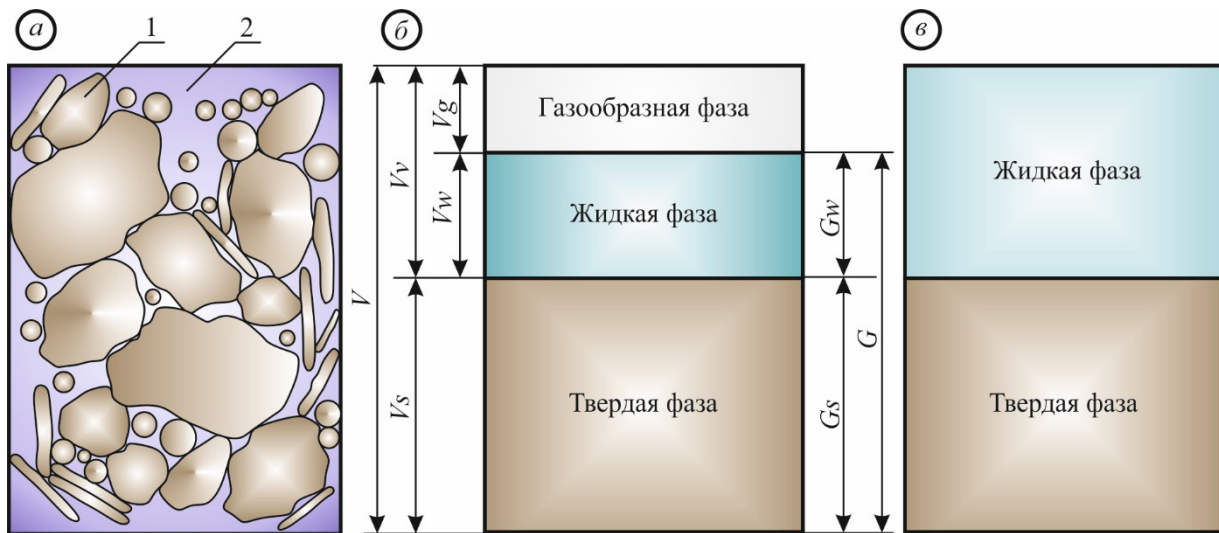


Рисунок 1 – Традиционные представления о фазовом составе дисперсного грунта:
 а – реальное строение;
 б – упрощенная модель трехфазного строения;
 в – модель, иллюстрирующая частный случай, характеризующий нулевое содержание воздуха в порах [14, 15].

Figure 1 – Traditional ideas about the phase composition of dispersed soil:
 а – the real structure;
 б – a simplified model of a three-phase structure;
 в – a model illustrating a special case characterizing zero air content in the pores [14, 15].

$$w = \frac{\rho}{\rho_d} - 1; \quad \rho = \rho_d \cdot (1 + w); \quad \rho_d = \frac{\rho}{1 + w}. \quad (5)$$

Формулы (5) позволяют рассчитывать один параметр физических свойств через два других известных параметра. Последняя формула (5) применяется для вычисления плотности сухого грунта по методу, регламентированному ГОСТ 5180–2015⁵. Аналогичным образом получены классические формулы, применяемые для расчета пористости n , коэффициента пористости e . Эти формулы имеют вид:

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}; \quad n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}. \quad (6)$$

$$e = 1 - \frac{\gamma_s}{\gamma_d}; \quad e = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_d}. \quad (7)$$

Для расчета плотности скелета грунта, применяемой в формулах (6) и (7), можно использовать последнюю из формул (5). Тогда пористость и коэффициент пористости определяются не через два, а через три известных параметра физических свойств. Выполнив различные преобразования в формулах (5), (6), (7), специалисты получили расчетный способ определения любой физической характеристики грунта через другие известные физические характеристики (обычно через две или три). Формулы, применяемые в расчетном способе, даны в таблице 1.

⁵ ГОСТ 5180–2015 (взамен ГОСТ 5180–84) (введен 01.04.2016 г.). Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 3 ноября 2015 г. № 1694-ст. М.: Стандартинформ, 2016 // ИС «Техэксперт» / АО «Кодекс». Дата обновления: 11.11.2024.

Таблица 1
Формулы для расчета физических характеристик дисперсных грунтов [14, 15]

Table 1
Formulas for calculating the physical characteristics of soils [14, 15]

Показатель	ρ	ρ_d	ρ_s	n	e	w
ρ	ρ	$\rho_d \cdot (1 + w)$	$\rho_s \cdot (1 - n) \cdot (1 + w)$	$\rho_s \cdot (1 - n) \cdot (1 + w)$	$\frac{\rho_s \cdot (1 + w)}{1 + e}$	$\rho_d \cdot (1 + w)$
ρ_d	$\frac{\rho}{1 + w}$	ρ_d	$\rho_s \cdot (1 - n)$	$\rho_s \cdot (1 - n)$	$\frac{\rho_s}{1 + e}$	$\rho \cdot (1 + w)$
ρ_s	$\frac{\rho}{(1 - n) \cdot (1 + w)}$	$\frac{\rho_d}{(1 - n)}$	ρ_s	$\frac{\rho_d}{(1 - n)}$	$\rho_d \cdot (1 + e)$	$\frac{\rho}{(1 - n) \cdot (1 + w)}$
n	$1 - \frac{\rho}{\rho_s \cdot (1 + w)}$	$1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}$	$1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}$	n	$\frac{e}{1 + e}$	$1 - \frac{\rho}{\rho_s \cdot (1 + w)}$
e	$\frac{\rho_s \cdot (1 + w)}{\rho}$	$\frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$	$\frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$	$\frac{n}{1 - n}$	e	$\frac{\rho_s \cdot (1 + w)}{\rho} - 1$
w	$\frac{\rho}{\rho_d} - 1$	$\frac{\rho}{\rho_d} - 1$	$\frac{\rho}{\rho_s \cdot (1 - n)} - 1$	$\frac{\rho}{\rho_s \cdot (1 - n)} - 1$	$\frac{\rho \cdot (1 + e)}{\rho_s} - 1$	w

Заметим, что данные таблицы 1 можно дополнить формулами, позволяющими определять полную влагоемкость грунта W_{sut} . В этом случае полную влагоемкость можно вычислять через различные показатели физических свойств. Такой подход позволяет привести ряд альтернативных зависимостей, включающих в себя разные физические параметры, приводящих к одному и тому же результату расчета. В настоящей работе мы стремимся к применению только одной зависимости для расчета полной влагоемкости. Данную зависимость можно получить из анализа метода построения линии нулевого содержания воздуха, регламентируемого ГОСТ 22733–2016⁶.

В соответствии с требованиями ГОСТ 22733–2016 для проверки правильности проведенного испытания необходимо построить линию нулевого содержания воздуха. Построение такой линии выполняют путем вычисления наибольшего значения плотности сухого грунта ρ_d , которая была бы достигнута

при условии полного насыщения образца водой. Этот расчет производят по формуле

$$\rho_d = \frac{\rho_s}{1 + 0,01 \cdot w \cdot \frac{\rho_s}{\rho_w}}, \quad (8)$$

где ρ_s и ρ_w – соответственно плотности частиц грунта и воды, г/см³; w – влажность грунта в каждом конкретном опыте по определению максимальной плотности, но принимаемая в данном расчете за полную влагоемкость грунта, %.

Уравнение (8) можно решить относительно влажности w , которая в данном случае характеризует полную влагоемкость грунта W_{sut} . Выполнив необходимые преобразования, получим

$$W_{sut} = 100 \cdot \frac{\rho_w}{\rho_s} \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \right), \quad (9)$$

⁶ ГОСТ 22733–2016 (взамен ГОСТ 22733–2002) (введен 01.01.2017 г.). Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 июля 2016 г. № 891-ст. М.: Стандартинформ, 2019 // ИС «Техэксперт» / АО «Кодекс». Дата обновления: 11.11.2024.

где ρ_d – плотность сухого грунта, полученная в каждом конкретном опыте при определении максимальной плотности.

Расчет по формуле (9) является аналогом расчета по формуле (8), но имеет иную структуру. Поясняя разницу двух аналогичных расчетов, укажем, что:

– в результате расчета по формуле (8) вычисляется наибольшее значение плотности сухого грунта при условии отсутствия в его порах воздуха. В этом случае мы полагаем, что применяемая в расчете влажность грунта w является его полной влагоемкостью W_{sat} ;

– расчеты по зависимости (9) основаны на подстановке в эту формулу опытных значений плотности сухого грунта ρ_d , полученных при определении ее максимального стандартного

значения. В этом случае вычисляем значение полной влагоемкости W_{sat} при конкретной величине плотности сухого грунта.

В качестве примера рассмотрим данные по испытанию суглинка тяжелого пылеватого, отобранного в грунтовом карьере, расположенном в Любинском муниципальном районе Омской области (д. Тарлык). Показатели физических свойств этого грунта определены в соответствии с требованиями стандартов РФ, а их значения указаны в таблице 2.

В таблице 3 приведены результаты экспериментального определения максимальной стандартной плотности и результаты расчета плотности сухого грунта и полной влагоемкости по формулам (8) и (9).

Таблица 2

Показатели физических свойств суглинка тяжелого пылеватого

Источник: составлено по результатам лаборатории кафедры «Строительство и эксплуатация дорог».

Table 2

Indicators of the physical properties of heavy powdery loam

Source: compiled according to the results of the laboratory of the Department of Road Construction and Operation.

Наименование показателя	Единицы измерения	Величина
Естественная влажность	%	19,9
Плотность частиц грунта	г/см ³	2,68
Максимальная плотность сухого грунта	г/см ³	1,69
Оптимальная влажность	%	18,3
Влажность на границе текучести	%	36,6
Влажность на границе раскатывания	%	19,5
Число пластичности	%	16,8
Показатель консистенции	д.е	0,03
Содержание песчаных частиц размером 2–0,05 мм	%	26

Таблица 3

Результаты определения максимальной плотности и вычисления параметров линии нулевого содержания воздуха

Источник: составлено по результатам лаборатории кафедры «Строительство и эксплуатация дорог».

Table 3

The results of determining the maximum density and calculating the parameters of the zero air content line

Source: compiled according to the results of the laboratory of the Department of Road Construction and Operation.

Данные для построения кривой стандартного уплотнения и линии нулевого содержания воздуха		Опытные данные и результаты расчета						
Кривая стандартного уплотнения	Влажность, %	12,8	14,9	16,7	18,6	20,9	22,9	24,4
	Плотность сухого грунта, г/см ³	1,52	1,59	1,65	1,69	1,67	1,62	1,58
Линия НСВ расчет по формуле (2)	Влажность, %	–	–	–	18,6	20,9	22,9	24,4
	Плотность сухого грунта, г/см ³	–	–	–	1,79	1,72	1,66	1,62
Линия НСВ расчет по формуле (3)	Плотность сухого грунта, г/см ³	1,52	1,59	1,65	1,69	1,67	1,62	1,58
	Полная влагоемкость, %	28,5	25,6	23,3	21,9	22,6	24,4	26,0

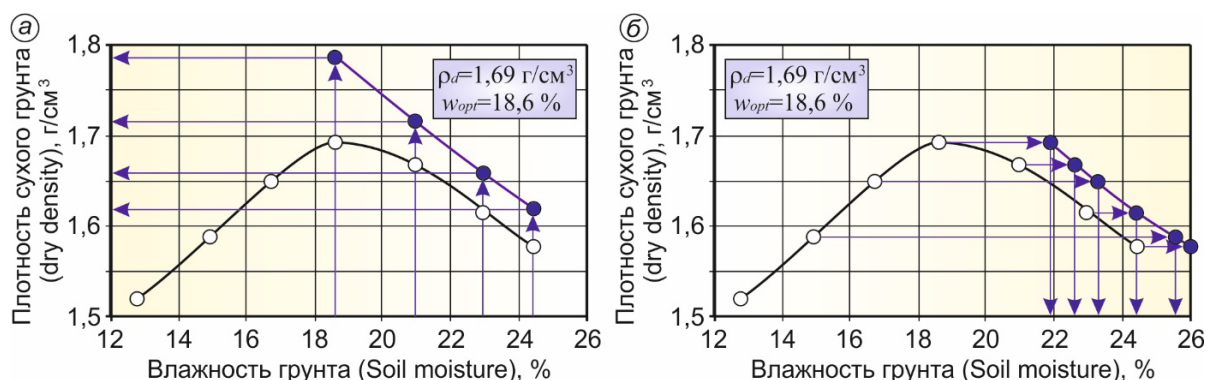


Рисунок 2 – Кривая стандартного уплотнения и линии нулевого содержания воздуха, построенные по данным расчетов по формулам (8) и (9): а – расчет по формуле (8); б – расчет по формуле (9)

Источник: составлено авторами согласно требованиям ГОСТ 22733 и данным расчета по формуле (9).

Figure 2 – The curve of the standard seal and the lines of zero air content, constructed according to the calculations according to formulas (8) and (9): а – calculation according to formula (8); б – calculation according to formula (9)

Source: compiled by the authors, according to the requirements of GOST 22733 and calculation data according to the formula (9).

Таблица 4
Зависимость полной влагоемкости от коэффициента уплотнения грунта (суглинка тяжелого, пылеватого)
Источник: составлено авторами.

Table 4
Dependence of the total moisture capacity on the soil compaction coefficient
Source: compiled by the authors.

Наименование характеристики		Величина характеристики						
Плотность сухого грунта ρ_d , г/см ³		1,52	1,58	1,59	1,62	1,65	1,67	1,69
Коэффициент уплотнения k_v		0,90	0,93	0,94	0,96	0,98	0,99	1,0
Полная влагоемкость W_{sut}	%	28,5	26,0	25,6	24,4	23,3	22,6	21,9
	доли от W_L	0,78	0,71	0,70	0,67	0,64	0,62	0,60

Разницу в построении линии нулевого содержания воздуха при расчете ее параметров по формулам (8) или (9) можно продемонстрировать графически, используя данные таблицы 3. На рисунке 2 представлены кривая стандартного уплотнения и линии нулевого содержания воздуха, построенные по данным таблицы 3.

Из анализа данных рисунка 2 следует, что в случае стандартного построения линии нулевого содержания воздуха, основанного на вычислении плотности сухого грунта по формуле (8), эта линия располагается выше кривой стандартного уплотнения. В таком слу-

чае плотность сухого грунта, вычисленная по формуле (8), должна быть больше экспериментальных значений плотности скелета, установленных при той же влажности. При применении формулы (9) линия нулевого содержания воздуха расположена правее кривой стандартного уплотнения, поэтому значения полной влагоемкости грунта, вычисленные по формуле (9), должны быть больше влажностей, установленных в опыте по стандартному уплотнению.

Для практики интересен анализ рисунка 2, б, на котором приведены значения полной влагоемкости грунта при различных, но кон-

кретных (строго определенных) физических состояниях грунта по плотности скелета, а равно и пористости. В рамках этого анализа определим коэффициенты уплотнения грунта (делим плотность сухого грунта на максимальную плотность) и соответствующие им значения полной влагоемкости, выраженной в долях от границы текучести. Результаты расчета представлены в таблице 4 в порядке возрастания коэффициента уплотнения.

Из анализа данных таблицы 4 следует, что:

- при величине коэффициента уплотнения грунта рабочего слоя, находящейся в пределах 0,98...1,0, величина полной влагоемкости, выраженная в долях от влажности на границе текучести, варьируется в пределах 0,64...0,60. Следовательно, грунты рабочего слоя насыпей, отсыпанных из данного грунта и уплотненные до величины коэффициента уплотнения 0,98, не могут иметь расчетную влажность, превышающую значение 0,64 от границы текучести;

- при коэффициенте уплотнения 0,90 относительная полная влагоемкость W_{sut}/W_L суглинка тяжелого пылеватого не превышает значение 0,78. Согласно СП 34.13330.2021⁷ коэффициент уплотнения грунта 0,9 соответствует требуемому значению этого параметра, регламентируемому для рабочего слоя выемок, построенных в IV и V ДКЗ. Причем требуемая величина коэффициента уплотнения, равная 0,9, является наименьшим значением из всех аналогичных характеристик, регламентируемых СП 34.13330.2021 для других грунтовых сооружений, устраиваемых в различных ДКЗ. Следовательно, расчетная влажность суглинка тяжелого пылеватого не может превышать величину 0,78 от влажности на границе текучести.

Отсюда следует вывод о необходимости пересмотра методики вычисления расчетной влажности, регламентируемой стандартами по расчету дорожных одежд.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Формулу (9) можно применить для расчета полной влагоемкости грунта при различной степени его уплотнения. Для этого в зависимо-

сти (9) плотность сухого грунта нужно представить произведением коэффициента уплотнения k_y и максимальной стандартной плотности ρ_{max} . Тогда формула (9) примет вид:

$$W_{sut} = 100 \cdot \frac{\rho_w}{\rho_s} \cdot \left(\frac{\rho_s}{k_y \cdot \rho_{max}} - 1 \right). \quad (10)$$

Для применения зависимости (10) в практических инженерных расчетах нужно определить величину коэффициента уплотнения грунта k_y в расчетный период года. Для этого определяется уменьшение коэффициента уплотнения, происходящее за счет деформаций увеличения объема, приводящего к повышению пористости грунта. Точное решение этой задачи требует выполнения экспериментов с последующим анализом опытных данных об изменении коэффициентов уплотнения грунта на протяжении года. Такие эксперименты необходимо произвести для различных грунтов, в разных регионах, при различных конструкциях земляного полотна, укрепления обочин и многих других факторах. Таким образом, точное решение требует огромного количества экспериментов, поэтому такое решение невозможно. Тем не менее специалисты старшего поколения предпринимали попытки решения аналогичной задачи. Благодаря таким работам, мы можем найти приближение, точность которого достаточна для инженерных расчетов. Воспользуемся обобщением Ю.М. Васильева и А.С. Еремина, сделанным ими при разработке ВСН 55–69⁸. Авторы ВСН 55–59 пишут: «В зимних условиях, ввиду разуплотнения грунта при замерзании, коэффициент уплотнения K , который определяется на основе испытания образцов мерзлого грунта, отбираемых из уплотненных слоев насыпи, принимают равным»:

$$K = K_{факт} + \beta, \quad (11)$$

где $K_{факт}$ – фактический коэффициент уплотнения, установленный на образцах мерзлого грунта; β – величина поправки, равная для связных грунтов 0,03–0,04, для несвязных – 0,01–0,02.

⁷ СП 34.13330.2021 (введен 10.08.2021 г.). Автомобильные дороги. Актуализированная редакция «СНиП 2.05.02–85* Автомобильные дороги»: утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 9 февраля 2021 г. № 53/пр. М.: Стандартинформ, 2021 // ИС «Техэксперт» / АО «Кодекс». Дата обновления: 11.11.2024.

⁸ ВСН 55–69. Инструкция по определению требуемой плотности и контролю за уплотнением земляного полотна автомобильных дорог. М.: Оргтрансстрой, 1969.

Из анализа формулы (11) следует, что испытания мерзлого грунта, выполненные при зимнем строительстве, приводят к пониженному значению коэффициента уплотнения $K_{\text{факт}}$. Но после оттаивания и процесса высыхания грунта, сопровождающего его усадкой, коэффициент уплотнения возрастает на величину поправки β . Нам же необходимо решить обратную задачу, состоящую в определении величины уменьшения коэффициента уплотнения. Тогда по аналогии с формулой (6) можно предположить, что при зимнем разуплотнении грунта коэффициент уплотнения уменьшается на ту же величину β , но от требуемого своего значения $k_{y(\text{тр})}$. Тогда коэффициент уплотнения зимой можно вычислить по формуле

$$K_{\text{факт}} = k_{y(\text{тр})} - \beta. \quad (12)$$

Окончательное решение получаем заменой в формуле (9) величины k_y на разность, расположенную в правой части зависимости (12). Тогда имеем

$$W_{\text{сут}} = 100 \cdot \frac{\rho_w}{\rho_s} \cdot \left[\frac{\rho_s}{(k_{y(\text{тр})} - \beta) \cdot \rho_{\text{max}}} - 1 \right]. \quad (13)$$

Формула (13) позволяет вычислить полную влагоемкость, выраженную в процентах. Для определения относительной влагоемкости обе части уравнения (13) нужно разделить на влажность на границе текучести, выраженную в %. Тогда получим

$$\frac{W_{\text{сут}}}{W_L} = \frac{100}{W_L} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_s} \cdot \left[\frac{\rho_s}{(k_{y(\text{тр})} - \beta) \cdot \rho_{\text{max}}} - 1 \right]. \quad (14)$$

Зависимость (14) содержит физические характеристики грунта (W_L , ρ_s , ρ_{max}), которые определяются по ГОСТ 5180–2015. Определение этих физических характеристик не составляет какой-либо сложности для специалистов дорожной грунтовой лаборатории. Требуемая величина коэффициента уплотнения $k_{y(\text{тр})}$ устанавливается по требованиям СП 34.13330.2021.

Таким образом, наше предложение сводится к определению расчетной влажности грунта земляного полотна по результатам расчета относительной влажности по двум формулам (1) и (14). Порядок расчета может быть следующим:

1. Вычисление расчетной влажности, выраженной в долях от влажности на границе текучести, по формуле (1). В этом случае учитываются особенности рельефа местности, конструкций земляного полотна и обочин, а также тип местности по условиям увлажнения.

2. Вычисление относительной полной влагоемкости по формуле (14). Этим расчетом определяется максимально возможная влажность грунта, выраженная в долях от влажности на границе текучести, которую может вместить грунт с данным физическим состоянием по степени уплотнения. Расчет выполняется с допущением некоторого разуплотнения грунта в зимний период, обусловленный замерзанием воды, накопившейся в грунте в период осенней распутицы.

3. В качестве расчетной влажности принимается наименьшее значение из вычисленных по формулам (1) и (14). По принятому значению расчетной влажности устанавливаются параметры прочности и деформируемости грунта, применяемые в расчете дорожной одежды.

Для иллюстрации зависимости полной влагоемкости грунта от коэффициента уплотнения и его снижения зимой по формулам (13) и (14) выполнены расчеты. Результаты этих расчетов приведены на рисунке 3.

Из анализа данных рисунка 3 следует, что абсолютное и относительное значение полной влагоемкости увеличивается при уменьшении коэффициента сцепления. Так как требования к величине коэффициента уплотнения, регламентируемые СП 34.13330.2021, зависят от ряда условий, то могут возникать два случая. Например, в верхней части рабочего слоя насыпи, ограниченной снизу расстоянием 1,5 м от поверхности покрытия, требуемая величина коэффициента уплотнения наибольшая. В этом случае даже с учетом уменьшения коэффициента уплотнения в зимний период полная влагоемкость грунта в период его оттаивания будет наименьшей. Тогда возможен случай, при котором имеет место превышение расчетной влажности, вычисленной по зависимости (1), относительной полной влагоемкости, рассчитанной по выражению (9). Значит, в данном случае расчетную влажность необходимо принять равной относительной полной влагоемкости, то есть в этом случае расчет по формуле (9) является определяющим. Для участков земляного полотна, проложенных в выемке, требуемый коэффициент уплотнения будет наименьшим.

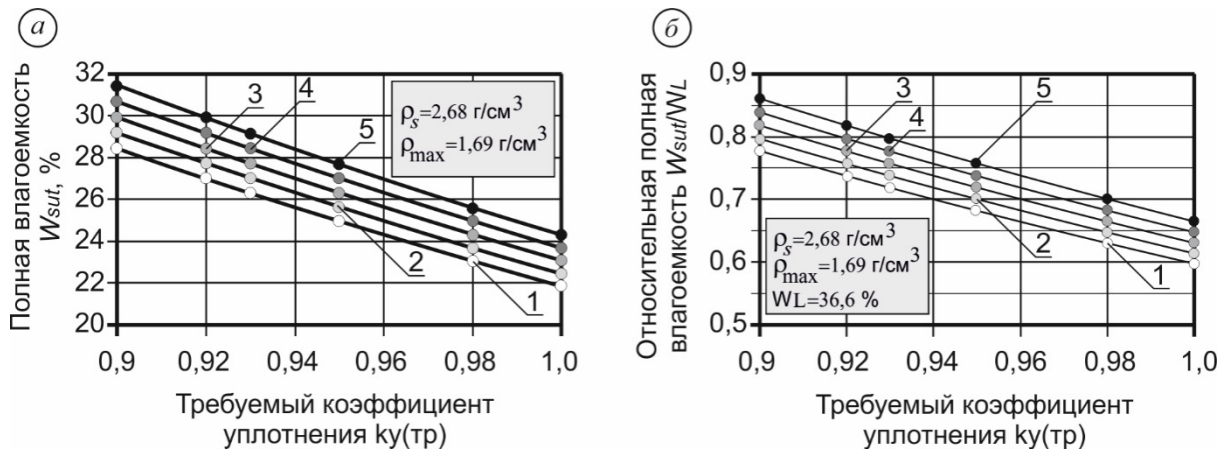


Рисунок 3 – Зависимость абсолютной и относительной полной влагоемкости от коэффициента уплотнения:

а – расчет по формуле (12);

б – расчет по формуле (13);

1–5 – при поправке на зимнее разуплотнение грунтов β , равной 0; 0,01; 0,02; 0,03 и 0,04 соответственно

Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Dependence of absolute and relative total moisture capacity on the compaction coefficient:

a – calculation according to formula (12);

b – calculation according to formula (13);

1-5 – when adjusted for winter decompression of soils β equal to 0; 0,01; 0,02; 0,03 and 0,04 respectively

Source: compiled by the authors.

Тогда с учетом поправки на зимнее разуплотнение грунтов полная влагоемкость в весенний расчетный период будет достаточно велика. В этом случае результат расчета по формуле (9) может иметь более высокое значение, чем расчетная влажность, вычисленная по зависимости (1). Значит, в этом случае определяющим будет расчет по формуле (1).

Кроме того, на выбор определяющего расчета существенное влияние оказывает влажность на границе текучести. Этот предел А. Аттеберга имеет высокие значения для суглинков тяжелых и глин, вследствие чего относительная полная влагоемкость, рассчитанная по выражению (9), как правило, будет меньше расчетной влажности, найденной по формуле (1). Поэтому расчет по формуле (9) с большой вероятностью оказывается определяющим для суглинков тяжелых и глин. Супеси характеризуются сравнительно малой величиной влажности на границе текучести. Вследствие этого с большой вероятностью определяющим

расчетом будет вычисление расчетной влажности по формуле (1). Суглинки легкие обладают средними значениями влажности на границе текучести. Поэтому для суглинков легких сложно делать предположение о решающем значении формулы (1) или выражения (9) для определения расчетной влажности.

Предлагаемый способ определения расчетной влажности можно применять для определения параметров прочности и деформируемости грунтов (сцепления, угла внутреннего трения, модуля упругости и модуля деформации [16, 17, 18, 19]. Установленные механические параметры грунтов используются для расчета дорожных одежд как по нормативной методике, так и по модифицированным расчетам, к которым относятся методы, предложенные авторами [20, 21]. Таким образом, уточнение расчетной влажности грунта позволит повысить достоверность общепринятых и новых методов расчета дорожных одежд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В завершение статьи можно сделать заключение в виде выводов:

1. Предложен модифицированный способ вычисления расчетной влажности грунта рабочего слоя земляного полотна. Согласно этому способу нужно определить как расчетную влажность, так и относительную полную влагоемкость, значение которой выражено в долях от влажности на границе текучести. Расчетная влажность вычисляется по известной зависимости, регламентируемой ГОСТ Р 71404–2024. Формула для расчета относительного значения полной влагоемкости получена обратным решением зависимости, регламентируемой ГОСТ 22733–2016, для построения нулевого содержания воздуха. В это обратное решение введена поправка Ю.М. Васильева и А.С. Еремина, позволяющая учитывать разуплотнение грунта в зимний период, обусловленное замерзанием воды. Благодаря такой поправке учитывается, что в весенний расчетный период года, сопровождаемый оттаиванием, коэффициент уплотнения грунта меньше требуемого значения на величину этой поправки. После вычисления расчетной влажности и относительной полной влагоемкости их значения сравнивают. В качестве расчетной влажности выбирают наименьшее из этих двух величин.

2. Таким образом, выбор расчетной влажности основан на двух расчетах, один из которых является определяющим. С большой долей вероятности можно предполагать, что для суглинков тяжелых и глин определяющим расчетную влажность является расчет относительной полной влагоемкости. Это объясняется тем, что влажность на границе текучести таких грунтов имеет высокие значения. Поэтому относительная полная влагоемкость имеет сравнительно небольшие значения при требуемом коэффициенте уплотнения 0,95 и выше. Так как полная влагоемкость не может быть превышена, то расчетную влажность необходимо принимать равной относительной полной влагоемкости. Для супесей, наоборот, определяющим расчетом будет вычисление расчетной влажности по ГОСТ Р 71404–2024. Это объясняется невысокими значениями влажности на границе текучести. Поэтому полная влагоемкость супесей, как правило, больше влажности на границе текучести. В этом случае относительная полная влагоемкость будет больше единицы и больше, чем расчетная влажность, рассчитанная по ГОСТ Р 71404–2024.

3. Использование нашего предложения позволит избежать случаев, при которых расчетная влажность превышает полную влагоемкость, что противоречит физическим основам инженерной геологии. В связи с чем применение предложенного расчета или его аналогов следует считать обязательным при определении расчетной влажности. В противном случае вероятна физическая ошибка.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Churilin V.S., Matvienko O.V., Efimenko V.N., Efimenko S.V. Regression models of irregular vertical displacement of a roadway cross section caused by frost heaving. *Magazine of Civil Engineering*. 2023. 120 (4). Article no. 12009. DOI: 10.34910/MCE.120.9.
2. Чурилин В.С., Ефименко С.В., Ефименко В.Н., Сухоруков А.В., Дроздов Ю.В. Стандартизация расчётных характеристик глинистых грунтов Томской области для обеспечения качества проектирования автомобильных дорог // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2020. № 22(6). С.177–187. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-6-177-187>.
3. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Чурилин В.С. Моделирование напряжений и деформаций дорожных покрытий // *Дороги и мосты*. 2016. Т 36, № 2. С. 139–153.
4. Churilin, V., Efimenko S., Matvienko O., Bazuev V. Simulation of stresses in asphalt-concrete pavement with frost heaving // *Matec web of conferences*. 2018. Vol. 216. 01011 DOI:10.1051/mateconf/201821601011.
5. Ефименко В.Н., Ефименко С.В., Каримов Э.М., Мамажакыпова Г.Т. Прикладное значение спутниковой модели ТМРА при установлении нормы годового количества атмосферных осадков по дорожно-климатическим зонам на территории Юго-Западного Кыргызстана // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2021. Т. 23, № 4. С. 147–158. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-4-147-158.
6. Ефименко В.Н., Ефименко С.В., Баширова И.А. Особенности формирования информационного банка данных для уточнения границ дорожно-климатических подзон на территории ЯНАО // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2022. Т. 24, № 6. С. 150–159. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-6-150-159.
7. Афиногенов О.П., Шаламанов В.А., Серякова А.А. Обеспечение качества земляного полотна автомобильных дорог на основе принципов регионального районирования // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2014. Вып. 103. № 4. С. 106–110.
8. Конорев А.С., Мирончук С.А., Думенко В.А., Александрова А.И. Прогнозирование периода весеннего оттаивания грунта земляного полотна автомобильных дорог // *Дороги и Мосты*. 2022. Вып. 48. № 2. С. 43–58.

9. Еремин Р.А., Пудова Н.Г., Романов Д.Б. Пространственный анализ георадарных данных // Дороги и Мосты. 2023. Вып. 49. № 1. С. 145–157.

10. Еремин Р.А., Кулижников А.М. Опыт комплексных обследований дорожных одежд георадами и установками ударного нагружения // Дороги и Мосты. 2021. Вып. 46. № 2. С. 100–124.

11. Кулижников А.М., Еремин Р.А., Пудова Н.Г., Зверев Е.О. Методические подходы к обнаружению ослабленных зон в дорожной одежде по динамическим и кинематическим признакам // Дороги и Мосты. 2022. Вып. 48. № 2. С. 82–97.

12. Киялбаев А.К., Алимгазин Б.Т., Абдыгаппаров К. Примеры определения расчётной влажности грунта в теле земляного полотна в условиях засушливого климата // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2016. Вып. 52. № 2. С. 31–38.

13. Киялбаев А.К., Сагыбекова А.О., Юн Д.С. О расчётной влажности грунта в рабочем слое земляного полотна: примеры расчета // Достижения науки и образования. 2018. Вып. 28. № 6. С. 8–11.

14. Craig R.F. Soil Mechanics. Seventh edition // Department of Civil Engineering, University of Dundee, UK. Published by Taylor & Francis e-Library, London and New York. 2004. 447 p.

15. Das B.M. Advanced soil mechanics // Third Edition. New York, Taylor & Francis. 2008. 567 p.

16. Алексиков И.С., Курдюкова Л.Е., Алексиков С.В. Прогнозирование физико-механических свойств грунтов земляного полотна // Вестник ВолГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. 2008. Вып. 12. С. 51–53.

17. Горячев М.Г. Оценка ожидаемых значений модулей упругости глинистых грунтов при строительстве земляного полотна автомобильных дорог // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2020. № 2 (24). С. 1–14.

18. Каленова Е.В., Горячев М.Г., Лугов С.В., Яркин С.В. Обеспечение требуемой прочности рабочей зоны земляного полотна при проектировании и строительстве дорожных одежд // Наука и техника в дорожной отрасли. 2021. № 2(96). С. 13–15.

19. Ушаков В.В., Горячев М.Г., Кудрявцев А.Н. Учет природно-климатических условий эксплуатации автомобильных дорог для проектирования дорожных одежд // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2022. № 3(70). С. 68–73.

20. Александров А.С., Семенова Т.В. Совершенствование критерия Мора – Кулона для расчета дорожных одежд дорог с низкой интенсивностью движения // Вестник СибАДИ. 2024. № 21(5). С. 756–769. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-756-769>.

21. Александров А.С. Трехпараметрический критерий Мора – Кулона с эффектом Баушингера для расчета дорожных одежд // Строительная механика и конструкции. 2023. № 4 (39). С. 85–101. DOI: 10.36622/VSTU.2023.39.4.009.

REFERENCES

1. Churilin V.S., et al. Regression models of irregular vertical displacement of a roadway cross section caused by frost heaving. *Magazine of Civil Engineering*. 2023; 120(4): 12009. DOI: 10.34910/MCE.120.9.

2. Churilin V.S., Efimenko S.V., Efimenko V.N., Sukhorukov A.V., Drozdov Yu.V. Estimated performance standardization of clayey soils in the Tomsk region for the quality assurance in road construction. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. JOURNAL of Construction and Architecture*. 2020; 22(6): 177–187. (In Russ.) <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-6-177-187>.

3. Matvienko O.V., Bazuev V.P., Churilin V.S. Modelirovanie napryazhenij i deformacij dorozhnyh pokrytij. *Dorogi i mosty*. 2016; 36 (2): 139–153. (In Russ.)

4. Churilin V., Efimenko S., Matvienko O., Bazuev V. Simulation of stresses in asphalt-concrete pavement with frost heaving. *Matec web of conferences*. 2018; 216. 01011. DOI:10.1051/mateconf/201821601011.

5. Efimenko V.N., Efimenko V.N., Karimov E.M., Mamagakipova G.T. TMPA satellite model applied for determination of annual precipitations in road-building climatic zones in southwest Kyrgyzstan. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. JOURNAL of Construction and Architecture*. 2021; 23(4): 147–158. (In Russ.) <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2021-23-4-147-158>.

6. Efimenko V.N., Efimenko S.V., Bashirova I.A. Data bank for road-building climatic zones in Yamalo-Nenets Autonomous District. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. JOURNAL of Construction and Architecture*. 2022; 24(6): 150–159. (In Russ.) <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2022-24-6-150-159>.

7. Afinogenov O.P., Shalamanov V.A., Seryakova A.A. Obespechenie kachestva zemlyanogo polotna avtomobil'nyh dorog na osnove principov regional'nogo rajonirovaniya. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2014; 103 (4): 106–110. (In Russ.)

8. Konorev A.S., Mironchuk S.A., Dumenko V.A., Aleksandrova A.I. Prognozirovaniye perioda vesennego ottaivaniya grunta zemlyanogo polotna avtomobil'nyh dorog. *Dorogi i Mosty*. 2022; 48 (2): 43–58. (In Russ.)

9. Eremin R.A., Pudova N.G., Romanov D.B. Prostranstvennyy analiz georadarnykh dannykh. *Dorogi i Mosty*. 2023; 49 (1): 145 – 157. (In Russ.)

10. Eremin R.A., Kulizhnikov A.M. Opyt kompleksnykh obsledovaniy dorozhnykh odezhd georadarami i ustanovkami udarnogo nagruzheniya. *Dorogi i Mosty*. 2021; 46 (2): 100 – 124. (In Russ.)

11. Kulizhnikov A.M., Eremin R.A., Pudova N.G., Zverev E.O. Metodicheskie podhody k obnaruzheniyu oslablennykh zon v dorozhnoy odezhde po dinamicheskim i kinematicheskim priznakam. *Dorogi i Mosty*. 2022; 48 (2): 82–97. (In Russ.)

12. Kiyalbaev A.K., Alimgazin B.T., Abdygapparov K. Primery opredeleniya raschyotnoj vlazhnosti

grunta v tele zemlyanogo polotna v usloviyah zasushlivogo klimata. *Vestnik Kyrgyzskogo gosudarstvenno-gosudarstvennogo stroitel'stva, transporta i arhitektury im. N. Isanova*. 2016; 52 (2): 31–38. (In Russ.)

13. Kiyalbaev A.K., Sagybekova A.O., YUn D.S. O raschyotnoj vlazhnosti grunta v rabochem sloe zemlyanogo polotna: primery rascheta. *Dostizheniya nauki i obrazovaniya*. 2018; 28 (6): 8–1. (In Russ.)

14. Craig R.F. Soil Mechanics. Seventh edition. *Department of Civil Engineering, University of Dundee, UK*. Published by Taylor & Francis e-Library, London and New York. 2004: 447 p.

15. Das B.M. Advanced soil mechanics. *Third Edition*. New York. Taylor & Francis. 2008: 567 p.

16. Aleksikov I.S., Kurdyukova L.E., Aleksikov S.V. Prognozirovaniye fiziko-mekhanicheskikh svoystv gruntov zemlyanogo polotna. *Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volgograd State Technical University"*. 2008; 12: 51–53. (In Russ.)

17. Goryachev, M.G. Ocenka ozhidaemykh znachenij modulej uprugosti glinistyykh gruntov pri stroitel'stve zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2020; 2 (24): 1–14. (In Russ.)

18. Kalenova E.V., Goryachev M.G., Lugov S.V., YArkin S.V. Obespecheniye trebuemoj prochnosti rabochej zony zemlyanogo polotna pri proektirovaniy i stroitel'stve dorozhnykh odezhd. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2021; 2 (96): 13–15. (In Russ.)

19. Ushakov V.V. Goryachev M.G., Kudryavcev A.N. Uchet prirodno-klimaticheskikh uslovij ekspluatatsii avtomobil'nykh dorog dlya proektirovaniya dorozhnykh odezhd. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2022; 3(70): 68–73. (In Russ.)

20. Aleksandrov A.S., Semenova T.V. Improvement of Mohr-Coulomb criterion for designing pavements of roads of low traffic intensity. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(5): 756–769. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-756-769>.

21. Aleksandrov A.S. Three-parameter mohr-coulomb criterion with the bauschinger effect for calculation of road pavements. *Structural mechanics and structures*. 2023; 4 (39): 85–101. DOI: 10.36622/VSTU.2023.39.4.009. (In Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Александров А.С. Формирование цели, постановка задачи, написание основного текста. Участник приведённых в статье исследований.

Семенова Т.В. Общее редактирование. Подготовка материалов, оформление статьи. Участник приведённых в статье исследований.

Александрова Н.П. Выполнение расчетов и подготовка графических материалов. Участник приведённых в статье исследований.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Aleksandrov A.S. Formulation of the goal, setting the task, writing the main text. Participant of the research presented in the article.

Semenova T.V. General editing. Preparation of materials, article design. Participant of the research presented in the article.

Aleksandrova N.P. Performing calculations and preparing graphic materials. Participant of the research presented in the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александров Анатолий Сергеевич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» института «Автомобильно-дорожное, промышленное и гражданское строительство» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644080, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>,

Researcher ID: I-8860-2018,

SPIN-код: 7573-4997,

Author ID (Scopus): 57191531014,

e-mail: aleksandrov00@mail.ru

Семенова Татьяна Викторовна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» института «Автомобильно-дорожное, промышленное и гражданское строительство» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644080, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1921-8531>,

SPIN-код: 6344-3503,

Author ID (Scopus): 57793795915,

e-mail: sibadisemenova@yandex.ru

Александрова Наталья Павловна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» института «Автомобильно-дорожное, промышленное и гражданское строительство» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644080, г. Омск, просп. Мира, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5534-6338>,

SPIN-код: 6893-9560,

Author ID (Scopus): 57191525817,

e-mail: nata26.74@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandrov Anatoly S. – Cand. of Sci. (Eng), Associate Professor of the Department of Road Construction and Maintenance, Civil Engineering Institute, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644080).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>,

Researcher ID: I-8860-2018,

SPIN-code: 7573-4997,

Author ID (Scopus): 57191531014,

e-mail: aleksandrov00@mail.ru

Semenova Tatiana V. – Cand. of Sci. (Eng), Associate Professor of the Department of Road Construction and Maintenance, Civil Engineering Institute, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospekt Mira, Omsk, 644080).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1921-8531>,

SPIN-code: 6344-3503,

Author ID (Scopus): 57793795915,

e-mail: sibadisemenova@yandex.ru

Aleksandrova Nataliya P. – Cand. of Sci. (Eng), Associate Professor of the Department of Road Construction and Operation, Civil Engineering Institute, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospekt Mira, Omsk, 644080).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5534-6338>,

SPIN-code: 6893-9560,

Author ID (Scopus): 57191525817,

e-mail: nata26.74@mail.ru



ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СТАЛЬНЫХ КАРКАСОВ ОДНОЭТАЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ НА ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ ОБРУШЕНИЕ КВАЗИСТАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Е.Р. Кирколуп ✉, И.В. Харламов

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

✉ ответственный автор
kirkolup@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В соответствии с законодательством Российской Федерации и действующей нормативной документацией при проектировании зданий и сооружений повышенного уровня ответственности необходимо производить расчет на прогрессирующее обрушение, вызванное вследствие возникновения аварийной ситуации. Выделяют четыре метода анализа зданий и сооружений на прогрессирующее обрушение: линейно-упругий статический (квазистатический), нелинейный статический, линейно-упругий динамический, нелинейный динамический. Считается, что наиболее эффективной будет являться комплексная процедура анализа с использованием всех четырех методов, но такой комплексный анализ дает определенную нагрузку на инженера-конструктора, поэтому целесообразней всего применять какой-то один метод. В данной статье описаны особенности расчета металлических конструкций на прогрессирующее обрушение квазистатическим методом.

Материалы и методы. В качестве исследуемого объекта был взят отсек производственного здания с повышенным классом ответственности. Статический расчет пространственной схемы и конструктивный расчет элементов каркаса выполнялся в программе Лира 10.12. В работе на примере исследуемого объекта проанализировали три варианта перехода от первичной расчетной схемы к вторичной. Кроме того, дополнительно рассмотрели еще два варианта, которые не подразумевают удаления из расчетной схемы несущих элементов после отказа их работы.

Результаты. Несмотря на то, что для выбранных колонн при проверке на прогрессирующее обрушение получились неоднозначные результаты по полным перемещениям узлов, примыкающих к удаляемым (раскрепляемым) в результате особого воздействия нижним концом колонн и что некоторые элементы не прошли проверку на РСУ, данную расчетную схему следует считать устойчивой к прогрессирующему обрушению.

Обсуждение и заключение. Используемые варианты расчета на прогрессирующее обрушение квазистатическим методом при проверке расчетной схемы на РСУ дают практически совпадающие результаты. Отличие вариантов расчета, где использовалось удаление частей элементов, в которых происходит отказ их работы, от вариантов, где использовалось раскрепление данных элементов, составило 2-3%.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: металлические конструкции, прогрессирующее обрушение, квазистатический метод, расчетная модель, особые сочетания нагрузок

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

Статья поступила в редакцию 11.09.2023; одобрена после рецензирования 18.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

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: Кирколуп Е.Р., Харламов И.В. Особенности расчета стальных каркасов одноэтажных производственных зданий на прогрессирующее обрушение квазистатическим методом // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 948-959. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-948-959>

© Кирколуп Е.Р., Харламов И.В., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-948-959>

EDN: QGLNSJ

CALCULATION OF STEEL FRAMES IN SINGLE-STOREY INDUSTRIAL BUILDINGS FOR PROGRESSIVE COLLAPSE BY THE QUASI-STATIC METHOD

Evgenij R. Kirkolup ✉, Ivan V. Kharlamov

I.I. Polzunov Altai state technical university,
Barnaul, Russia

✉ corresponding author
kirkolup@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. According to the legislation of the Russian Federation and the current regulatory documentation, when designing buildings and structures of high consequences, it is necessary to make calculations for a progressive collapse caused by an emergency situation. There are four methods of analyzing buildings and structures for progressive collapse: linear-elastic static (quasi-static) method; nonlinear static method; linear-elastic dynamic method; and nonlinear dynamic method. A comprehensive analysis procedure with the use of all four methods is considered to be most effective, but such a comprehensive analysis requires additional work of the design engineer, therefore it is of practical importance to use one of the analysis methods mentioned above. This article describes the peculiarities of calculating metal structures for progressive collapse using the quasi-static method.

Materials and methods. A compartment of an industrial building of high consequences class was taken as the object under study. The static calculation of the spatial scheme and the constructive calculation of the frame elements were performed in the Lira 10.12 program. Within the object under the study, we analyzed three options for the transition from the primary design scheme to the secondary one. In addition, we considered two more options that do not imply the removal of load-bearing elements from the design scheme after their failure.

Results. Despite the fact that, when checking the selected columns for progressive collapse, we obtained ambiguous results for complete movements of nodes adjacent to the lower ends of the columns being removed (loosened) as a result of special impact, and some elements were not checked for design combination of forces, this calculation scheme should be considered resistant to progressive collapse.

Discussion and conclusions. The calculation options used for progressive collapse analysis by the quasi-static method, when checked for design combination of forces, have shown identical results. The difference between the calculation options based on removing parts of the elements in which their operation fails, and the options based on unbinding these elements, has been about 2-3%.

KEYWORDS: metal structures, progressive collapse, quasi-static method, analysis model, special load combinations

The article was submitted: 11.19.2024 approved after reviewing: 18.11.2024; accepted for publication: 16.12.2024.

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. Kirkolup E.R., Kharlamov I.V. Calculation of steel frames in single-storey industrial buildings for progressive collapse by the quasi-static method. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): 948-959. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-948-959>

© Kirkolup E.R., Kharlamov I.V., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с законодательством Российской Федерации и действующей нормативной документацией при проектировании зданий и сооружений повышенного уровня ответственности необходимо производить расчет на прогрессирующее обрушение, вызванное вследствие возникновения аварийной ситуации [1]. Аварийная ситуация может возникнуть как от непредусмотренных нормальной эксплуатацией воздействий (взрыв, пожар, сейсмическое воздействие и др.), так и от ошибок проектирования, низкого качества материалов и конструкций, дефектов изготовления конструкций и монтажа, неправильной эксплуатации, приводящих к отказам [2, 3, 4]. Вероятность разрушения здания всегда существует, и сделать ее нулевой не представляется возможным. К тому же попытки приблизить вероятность разрушения здания к нулю приводят к значительному росту стоимости строительства [5, 6]. В научной литературе выделяют четыре метода анализа зданий и сооружений на прогрессирующее обрушение: линейно-упругий статический (квазистатический), нелинейный статический, линейно-упругий динамический, нелинейный динамический¹ [3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. При этом исследователи приходят к выводу, что наиболее эффективной будет являться комплексная процедура анализа с использованием всех четырех методов, т.к. каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Но такая постановка проведения анализа на прогрессирующее обрушение дает определенную нагрузку на инженера-конструктора, поэтому целесообразней всего применять какой-то один метод анализа, что не противоречит СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения» (с изменениями). В связи с этим целью данной работы было исследование особенностей расчета стального каркаса одноэтажного производственного здания на прогрессирующее обрушение квазистатическим методом. Основной задачей исследования являлся выбор вариантов реализации квазистатического метода на предмет простоты их реализации и применимости для расчета на прогрессирующее обрушение.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исследуемого объекта был взят отсек производственного здания (рисунок 1) с повышенным классом ответственности (КСЗ), размерами в плане 96 x 12 м и минимальной высотой до низа стропильных конструкций здания от уровня чистого пола – 13,94 м. Каркас зданий – стальной, рамно-связевого типа. Стойки выполнены из прокатных и сварных двутавров. Все стойки жестко сопряжены с фундаментами. Ригелями отсека являются стропильные фермы из профильных труб и двутавровые балки покрытия. Схема сопряжения ферм и балок с колоннами принята шарнирной. По фермам и балкам покрытия уложены стальные прогоны из горячекатаных двутавров. На прогоны опирается стальной профилированный настил. В рассматриваемом отсеке имеется грузоподъемное крановое оборудование – мостовые краны грузоподъемностью 15 т (режим работы кранов 5К). Геометрическая неизменяемость здания обеспечивается собственной жесткостью элементов каркасов, жестким сопряжением колонн с фундаментами, системой вертикальных и горизонтальных связей, а также жестким диском покрытия. В качестве конструктивного мероприятия по предотвращению прогрессирующего обрушения для одноэтажного каркаса здания по продольным рядам колонн предусмотрены подстропильные неразрезные балки, обеспечивающие перераспределение усилий после локального разрушения одного из несущих элементов каркаса. В условиях нормальной работы конструкций элементы подстропильных балок воспринимают опорное давление от стропильных конструкций и выполняют функции распорок по колоннам.

Статический расчет пространственной схемы и конструктивный расчет элементов каркаса производился в программе Лира 10.12. При расчете действия постоянных и временных нагрузок на пространственную схему использовали нормативное значение ветровой нагрузки ($0,38 \text{ кН/м}^2$ – III ветровой район по СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*», карта 2 прил. Е) и нормативное значение веса снегового покрова ($1,55 \text{ кН/м}^2$ – III снеговой район по СП 20.13330.2016, таблица К.1 прил. К).

¹ Шикова В.А., Фролова Е.В., Володченко Д.Г., Абу-Хасан М.С. Особенность и порядок расчетов на защиту от прогрессирующего обрушения // Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии: материалы IX Международной научно-практической интернет-конференции, Москва, 1–3 июня 2022 года. 2022. С. 59–63.

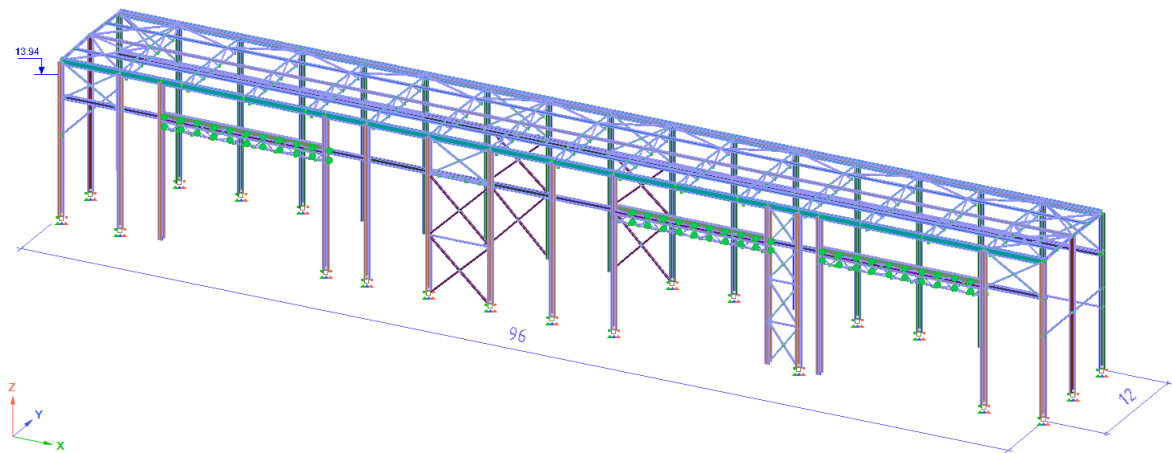


Рисунок 1 – Общий вид модели исследуемого здания
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – General view of the analyzed building model
Source: compiled by the authors.

Кроме этого, в качестве постоянно действующих нагрузок использовали нагрузку от собственного веса конструкций (задавалась автоматически на основе применяемых в схеме материалов и сечений), нагрузку от покрытия отсека (нормативное значение $0,41 \text{ кН/м}^2$) и нагрузку от веса стенового ограждения ($0,39 \text{ кН/м}^2$). Дополнительно в качестве временных нагрузок использовали технологическую нагрузку от инженерных коммуникаций на уровне покрытия ($0,49 \text{ кН/м}^2$) и крановые нагрузки, рассчитанные исходя из технических характеристик используемых кранов. Расчет крановых нагрузок производили в соответствии с п. 9 СП20.13330.2016. Коэффициент сочетания при одновременной работе двух кранов выбирали равным $0,85$, а при учете четырех кранов – $0,7$. Таким образом, максимальное значение нормативной вертикальной крановой нагрузки от действия двух кранов при их максимальном сближении получили равным 140 кН , а от четырех кранов – 294 кН . Максимальные горизонтальные крановые нагрузки при торможении вдоль кранового пути для двух кранов – 9 кН , для четырех – 27 кН . Горизонтальные крановые нагрузки при торможении поперек кранового пути для двух кранов – 11 кН , для четырех – 15 кН . Расчетные значения используемых нагрузок получали исходя из рекомендаций СП20.13330.2016 с учетом соответствующих коэффициентов по нагрузке.

При расчете на прогрессирующее обрушение в соответствии с разделом 6 СП 385.113258000.2018 коэффициенты надежности по нагрузке (γ_f), коэффициенты сочетаний нагрузок, коэффициент надежности по ответственности (γ_n) принимаются равным 1 . Расчет защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения следует выполнять на особое сочетание нагрузок, включающее постоянные и длительные временные нагрузки, в том числе пониженные значения кратковременных нагрузок, с учетом изменения расчетной схемы здания и сооружения в результате локального разрушения. Пониженные значения кратковременных нагрузок от оборудования, людей, животных, складироваемых материалов и изделий, транспортных средств определяли умножением их нормативных значений на коэффициент $0,35$; снеговых нагрузок – умножением их нормативных значений на коэффициент $0,5$. Пониженные значения крановых нагрузок определяли умножением нормативного значения вертикальной нагрузки от одного крана в каждом пролете здания на коэффициент $0,5$ – для групп режима работы кранов 5К. В качестве особой нагрузки, согласно п. 5.6 СП 20.13330.2016, приняли нагрузку от столкновений транспортных средств с частями сооружения, а именно с колоннами. В расчете принимали наихудший вариант – отказ работы несущей колонны. Дополнительно рассматривали ситуацию обрушения колонны из-за просадки основания под фундаментом.

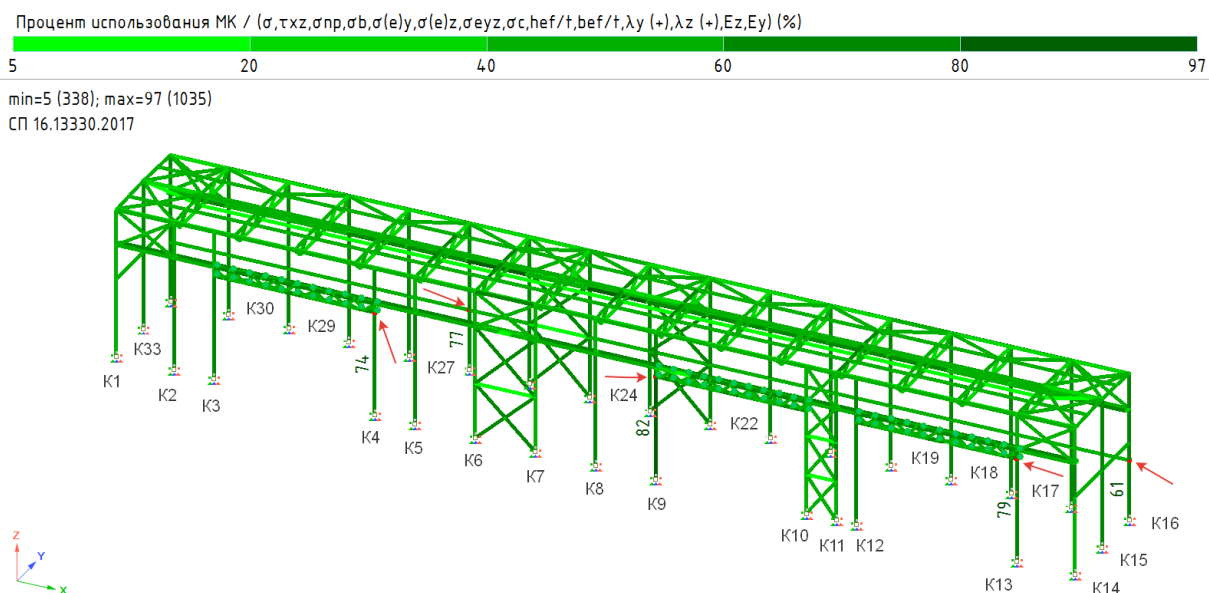


Рисунок 2 – Первичная расчетная схема исследуемого объекта.
Цифрами на схеме показаны проценты использования несущей способности
в конструкции наиболее нагруженных металлических колонн (показаны стрелками)
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – The primary calculation scheme of the analyzed object. The figures in the diagram show the percentages
of load-bearing capacity in the construction of the most loaded metal columns (shown by arrows)
Source: compiled by the authors.

При программной реализации квазистатического метода до сих пор нет четкой регламентации. Описанная в п.8.1 СП 385.113258000.2018 методика расчета в статической постановке тоже жестко не регламентирует порядок перехода от первичной расчетной схемы к вторичной расчетной схеме. В связи с этим как в научной литературе, так и среди инженеров-расчетчиков существуют различные варианты реализации квазистатического метода^{2,3} [3, 16, 17].

В данной работе для исследуемого объекта проанализировали три варианта перехода от первичной расчетной схемы к вторичной. Кроме того, дополнительно рассмотрели еще два варианта, которые не подразумевают удаления из расчетной схемы несущих элементов после отказа их работы.

Вариант 1. Проводится расчет первичной расчетной схемы и определяется напряжен-

но-деформированное состояние в элементах конструктивной системы при условии нормальной эксплуатации (рисунок 2). Затем определяется самый нагруженный элемент и удаляется из расчетной схемы. После этого выполняется расчет вторичной расчетной схемы^{2,3} [16, 17].

Вариант 2. Проводится расчет первичной расчетной схемы. Определяется самый нагруженный (удаляемый) элемент схемы. После этого к верхнему узлу удаляемого элемента (рисунок 3, а) прикладывается нагрузка, равная вертикальному усилию в элементе и направленная вертикально вниз, т.е. осуществляется обнуление усилий взаимодействия между остающейся частью и удаляемым элементом расчетной схемы [3]. Затем удаляется выбранный элемент и выполняется расчет вторичной расчетной схемы.

² Быстров Н.С. Сравнительный анализ методов расчета ферменного железнодорожного моста на устойчивость к прогрессирующему обрушению // Железнодорожный транспорт и технологии: сборник трудов Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 29–30 ноября 2022 года. 2023. С. 113–117.

³ Ягнюк Б.Н. Расчет каркасов зданий на прогрессирующее обрушение // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: сборник статей Международной научной конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 5–6 апреля 2018 года. 2018. С. 116–122.

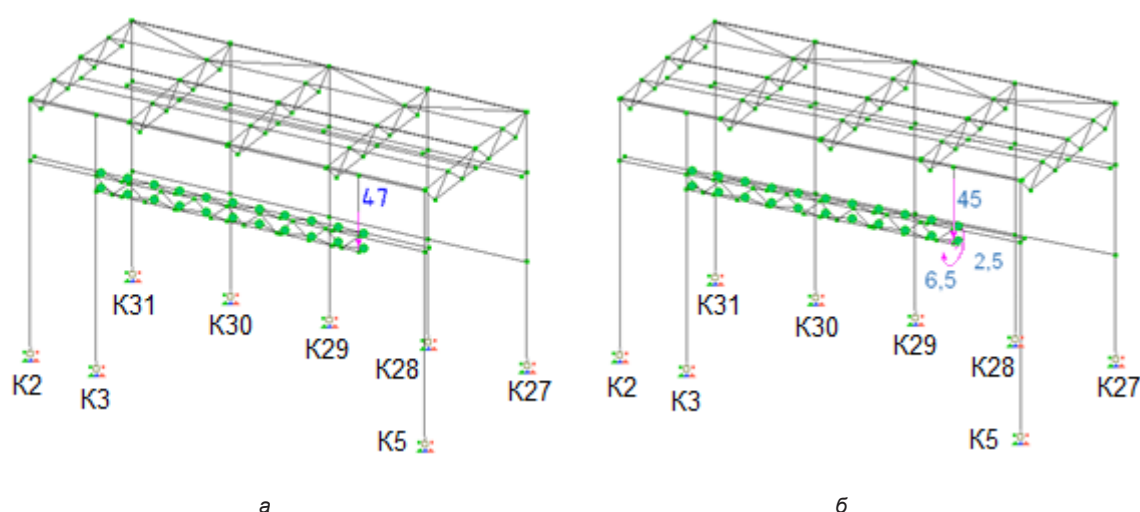


Рисунок 3 – Схема приложения нагрузок, при выключении подкрановой части колонны K4:
а – вариант 2; б – вариант 3
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – The load application scheme, with the crane part of the column K4 turned off:
а – variant 2, б – variant 3
Source: compiled by the authors.

Вариант 3. Проводится расчет первичной расчетной схемы. Определяется самый нагруженный (удаляемый) элемент схемы. После этого к верхнему узлу удаляемого элемента (рисунок 3, б) прикладываются нагрузки и моменты, равные усилиям и моментам в элементе и взятые со знаком минус, т.е. осуществляется освобождение от связей удаляемого элемента² [3, 17]. Затем удаляется выбранный элемент и выполняется расчет вторичной расчетной схемы.

Вариант 4. Аналогичен варианту 1. Отличие заключается в том, что элемент не удаляется из расчетной схемы, а раскрепляется один из его концов, что должно приближать расчетную аварийную ситуацию к реальной.

Вариант 5. Аналогичен варианту 3, только вместо удаления элемента раскрепляется один из его концов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнение результатов расчета первичной расчетной схемы и вторичных расчетных схем, реализованных рассматриваемыми вариантами, проводили по перемещениям узлов (обозначены стрелками на рисунке 2), приходящих к удаляемым (раскрепляемым) в результате особого воздействия элементам, и по проверке конструктивных элементов на расчетное сочетание усилий (РСУ). Для получения вторичных расчетных схем выбирались наиболее нагруженные элементы нижней части угловых и рядовых колонн, т.к. наиболее возможным и опасным является именно повреждение колонн на участках их опирания на фундамент. Результаты расчетов приведены в таблице.

Таблица
Результаты расчета исследуемого объекта на прогрессирующее обрушение
Источник: составлено авторами.

Table
Results of calculating the analyzed object for progressive collapse
Source: compiled by the authors.

Элемент ¹	Первичная схема		Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4		Вариант 5	
	Δ^2 , мм	% ³	Δ , мм	PCY	Δ , мм	PCY	Δ , мм	PCY	Δ , мм	PCY	Δ , мм	PCY
K4	18	74	22	П ⁴	20	П	26	П	22	П	25	П
K9	18	82	23	НІ ⁵	21	НІ	29	НІ	23	НІ	29	НІ
K13	16	79	21	НІ	19	НІ	26	НІ	21	НІ	26	НІ
K16	6,1	61	32	НІІ ⁶	62	НІІ	62	НІІ	37	НІІ	67	НІІ
K27	4,1	77	12000	НІІІ ⁷	12000	НІІІ	24000	НІІІ	12000	НІІІ	24000	НІІІ

¹ Исключаемый элемент при переходе от первичной расчетной схемы к вторичной.

² Δ – полное линейное перемещение рассматриваемого узла.

³ % – максимальный процент использования конструктивного элемента в исходной схеме.

⁴ П – конструктивные элементы проходят проверку на PCY.

⁵ НІ – конструктивные элементы не проходят проверку на PCY по I предельному состоянию (I ПС).

⁶ НІІ – конструктивные элементы не проходят проверку на PCY по II предельному состоянию (II ПС).

⁷ НІІІ – конструктивные элементы не проходят проверку на PCY по I ПС и по II ПС.

Из таблицы видно, что при расчете на прогрессирующее обрушение только в случае отказа работы нижней части колонны K4 расчетная схема проходит проверку на PCY вне зависимости от используемого варианта расчета. Все остальные рассматриваемые отказы колонн приводят к тому, что некоторые элементы расчетной схемы не проходят проверку на PCY либо по I ПС, либо по II ПС, либо и по I ПС и по II ПС. При этом в некоторых случаях процент использования несущей способности (ПИНС) элементов в конструкции не превышал 110%, т.е. работа таких элементов до конца не определена, и считать в данном случае, что расчетная схема подвержена прогрессирующему обрушению, преждевременно, без проведения дополнительного анализа схемы с учетом нелинейности материалов элементов. Так, к примеру, при расчете отказа работы нижней части колонны K9 только один элемент расчетной схемы (опора подкрановой балки на колонне K10) не прошел проверку по первому предельному состоянию, а именно: не было обеспечено условие прочности по касательным напряжениям, ПИНС составил ~110%. Следует отметить, что в зависимости от используемого варианта расчета ПИНС элемента в конструкции при проверке на PCY был различным. При использовании вариантов 1, 2 и 3 расчета (нижняя часть колонны удаляется из расчетной схемы) ПИНС опоры

в расчетной схеме равнялся 110%. А при использовании вариантов 4 и 5 расчета (нижняя часть колонны раскреплялась и оставалась в расчетной схеме) ПИНС был больше – 113%. Аналогичная ситуация наблюдалась при расчете отказа работы нижней части колонны K13. В данном случае два элемента расчетной схемы (опора подкрановой балки на колонне K12 и нижняя часть колонны K12) не прошли проверку по первому предельному состоянию. Нижняя часть колонны K12 не прошла расчет по устойчивости внецентренно-сжатых элементов из плоскости действия момента при изгибе их в плоскости наибольшей жесткости, ПИНС равнялся 104% для всех вариантов расчета. Для опоры подкрановой балки на колонне K12 не обеспечивалось условие прочности по касательным напряжениям, ПИНС элемента для вариантов расчета 1, 2, 3 составлял 106%, а для вариантов 4 и 5 – 109%. При расчете отказа работы нижней части колонны K16 не прошли проверку пять элементов расчетной схемы – четыре опоры подкрановой балки и элемент крановой балки вблизи K16. Но так как проверка на PCY у данных элементов не прошла только по второму предельному состоянию, то в данном случае следует считать, что условие устойчивости к прогрессирующему обрушению выполняется, потому что предельные значения по второму предельному состоянию для аварийных ситуаций не регламентируются [1, 17].

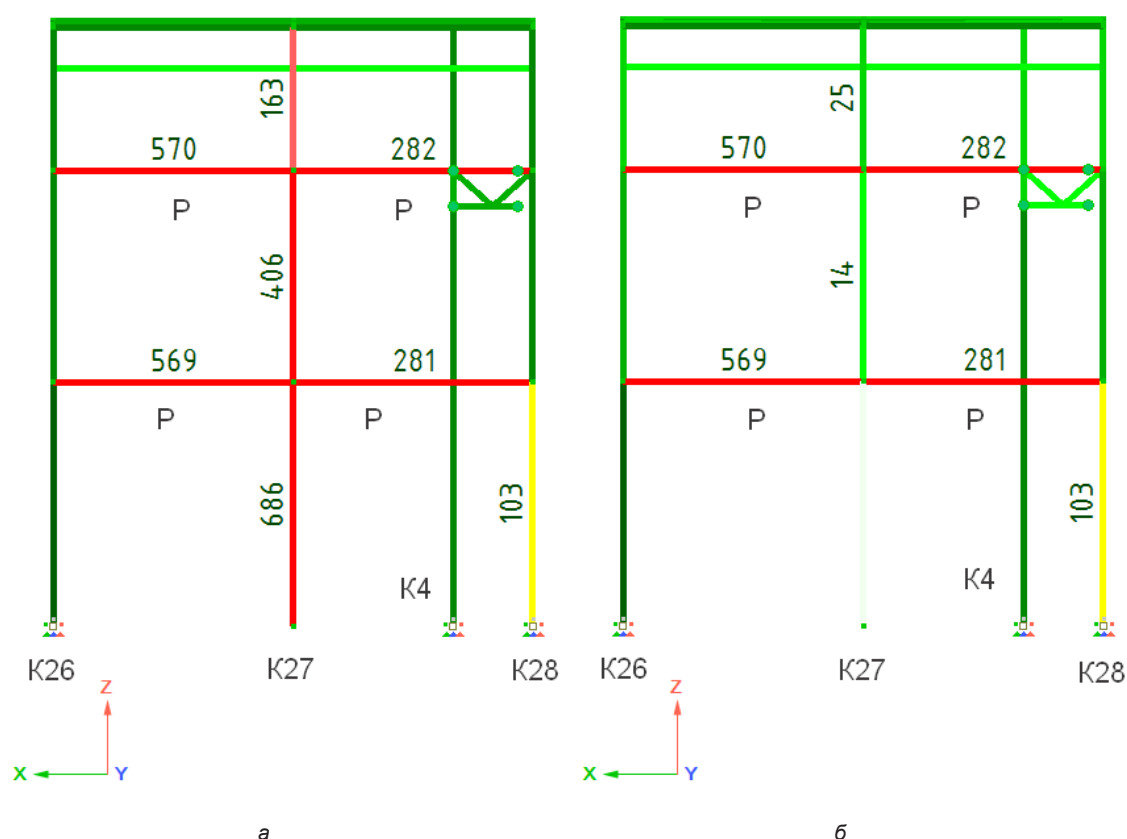


Рисунок 4 – Результаты проверки вторичной схемы на РСУ в случае раскрепления колонны K27 (вариант 5):
а) по I ПС и по II ПС;
б) по I ПС

Источник: составлено авторами.

Figure 4 – The secondary circuit for DCF checking results in the case of the K27 column unlocking (variant 5):
a) according to the I LS and II LS,
b) according to I LS
Source: compiled by the authors.

Иная ситуация наблюдалась при расчете отказа работы нижней части колонны K27. В данном случае во вторичной расчетной схеме уже порядка десяти элементов не проходили расчет либо по первому предельному состоянию, либо по второму. В основном это горизонтальные связевые элементы Р и колонна K28 (рисунок 4, а). Если не брать во внимание расчетные значения по второму предельному состоянию для аварийных ситуаций, то число анализируемых элементов, не прошедших проверку по первому предельному состоянию, сокращается вдвое. Для связевых элементов не обеспечивалось условие прочности по касательным напряжениям, при этом ПИНС некоторых связевых элементов в конструкции превышал 500% (рисунок 4, б). Для колонны K28 не обеспечивалось условие по устойчи-

вости внецентренно-сжатых элементов из плоскости действия момента при изгибе их в плоскости наибольшей жесткости, превышение составляло 1% при вариантах расчета 1, 2, 3 и 3% при вариантах расчета 4, 5. Следует отметить, что для данной расчетной схемы при расчете на прогрессирующее обрушение, а именно при удалении нижней части одной из рассматриваемых колонн, результаты проверок на РСУ совпадали между собой для вариантов 1, 2 и 3 расчета. Также совпадали между собой результаты проверок вариантов 4 и 5. При этом расчетные полные перемещения рассматриваемых узлов отличались в зависимости от вариантов расчета.

Сравнивая результаты расчета по полным перемещениям узлов (Δ), примыкающих к удаляемым (раскрепляемым) в результате особо-

го воздействия элементам, установили, что Δ вторичных расчетных схем превосходит Δ первичной расчетной схемы при отказе работы нижних частей колонн K4, K9, K13 на 10–38%, K16 – на 80–91%, а при отказе работы нижней части колонны K27 – более чем в 1000 раз. Различались Δ и при использовании вариантов расчета вторичных расчетных схем. К примеру, при применении варианта 2 расчета в случае отказа работы нижних частей колонн K4, K9, K13 получили Δ меньше, чем при использовании варианта 1 на 9–10%. В случае отказа K16 Δ , рассчитанное по варианту 2, наоборот, превосходило Δ , рассчитанное по варианту 1, практически в 2 раза, а при отказе K27 полные перемещения узлов, рассчитанные по вариантам 1 и 2, были равны. Если сравнивать между собой результаты расчета по вариантам 1 и 3, то видим, что Δ , рассчитанное по варианту 3, превосходило Δ , рассчитанное по варианту 1, в случае отказа работы нижних частей колонн K4, K9, K13 на 19–21%, колонн K16, K27 – практически в 2 раза. Примерно такие же отличия полных перемещений узлов наблюдались при расчете по варианту 5 в сравнении с вариантом 4. Заметим, что результаты расчета Δ с использованием вариантов 1 и 4 практически совпадали, отличие наблюдалось при расчете отказа колонны K16 на 14%. Также совпадали результаты расчета Δ с использованием вариантов 3 и 5, отличия наблюдались при расчете отказа колонн K4 и K16 на 4 и 7% соответственно. Подобное совпадение свидетельствует о применимости предложенных вариантов расчета, т.е. при моделировании особых воздействий необязательно удалять элементы из расчетной схемы, достаточно раскрепить один из узлов конечного элемента, на который должно происходить воздействие.

Остановимся на случае удаления (раскрепления) колонны K27 при проверке на прогрессирующее обрушение. Видно, что для данной расчетной ситуации пространственная расчетная схема дает неоднозначный результат, т.е. полные перемещения исследуемого узла составляли 12–24 м, при этом ПИНС горизонтальных распорок, примыкающих к колонне, достигал 570%. Такие результаты расчета тяжело объяснить реальной работой конструкций, поэтому в расчетную схему были внесены следующие правки. Низ колонны K27 смоделировали одноузловой упругой связью с удельной жесткостью 5000 кН/м, данное значение взято из предположения, что в случае аварийной ситуации колонна будет

включаться в упруго-пластичную работу. Значение удельной жесткости определили с учетом площади поперечного сечения колонны и предела текучести используемой марки стали (С255). Отметим, что использование упругой связи для низа колонны K27 со значением удельной жесткости, равной произведению площади поперечного сечения колонны на модуль Юнга, приводит расчетную схему к таким же результатам расчета, как для первичной расчетной схемы, а со значением удельной жесткости равным 0 кН/м – к выше описанной с высокими результатами по перемещениям и ПИНС. Далее согласно п. 8.3 и п. 8.5 СП 296.1325800.2017 «Здания и сооружения. Особые воздействия» задавали сосредоточенную ударную нагрузку на K27 от вилочного погрузчика, равную 1200 кН (из расчета веса и грузоподъемности погрузчика и коэффициента динамичности, равного 5), на расстоянии 0,75 м от низа колонны. А затем от рельсового транспорта – равную 750 кН (уменьшенная на 50% сосредоточенная нагрузка перпендикулярно направлению движения) на расстоянии 1,8 м от низа колонны. В результате расчета Δ исследуемого узла значительно уменьшилось и для ситуации действия ударной нагрузки от вилочного погрузчика равнялось 200 мм, а при действии рельсового транспорта – 160 мм. При проверке на РСУ в обоих случаях все элементы конструкции проходили проверку, кроме низа колонны K27. В первом случае превышение ПИНС по I ПС составило 12%, а во втором – 16%. Таким образом, можно предположить, что в случае аварийной ситуации с колонной K27 она полностью не будет выключаться из работы конструкции, а саму расчетную схему следует считать устойчивой к прогрессирующему обрушению.

Несмотря на то, что для выбранных колонн при проверке на прогрессирующее обрушение получились неоднозначные результаты по полным перемещениям узлов, примыкающих к удаляемым (раскрепляемым) в результате особого воздействия нижним концам колонн и что некоторые элементы не прошли проверку на РСУ, данную расчетную схему следует считать устойчивой к прогрессирующему обрушению. Из всей расчетной схемы только лишь опоры подкрановых балок на колоннах K10 и K12 не проходили проверку на РСУ по I предельному состоянию, превышение составляло 10% и более. Но в реальном проекте все опоры подкрановых балок усилены ребрами жесткости, поэтому можно считать для данных

элементов, что они будут проходить проверку на РСУ. Отклонение для колонн К12 и К28 при проверке на РСУ по ИПС и вовсе не превышало 5%. Учитывая то, что ребра жесткости есть и в колоннах на уровнях горизонтальных раскосов и подкрановых балок, то и эти элементы расчетной схемы будут проходить проверку на РСУ.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного расчетного исследования можно заключить следующее:

1. Квазистатический метод применим для оценки возможности прогрессирующего обрушения каркасных зданий, в том числе для зданий с крановым оборудованием. В случае влияния возникающих динамических эффектов от кранового оборудования на результаты расчета, например, при получении завышенных значений результатов расчета какой-то части вторичной расчетной схемы, следует проводить дополнительные исследования исключаемых из работы элементов схемы. Вводить упруго-пластичные свойства для рассматриваемых элементов, чтобы учесть нелинейную работу материалов этих элементов. Кроме того, следует рассматривать не отдельно один отсек здания, а корректировать расчетную схему с учетом всех деформационных блоков здания, таким образом приближая расчетную схему к реальной.

2. Используемые варианты расчета на прогрессирующее обрушение квазистатическим методом при проверке расчетной схемы на РСУ дают практически совпадающие результаты. Отличие вариантов расчета, где использовалось удаление частей элементов, в которых происходит отказ их работы, от вариантов, где использовалось раскрепление данных элементов, составило 2-3%.

2. В силу того что расчетное подтверждение при моделировании аварийных ситуаций в обязательном порядке должно выполнять требования по первой группе предельных состояний, то, исходя из результатов проверки, исследуемый отсек производственного здания с повышенным классом ответственности следует считать устойчивым к прогрессирующему обрушению.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Королев В.В., Клековкина Н.А. Расчет зданий и сооружений на прогрессирующее обрушение вследствие аварийной ситуации // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2018. Т. 12, № 12(12). С. 155–157.

2. Ведяков И.И., Еремеев П.Г., Одесский П.Д., Попов Н.А., Соловьев Д.В. Анализ нормативных требований к расчету строительных конструкций на прогрессирующее обрушение // Вестник НИЦ «Строительство». 2019. № 2(21). С. 15–29.

3. Перельмутер А. О расчетах сооружений на прогрессирующее обрушение // Вестник МГСУ. 2008. № 1. С. 119–128.

4. Лазовский Д.Н., Поповко А.В., Пецольд Т.М., Журавский В.Ю. Расчет на прогрессирующее обрушение большепролетных металлических конструкций покрытий // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Прикладные науки. Строительство. 2007. № 6. С. 29–35.

5. Ведяков И.И., Еремеев П.Г., Одесский П.Д., Попов Н.А., Соловьев Д.В. Расчет строительных конструкций на прогрессирующее обрушение: нормативные требования // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 4. С. 16–24. DOI 10.33622/0869-7019.2019.04.16-24.

6. Еремеев П.Г., Ведяков И.И. Еще раз о проблеме защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 8. С. 4–10. DOI 10.33622/0869-7019.2021.08.04-10.

7. Izzuddin B.A. Mitigation of progressive collapse in multi-storey buildings //Advances in Structural Engineering. 2012. Vol. 15. No. 9. pp. 1505–1520.

8. Naji A., Khodaverdi Zadeh M. Progressive collapse analysis of steel braced frames //Practice Periodical on Structural Design and Construction. 2019. Vol. 24. No 2. pp. 04019004.

9. Scott M.H., Fenves G.L. Krylov subspace accelerated Newton algorithm: application to dynamic progressive collapse simulation of frames //Journal of Structural Engineering. 2010. Vol. 136. No. 5. pp. 473–480.

10. Marjanishvili S.M. Progressive analysis procedure for progressive collapse //Journal of performance of constructed facilities. 2004. Vol. 18. No. 2. pp. 79–85.

11. Byfield M. et al. A review of progressive collapse research and regulations //Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings. 2014. Vol. 167. No. 8. pp. 447–456.

12. Pegin P.A., Shulgin A.A. Modern methods for calculating transport infrastructure objects for progressive collapse // BRICS Transport. 2023. Vol. 2, No. 3. DOI 10.46684/2023.3.6.

13. Туснин А.Р., Бергер М.П., Галстян Т.В. Совместная работа большепролетных ферм и прогонов при расчете на прогрессирующее обрушение // Жилищное строительство. 2023. № 11. С. 24–31. DOI 10.31659/0044-4472-2023-11-24-31.

14. Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Кущенко А.К., Быченко И.В. Особенности расчета на прогрессирующее обрушение каркаса уникального здания многофункционального комплекса // Инженерный вестник Дона. 2022. № 9(93). С. 172–181.

15. Богуцкий Ю.Г., Васильев М.В., Белавский В.А. Моделирование несущей системы каркасного здания на базе упругой модели для расчета на

прогрессирующее обрушение с учетом реальных физических свойств материалов // Строительство и технологическая безопасность. 2023. № 1. С. 148–155.

16. Данилова К.А. Расчет стального каркаса одноэтажного здания на прогрессирующее обрушение // Вестник науки. 2019. Т. 4, № 6(15). С. 323–326.

17. Быстров Н.С., Овчинников И.Г. О расчетах зданий и сооружений на устойчивость к прогрессирующему обрушению // Архитектура, строительство, транспорт. 2022. № 3. С. 32–38. DOI 10.31660/2782-232X-2022-3-32-38.

REFERENCES

1. Korolev V.V., Klekovkina N.A. Calculation of buildings and structures on the progressive collapse due to an emergency. *Vnedrenie sovremennykh konstruktsiy i peredovykh tekhnologiy v putevoe hozyajstvo*. 2018; V. 12, No 12(12): 155–157. (In Russ.)

2. Vedyakov I., Yeremeyev P., Odesskiy P., Popov N., Solovyev D. Standard requirement analysis for the progressive collapse structure calculation. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2019; 21(2): 15–29. (In Russ.)

3. Perelmutter A. About calculations of structures for progressive collapse. *Vestnik MGSU*. 2008; 1: 119–128. (In Russ.)

4. Lazovskij D.N., Popravko A.V., Pecol'd T.M., Zhuravskij V.Yu. Calculation of the progressive collapse of large-span metal structures of coatings. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*. 2007; 6: 29–35. (In Russ.)

5. Vedyakov I.I., Ereemeev P.G., Odesskiy P.D., Popov N.A., Solov'ev D.V. Regulatory requirements for the design of building structures for progressive collapse. *Industrial And Civil Engineering*. 2019; 4: 16–24. DOI 10.33622/0869-7019.2019.04.16-24. (In Russ.)

6. Ereemeev P.G., Vedyakov I.I. Once again about the problem of protecting buildings and structures from progressive collapse. *Industrial And Civil Engineering*. 2021; 8: 4–10. DOI 10.33622/0869-7019.2021.08.04-10. (In Russ.)

7. Izzuddin B.A. Mitigation of progressive collapse in multi-storey buildings. *Advances in Structural Engineering*. 2012; 15. No. 9: 1505–1520.

8. Naji A., Khodaverdi Zadeh M. Progressive collapse analysis of steel braced frames. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2019; Vol. 24. No 2: 04019004.

9. Scott M.H., Fenves G.L. Krylov subspace accelerated Newton algorithm: application to dynamic progressive collapse simulation of frames. *Journal of Structural Engineering*. 2010; Vol. 136. No. 5: 473–480.

10. Marjanishvili S.M. Progressive analysis procedure for progressive collapse. *Journal of performance of constructed facilities*. 2004; Vol. 18. No. 2: 79–85.

11. Byfield M. et al. A review of progressive collapse research and regulations. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*. 2014; Vol. 167. No. 8: 447–456.

12. Pegin P.A., Shulgin A.A. Modern methods for calculating transport infrastructure objects for progres-

sive collapse. *BRICS Transport*. 2023; Vol. 2, No. 3. DOI 10.46684/2023.3.6.

13. Tusnin A.R., Berger M.P., Galstyan T.V. Joint operation of large-span trusses and purlins in the calculation of progressive collapse. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo (Housing Construction)*. 2023; 11: 24–31. DOI 10.31659/0044-4472-2023-11-24-31. (In Russ.)

14. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Kushchenko A.K., Bychenko I.V. Features of the calculation for the progressive collapse of the frame of a unique building of a multifunctional complex. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2022; 9(93). pp. 172–181. (In Russ.)

15. Bogutskiy U., Vasiliev M., Belavskiy V. Modeling of the load-bearing system of a frame building based on an elastic model for calculating progressive collapse, taking into account the real physical properties of materials. *Construction and industrial safety*. 2023. № S1. pp. 148–155. (In Russ.)

16. Danilova K.A. Calculation of the steel frame of a single-storey building for progressive collapse. *Vestnik nauki*. 2019; V. 4, No 6(15): 323–326. (In Russ.)

17. Bystrov N.S., Ovchinnikov I.G. About calculations of buildings and structures for resistance to progressive collapse. *Architecture, Construction, Transport" (Arkhitektura, stroitel'stvo, transport)*. 2022; 3: 32–38. DOI 10.31660/2782-232X-2022-3-32-38. (In Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Кирколуп Е.Р. Постановка эксперимента, обработка и оформление результатов эксперимента, анализ результатов эксперимента, анализ источников, формирование статьи.

Харламов И.В. Постановка задачи, анализ результатов эксперимента, формулировка выводов, редактирование статьи.

AUTHOR CONTRIBUTION

Kirkolup E.R. Experimental set up, calculation and description of the results, data interpretation, references analysis, writing the manuscript.

Kharlamov I.V. research objective setting, experimental results analysis, drawing conclusions, final approval of the version to be published.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кирколуп Евгений Романович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные конструкции» ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова (656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4782-6507>,

SPIN-код: 1625-6004,

e-mail: kirkolup@mail.ru

Харламов Иван Викентьевич – канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Строительные конструкции» ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова (656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2607-5380>,

SPIN-код: 7985-8580,

e-mail: harlamoviv@altgtu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kirkolup Evgenij R. – Cand. of Sci. (Eng), Associate Professor of the Department of Building structures, I.I. Polzunov Altai state technical university (656038, Barnaul, Lenin av., 46).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4782-6507>,

SPIN-code: 1625-6004,

e-mail: kirkolup@mail.ru

Kharlamov Ivan V. – Cand. of Sci. (Eng), Head of the Department of Building Structures, I.I. Polzunov Altai state technical university (656038, Barnaul, Lenin av., 46).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2607-5380>,

SPIN-code: 7985-8580,

e-mail: harlamoviv@altgtu.ru

Научная статья

УДК 62-752.2

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-960-971>

EDN: DJUFWK



ПРИМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ГАСИТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ВИБРОЗАЩИТЫ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

В.И. Кочергин ✉, **С.П. Глушков**, **Д.Э. Абраменков**

Сибирский государственный университет путей сообщения,

г. Новосибирск, Россия

vkplus2011@yandex.ru

✉ ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Увеличение интенсивности дорожного движения и перспективы развития высокоскоростного железнодорожного транспорта требуют решения проблемы эффективности виброзащиты объектов транспортной инфраструктуры путем разработки инновационных решений. В настоящее время вопросы борьбы с вибрацией по отношению к пролетным сооружениям мостов и путепроводов являются недостаточно изученными. Цель работы – исследование перспективных направлений виброзащиты мостовых сооружений на основе применения динамических гасителей колебаний.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели исследования и реализации эффективных технических решений в области виброзащиты мостовых сооружений предлагается усовершенствованная конструкция динамического гасителя колебаний, в которой инерционная масса закреплена на двух пружинах, верхняя из которых связана с защищаемой от вибрации конструкцией, а нижняя пружина – с основанием или фундаментом объекта. Гашение колебаний при этом производится за счет колебаний в противофазе свободным и вынужденным колебаниям защищаемого от вибраций объекта вспомогательных инерционных масс. Данное техническое решение позволяет уравновесить силы упругого взаимодействия демпфирующего устройства и защищаемого от вибрации объекта и моменты от этих сил.

Результаты. В результате выполнения экспериментальных исследований установленного на вибростенде макетного образца усовершенствованного динамического гасителя колебаний установлено, что уровни вибрации по всем направлениям существенно снизились, в том числе в вертикальном направлении в 5,7 раз.

Обсуждение и заключение. Полученные положительные результаты экспериментов и относительная простота предлагаемой конструкции позволяют предложить данный метод виброзащиты пролетных строений как для вновь проектируемых, так и для уже находящихся в эксплуатации объектов. Особенно важным является минимизация возможности возникновения резонансных явлений и галопирования. Результаты исследования позволяют в перспективе обеспечить эффективность виброзащиты колеблющихся машин, механизмов и объектов инфраструктуры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вибрация, виброускорение, виброзащита, демпфирование, виброизолятор, мост, путепровод, пролетное строение, гаситель колебаний, инерционная масса

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность за нелегкий труд и экспертное мнение рецензентам, работавшим с данной статьей.

Статья поступила в редакцию 23.10.2024; одобрена после рецензирования 02.12.2024; принята к публикации 16.12.2024.

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: Кочергин В.И., Глушков С.П., Абраменков Д.Э. Применение динамических гасителей колебаний для виброзащиты мостовых сооружений // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 960-971. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-960-971>

© Кочергин В.И., Глушков С.П., Абраменков Д.Э., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-960-971>
EDN: DJUFWK

APPLICATION OF DYNAMIC VIBRATION DAMPERS FOR VIBRATION PROTECTION OF BRIDGE STRUCTURES

Victor I. Kochergin ✉, Sergey P. Glushkov, Dmitrij E. Abramnikov
Siberian Transport University,
Novosibirsk, Russia
vkplus2011@yandex.ru
✉ corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The increase in traffic intensity and the prospects for the development of high-speed railway transport require solving the problem of the effectiveness of vibration protection of transport infrastructure facilities by developing innovative solutions. Currently, the issues of combating vibration in relation to the span structures of bridges and overpasses are insufficiently studied. The purpose of the work is to study the promising directions of vibration protection of bridge structures based on the use of dynamic vibration dampers.

Research methodology. To achieve the goal of research and implementation of effective technical solutions in the field of vibration protection of bridge structures improved design of dynamic vibration damper is proposed in which inertial mass is fixed on two springs, upper of which is connected to structure protected from vibration, and lower spring - to base or foundation of object. Oscillations are damped due to oscillations in antiphase due to free and forced oscillations of auxiliary inertial masses protected from vibrations. This technical solution makes it possible to balance forces of elastic interaction of damping device and object protected against vibration and moments from these forces.

Results. As a result of experimental studies of the prototype of the improved dynamic vibration damper installed on the vibration stand, it was found that the vibration levels in all directions significantly decreased, including in the vertical direction by 5.7 times.

Discussion and conclusion. The obtained positive results of experiments and the relative simplicity of the proposed design make it possible to propose this method of vibration protection of superstructures for both newly designed and already in operation facilities. It is especially important to minimize the possibility of resonant phenomena and pitching. The results of the study will make it possible in the future to ensure the effectiveness of vibration protection of oscillating machines, mechanisms and infrastructure facilities.

KEYWORDS: vibration, vibration acceleration, vibration protection, damping, vibration isolator, bridge, overpass, superstructure, vibration damper, inertial mass

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors express their gratitude for the hard work and expert opinion of the reviewers who worked with this article.

The article was submitted: 23.10.2024 approved after reviewing: 02.12.2024; accepted for publication: 16.12.2024.

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. Kochergin V.I., Glushkov S.P., Abramnikov D.E. Application of dynamic vibration dampers for vibration protection of bridge structures. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): 960-971. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-960-971>

© Kochergin V.I., Glushkov S.P., Abramnikov D.E., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Вибрации, вызванные работой машин и механизмов или движением подвижного состава автомобильного и железнодорожного транспорта, при продолжительном воздействии не только негативно влияют на самочувствие и здоровье людей, но и наносят существенный вред объектам инфраструктуры, поэтому в настоящее время развиваются методы виброзащиты фундаментов зданий и сооружений [1]. Особое значение решение данной проблемы путем разработки инновационных решений приобретает в связи с повышением интенсивности дорожного движения, развития метрополитенов и перспективных планов развертывания высокоскоростной сети железных дорог. Помимо защиты фундаментов от вибрации актуальным и малоизученным вопросом является вибрационная защита мостовых сооружений.

Многочисленные результаты теоретических и экспериментальных исследований, представленные в трудах российских и зарубежных ученых, подтверждают, что при проезде транспортных средств в дорожных конструкциях автомобильных дорог по причине наличия неровностей дорожных покрытий возникают вынужденные колебания. Они вызывают знакопеременные вертикальные перемещения дорожной одежды, приводящие в свою очередь к возникновению свободных затухающих колебаний. Данная проблема представляет научный интерес и требует поиска путей уменьшения отрицательного воздействия вибраций [2, 3, 4, 5]. Совместное влияние динамической нагрузки от проезжающих автомобилей и периодического изменения климатических показателей может служить причиной появления изгибающих и растягивающих напряжений во всех слоях дорожной одежды и возникновения трещин в том случае, когда растягивающие напряжения в слоях дорожного полотна выше допустимых значений прочностных характеристик растяжения материалов дорожного покрытия [6]. При этом вид и техническое состояние дорожного покрытия существенно влияют на уровень распространяющихся в окружающую среду вибраций, особенно увеличивающихся при движении большегрузных автомобилей. Вибрационные воздействия не только вызывают повреждение дорожного покрытия, но также ввиду влияния неровностей дороги на продолжительность контакта между колесом транспортного средства и дорожным покрытием оказывают влияние на из-

нос шин подвижного состава автомобильного транспорта и безопасность движения [7, 8].

Аналогичным образом необходимо бороться с возникновением вибраций и шума и при развитии железнодорожной инфраструктуры. Локальные неровности железнодорожного пути оказывают динамическое вибрационное воздействие на прилегающий грунт и строительные конструкции зданий, приводят к дискомфорту пассажиров, а также сокращают срок службы путей и подвижного состава и в некоторых случаях могут приводить к авариям [9]. При этом если для создания математической модели динамического деформирования конструкции автомобильных дорог под воздействием подвижной нагрузки преимущественно рассматриваются плоские элементы, обладающие определенными вязкоупругими свойствами, то для оценки динамического поведения верхнего строения железнодорожного пути возможно его представление как плоского элемента для без балластных путей [10] либо анализ динамических реакций шарнирно опертой балки от действия совокупности сосредоточенных сил, представляющих собой общий вес состава, приведенного к отдельным колесным парам [9]. Длительное нагружение рельсового пути как механической системы сопровождается накоплением повреждений элементов колебательной системы, при этом учет влияния вибрационных процессов, сопровождающих взаимодействие железнодорожного пути и колесных пар, должен основываться на анализе случайного характера колебательных процессов.

Вопросы борьбы с вибрацией по отношению к пролетным сооружениям мостов и путепроводов в настоящее время являются недостаточно изученными. Доказано, что существенное увеличение нагрузок на мосты по сравнению с проектными значениями при современной интенсивности движения приводит к увеличению вибраций, снижению усталостной прочности металла и появлению дефектов в пролетных строениях, связанных с образованием трещин, сколов, уменьшением рабочей площади значимых элементов и т. д., но исследования в области прогрессирующих разрушений мостовых сооружений в широком объеме практически не проводятся [11]. Известные методы определения месторасположения и параметров раскрытия трещин пролетных конструкций, основанные на анализе изменения частотных характеристик собственных колебаний моста под воздействием вибрационных нагрузок, как прави-

ло, не предполагают разработку проектных и конструктивных решений по минимизации негативного воздействия вибраций [12, 13]. В связи с этим целью данной работы является исследование перспективных направлений виброзащиты мостовых сооружений на основе применения динамических гасителей колебаний.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: обосновать необходимость обеспечения вибрационной защиты мостовых сооружений и определить приоритетные стратегические направления теоретических и экспериментальных исследований совершенствования методов виброзащиты объектов инфраструктуры; оценить основные технические противоречия, характерные для использования демпфирующих виброзащитных устройств, и предложить пути их устранения; разработать усовершенствованную конструкцию динамических гасителей колебаний и выполнить экспериментальные исследования эффективности применения динамических гасителей колебаний; определить основные направления дальнейших исследований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретические и экспериментальные исследования совершенствования методов виброзащиты объектов инфраструктуры должны обладать некоторой степенью универсальности, то есть быть пригодными как при проектировании новых мостовых сооружений, так и для модернизации эксплуатируемых мостов. В первую очередь к таким перспективным направлениям относится использование различных методов демпфирования, в настоящее время недостаточно широко используемых в мостостроении. Наиболее целесообразным при этом является применение пассивных систем виброзащиты, в качестве которых могут выступать упругие виброизоляторы либо вязкостные амортизаторы, причем опыт эксплуатации классических упругих виброизоляторов на основе резиновых или полимерных упругих элементов показал, что они сложны в настройке на заданный диапазон вынужденных колебаний и обладают недостаточной эксплуатационной надежностью. Вязкостные характеристики демпфирующей жидкости гидравлических амортизирующих устройств позволяют рассеивать энергию колебаний защищаемой конструкции и генерировать колебания демпфера, не совпадающие по фазе с входным смещением [14]. Однако ряд недо-

статков гидравлических систем виброзащиты (большие трудозатраты на обеспечение надежной эксплуатации, зависимость от температурных условий и сейсмической активности) не позволяют обеспечить широкие перспективы их практического применения. С точки зрения надежности, удобства обслуживания и экономической эффективности наиболее перспективным следует считать разработку методов снижения вибрационной нагрузки путем использования пружинных динамических гасителей колебаний (ДГК), представляющих собой колеблющиеся совместно с основными демпфирующими упругими элементами подвешенные на пружинах инерционные массы. Гашение колебаний при этом производится за счет колебаний в противофазе свободным и вынужденным колебаниям виброзащищаемого объекта вспомогательных инерционных масс, составляющих от 5 до 20% массы защищаемой системы. Наиболее известным ранним успешным опытом применения таких устройств для уменьшения сильных колебаний лондонского пешеходного моста была гибридная система, состоящая из пассивного вязкостного демпфера и ДГК [15].

Для эффективного гашения динамических откликов мостовых конструкций динамическими гасителями колебаний необходима оптимизация параметров диапазона их рабочих частот и величины коэффициента демпфирования, а также обеспечение невыхода колебательной системы в резонансный режим [16]. Примером использования оптимально настроенной системы динамических гасителей колебаний может являться мост в г. Волгограде, где по результатам расчетов форм собственных колебаний пролетных строений в середине каждого пролета установлены адаптивные массовые демпферы [17].

В идеале виброзащитное устройство должно обладать двумя противоречивыми свойствами: иметь минимальную жесткость для надежной защиты от вибраций и одновременно обладать достаточной суммарной жесткостью в целях гарантированного обеспечения ограничения перемещений защищаемого от вибрации объекта. В итоге сумма сил упругого взаимодействия демпфирующего устройства и виброзащищаемой конструкции, а также сумма моментов данных сил по отношению ко всем трем осям координат, должны уравновешиваться в любой текущий момент времени при работе виброзащиты в заданном диапазоне рабочих частот колебаний. Наиболее полно данным условиям могут удовлетворять вибро-

защитные системы, обладающие характеристиками так называемой квазиулево́й жесткости, то есть демпферы или иные устройства, имеющие в силовых характеристиках горизонтальные участки суммарной жесткости, стремящейся к нулю. Данные типы виброзащитных устройств получают в последнее время широкое распространение в различных сферах, начиная защитой от вибраций операторов машин и механизмов и заканчивая виброизоляцией энергетических установок и инфраструктурных объектов [18, 19, 20, 21, 22].

Динамические гасители колебаний также следует отнести к устройствам данного типа, однако традиционные конструкции ДГК в виде подвешенного на пружине груза обладают рядом недостатков, заключающихся в сложности подбора параметров гасителей колебаний в целях избежания попадания в диапазон резонансных частот. Это связано с тем, что на переходных режимах возможно развитие амплитуд колебаний инерционной массы гасителя, в том числе в перпендикулярных вектору основных колебаний направлениях, превышающих их значения в рабочей зоне. В связи с этим предлагается для защиты от вибраций машин, механизмов и пролетных строений усовершенствованная конструкция ДГК, где инерционная масса закреплена на двух пружинах, верхняя из которых связана с защищаемой от вибрации конструкцией, а вторая, нижняя пружина, – с основанием или фундаментом объекта.

Расчетная схема предлагаемой конструкции динамического гасителя колебаний приведена на рисунке 1, где C_1 и C_2 – величины жесткости верхней и нижней пружин инерционной массы; h_1 , h_2 , h_3 – коэффициенты демпфирования; m_0 и m_1 – соответствующие значения масс защищаемого от вибрации объекта и дополнительной инерционной массы ДГК; F_0 – внешнее усилие, вызывающее возникновение колебаний; y_0 и y_1 – амплитуды перемещений объекта защиты и инерционной массы ДГК. Такое техническое решение обеспечивает благодаря колебаниям в противофазе инерционной массы при совместном движении всех элементов колебательной системы эффективное гашение колебаний и гарантированную компенсацию суммарной жесткости упругих элементов при виброзащите различных машин и механизмов [23].

Данный подход может обеспечить эффективную защиту от вибраций и по отношению к пролетным строениям мостов и путепроводов. В этом случае для снижения вибрации между настилом моста и опорами необходима установка набора динамических гасителей

колебаний предлагаемой конструкции, позволяющих синхронно передавать воздействующие на верхнюю пружину ДГК усилия через периодические усилия деформации нижней пружины на основание или фундамент виброизолирующего устройства. При этом если рассматривать пролетное строение как лежащую на опорах балку с наличием эксцентриситета опор, то при отклонениях конструкции моста в процессе движения по нему подвижного состава данный эксцентриситет может привести к вращению краев балки и, как следствие, возникновению дополнительных силовых воздействий в горизонтальном направлении. Это означает, что в идеале ДГК следует размещать таким образом, чтобы оси крепления демпферов пересекались как можно ближе к центру масс балки моста с целью совмещения центра тяжести моста и оси воздействия демпфирующих усилий [24].

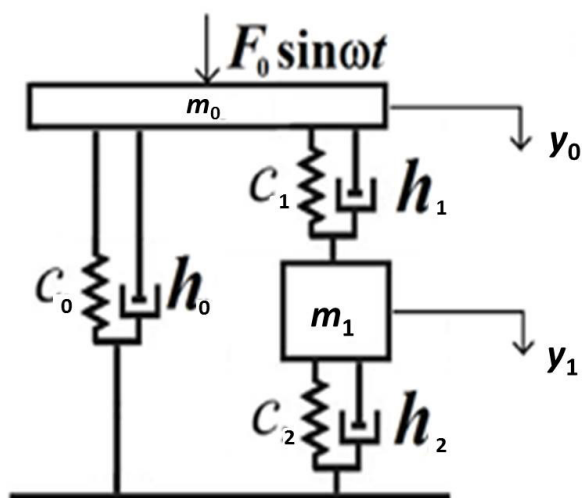


Рисунок 1 – Расчетная схема предлагаемой конструкции динамического гасителя колебаний
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Design diagram of the proposed design of the dynamic vibration damper
Source: compiled by the authors.

На рисунке 2 приведен один из вариантов схемы размещения системы гасителей колебаний мостового сооружения [24]. Здесь C_d – коэффициент демпфирования; e – эксцентриситет опор; x_d и y_d – горизонтальные и вертикальные координаты положения ДГК; $F_r(t)$ и $F_{r\pm 1}(t)$ – силовые воздействия в горизонтальном направлении вследствие перемещения нагрузки по r -й оси при движении поезда со скоростью v ; Y – центр масс балки моста.

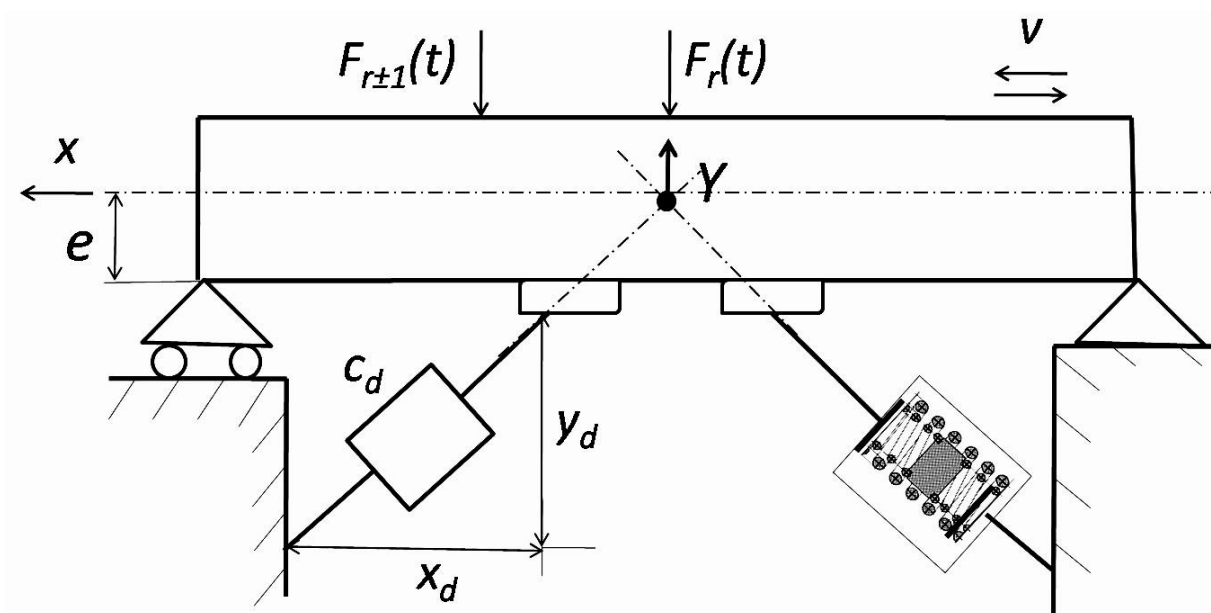


Рисунок 2 – Схема размещения системы гасителей колебаний мостового сооружения
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Layout of the bridge structure vibration damper system
Source: compiled by the authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальная установка, общий вид которой представлен на рисунке 3, представляет собой макетный образец динамического гасителя колебаний с четырьмя основными пружинными демпфирующими элементами и дополнительной инерционной подпружиненной массой, установленного на вибростенде. Роль объекта защиты (например, пролетного строения моста) здесь выполняет металлический прямоугольный стол, а источником возбуждения вибрации является вибростенд, стол которого может колебаться от движения эксцентрика, связанного с движением ременной передачи от трехфазного асинхронного двигателя.

Масса груза при проведении экспериментов составляла 20 кг, жесткость основных (несущих) пружин $C_0 = 6,12$ кН/м, жесткость верхней пружины подвески инерционной массы $C_1 = 0,93$ кН/м, нижней $C_2 = 0,47$ кН/м. В экс-

периментальной установке использовались 4 несущие пружины, следовательно, суммарная жесткость основных упругих элементов ΣC_0 равняется 24,48 кН/м.

Эффективность снижения колебаний виброзащитным устройством в стационарных режимах определяется коэффициентом виброизоляции, характеризующим долю передаваемого динамического воздействия от возмущающей нагрузки на защищаемую конструкцию. Необходимая величина коэффициента виброизоляции μ обеспечивается подбором характеристик жесткости упругих элементов и может быть определена на основании следующей зависимости:

$$\mu = \sqrt{\frac{1 + 4\gamma^2 \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)}{\left[1 - \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2\right]^2 + 4\gamma^2 \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)}}$$



Рисунок 3 – Общий вид экспериментальной установки
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – General view of the pilot plant
Source: compiled by the authors.

В приведенном выражении $\omega_0 = \sqrt{\frac{C_0 + C_1}{m_0}}$ – частота собственных колебаний мостового сооружения с установленным ДГК; $\omega = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{m_1}}$ – частота свободных колебаний динамического гасителя; γ – коэффициент демпфирования.

Измерения вибрационных характеристик проводились с помощью анализатора шума и вибраций «АССИСТЕНТ» (сертификат RU.C.36.002.A № 34059). Фиксировались уровни виброускорений локальной вибрации V_{ha} по осям Z, Y, X в дБ в октавных полосах от 8 до 1000 Гц, полученные логарифмические значения уровней виброускорений в дБ впоследствии переводились в m/s^2 . Усредненные результаты измерений во временном интервале от начала вибрационного процесса до его затухания после выключения вибростенда, сопровождающегося резонансными явлениями, представлены в таблице.

Измерения уровней локальной вибрации в процессе проведения экспериментов про-

изводились в трех режимах: с основными пружинными элементами без ДГК; с инерционной массой ДГК, подвешенной только на верхней пружине; с инерционной массой ДГК, закрепленной на верхней и нижней пружинах. Усредненные результаты измерений во временном интервале от начала вибрационного процесса до его затухания после выключения вибростенда, сопровождающегося резонансными явлениями, представлены в таблице.

Установлено, что уровни локальных значений виброускорений при использовании динамического гасителя существенно снижаются. При этом вибрации в вертикальном направлении по оси Z, что особенно важно для обеспечения виброзащиты объектов инфраструктуры, выраженные в m/s^2 , снизились при использовании ДГК с подвешенной на одной верхней пружине инерционной массой в 1,5 раза, а в случае установки инерционной массы на верхней и нижней дополнительной пружине уже в 5,7 раз.

Таблица

Результаты измерения локальных уровней виброускорения

Источник: составлено авторами.

Table

Results of measurement of local vibration acceleration levels

Source: compiled by the authors.

Режим измерения вибрации	V _{naZ}		V _{naY}		V _{naX}	
	дБ	м/с ²	дБ	м/с ²	дБ	м/с ²
Без ДГК	115,7	0,63	114,5	0,53	111,4	0,37
ДГК с верхней пружиной инерционной массы	112,3	0,42	114,4	0,52	114,2	0,52
ДГК с верхней и нижней пружинами инерционной массы	100,9	0,11	93,7	0,048	98,6	0,085

ОБСУЖДЕНИЕ

Увеличение интенсивности движения автомобильного и железнодорожного транспорта в сочетании с недостаточным качеством дорожных покрытий и рельсовых путей вызывают острую необходимость анализа параметров возникающих при движении подвижного состава вибраций и разработки технических мероприятий по борьбе с их негативным влиянием на объекты инфраструктуры. Особенно важным поиск путей решения данной проблемы является для виброзащиты мостовых сооружений, подверженных рискам возникновения усталостных трещин и резонансных явлений, приводящих к разрушению пролетных строений мостов и путепроводов. Методы демпфирования, способные реализовать такую защиту, применяются в настоящее время ограниченно и, как правило, достаточно сложны в эксплуатации и обладают недостаточной надежностью.

Результаты проведенных экспериментальных исследований с использованием макетного образца ДГК, установленного на вибростенде, показали, что применение динамических гасителей колебаний является перспективным направлением виброзащиты мостовых сооружений. Полученные положительные результаты по снижению уровней виброускорений по всем осям измерения вибрации при использовании ДГК и относительная простота конструкций с дополнительными подпружиненными инерционными массами позволяют предложить данный метод виброзащиты пролетных строений как для вновь проектируемых мо-

стов, так и для уже находящихся в эксплуатации объектов. Наиболее оптимальным следует считать размещение ДГК ближе к центру масс (центру тяжести) балки моста, так как в этом случае обеспечивается наибольшая эффективность демпфирования.

Эксперименты проводились в трех возможных режимах виброзащиты: без ДГК; с использованием ДГК с подвешенной только на верхней пружине инерционной массой; с ДГК, инерционная масса которого связана с защищаемым объектом и основанием посредством верхней и нижней пружин. В результате измерений уровней локальной вибрации установлено, что применение динамических гасителей колебаний может в разы снизить уровень вибрационной нагрузки. При этом отмечается, что для классической конструкции ДГК с колеблющейся в противофазе основным колебаниям объекта виброзащиты инерционной массой, подвешенной только на верхней пружине, характерным является снижение вибраций в вертикальном направлении по оси Z, но в процессе затухания колебаний при выключении стенда в результате кратковременного возникновения резонанса и галопирования инерционной массы увеличивается вибрационная нагрузка в горизонтальных направлениях по осям X и Y. Данный недостаток компенсируется в предлагаемом варианте вибрационной защиты, когда инерционная масса гасителя колебаний устанавливается на верхней и нижней пружинах, причем нижний упругий элемент подвески инерционной массы обладает меньшей жесткостью.

Таким образом, проведенные для достижения поставленной цели исследования подтвердили, что предлагаемые технические решения по использованию усовершенствованной конструкции ДГК являются эффективным и перспективным методом обеспечения виброзащиты колеблющихся машин, механизмов и объектов инфраструктуры. Можно с высокой степенью уверенности прогнозировать, что методы виброзащиты на основе использования динамических гасителей колебаний найдут широкое применение в транспортной отрасли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Повышенные нагрузки на мосты по сравнению с проектными значениями при современной интенсивности движения и наличии неровностей дорожных покрытий и рельсовых путей приводят к увеличению вибраций, снижению усталостной прочности металла и появлению дефектов в пролетных строениях, что требует обеспечения вибрационной защиты мостовых сооружений. Приоритетными стратегическими направлениями теоретических и экспериментальных исследований совершенствования методов виброзащиты объектов инфраструктуры следует считать применение пассивных систем виброзащиты в виде упругих виброизоляторов или вязкостных амортизаторов, причем наиболее перспективным с точки зрения надежности, удобства обслуживания и экономической эффективности является использование пружинных динамических гасителей колебаний.

2. Основным техническим противоречием, характерным при использовании демпфирующих виброзащитных устройств, является одновременное обеспечение минимальной жесткости (для защиты от вибраций) и достаточной суммарной жесткости демпфера для ограничения перемещений защищаемого от вибрации объекта. Наиболее перспективным путем устранения данного противоречия может служить применение виброзащитных систем, обладающих квазиулевым жесткостью.

3. Разработана расчетная схема и конструкция усовершенствованного динамического гасителя колебаний с инерционной массой, закрепленной на двух пружинах, верхняя из которых связана с защищаемым от вибрации объектом, а вторая, нижняя пружина, — с его основанием или фундаментом. Выполнены экспериментальные исследования эффективности применения динамических гасителей колебаний усовершенствованной и

традиционной конструкций, показавшие, что уровни локальных значений виброускорений при использовании ДГК существенно снижаются, при этом использование предлагаемой конструкции с подвеской инерционной массы на двух пружинах обеспечивает наиболее полное гашение колебаний.

4. Основными направлениями дальнейших исследований являются разработка методики выбора характеристик упругости упругих элементов динамических гасителей колебаний и исследования более компактного варианта предлагаемой конструкции демпфирующего устройства с соосным расположением единичного основного упругого элемента и подпружиненной инерционной массы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Козлова Н.А., Мишина В.М. О методах виброзащиты фундаментов зданий в условиях города // Наука, образование и экспериментальное проектирование. 2020. № 1. С. 208–210. DOI: 10.24411/9999-034A-10044.
2. Колмогоров Г.Л., Кычкин В.И., Есипенко И.А. Динамическая реакция дорожной одежды на действие движущейся нагрузки // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2015. № 5. С. 39–47.
3. Agostinacchio M., Ciampa D., Olita S. The vibrations induced by surface irregularities in road pavements – a Matlab® approach // European Transport Research Review. 2014; 6: 267–275. DOI 10.1007/s12544-013-0127-8.
4. Осинковская В.А. Прогнозирование долговечности асфальтобетонных покрытий на основе уровней их виброн нагруженности // Наука и техника. 2015. № 6. С. 49–53.
5. Czech K. R. The impact of the type and technical condition of road surface on the level of traffic-generated vibrations propagated to the environment // Procedia Engineering. Advances in Transportation Geotechnics 3. 2016; 143: 1358–1367. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.160.
6. Сафонов Р.А. Типичные дефекты верхнего дорожного покрытия в России // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2020. Т. 20, № 2. С. 75–84. DOI: 10.14529/build200210.
7. Sun M., Nguyen V. Vibration influence of different types of heavy-duty trucks on road surface damage // Maintenance, reliability and condition monitoring. 16 December 2022; 2669–2961. URL: <https://www.researchgate.net/publication/367325762>. DOI: 10.21595/marc.2022.23020.
8. Žuraulis V., Levulytė L., Sokolovskij E. The impact of road roughness on the duration of contact between a vehicle wheel and road surface // Transport. 2014; 29(4): 431–439. DOI: 10.3846/16484142.2014.984330.
9. Локтев А.А., Илларионова Л.А. Моделирование влияния неровностей железнодорожного

пути на распространение вибраций // Транспорт Российской Федерации. 2024. № 2 (111). С. 39–41.

10. Илларионова Л.А., Локтев А.А., Боков С.С. Динамическое воздействие на вязко-упругую плиту основания городского транспорта // Наука и техника транспорта. 2023. № 1. С. 52–56.

11. Локтев А.А., Баракат А. Анализ поведения пролетных строений с трещинами при вибрациях // Транспортные сооружения. 2022. Т. 9, № 3. URL: <https://t-s.today/PDF/04SATS322.pdf>. DOI: 10.15862/04SAT322.

12. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Майстренко И.Ю., Кокодеев А.В. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин // Транспортные сооружения. 2017. Т. 4, № 4. URL: <https://t-s.today/PDF/14TS417.pdf>. DOI: 10.15862/14TS417.

13. Локтев А.А., Королев В.В., Шишкина И.В. Особенности оценки состояния и поведения низководных мостов // Вестник ВНИИЖТ. 2021. Т. 80, № 6. С. 334–342. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-6-334-342>.

14. Castaldo P. Passive energy dissipation devices // Integrated seismic design of structures and Control systems. November 2014: 21–62. DOI: 10.1007/978-3-319-02615-22.

15. Dallard P. et al. Millennium Bridge, London: Problems and solutions // Structural Engineer. Project: London Millennium Pedestrian Bridge. January 2001; 79(8): 15–17.

16. Liu, K., Liu, J. The damped dynamic vibration absorbers: revisited and new result // Journal of Sound and Vibration. 2005; 284 (3-5): 1181–1189. DOI:10.1016/j.jsv.2004.08.002.

17. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Филиппова В.О. Танцующий мост в Волгограде: причины, аналогии, мероприятия. Часть 2. Аналогии, мероприятия // Наукоедение. 2015. Т. 7, № 6. С. 1–21. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/08KO615.pdf>. DOI: 10.15862/08KO615.

18. Корытов М.С., Кашапова И.Е., Щербakov В.С. Методика оптимизации основных параметров виброзащитной системы сиденья автогрейдера с квазиулеговой статической характеристикой // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 2. С. 180–193. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-180-193>.

19. Zhang W., Qian Ch., Pan L., Wang Y., Xu N. Design and research of a closed active quasi-zero stiffness vibration isolation device // Journal of precision instrument and machinery. 2022; 2, vol. 1: 18–24. DOI: 10.23977/jpim.2022.020103.

20. Klitnoi V, Gaydamaka A. On the problem of vibration protection of rotor systems with elastic adaptive elements of quasi-zero stiffness // Diagnostyka. 2020; 21(2): 69–75. DOI: 10.29354/diag/122533.

21. Зотов А.Н., Креминский Д.А. Равночастотная виброизолирующая система на основе упругого элемента, перемещающегося между направляющими расчетной формы перпендикулярно их оси симметрии // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2020. № 3. С. 87–91. DOI: 10.24411/0131-4270-2020-10316.

22. Глушков С.П., Кочергин В.И. Применение устройств с квазиулеговой жесткостью для виброзащиты машин и механизмов // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 3. Ч. 1. С. 113–119. DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.65.3.030>.

23. Глушков С.П., Кочергин В.И. Новые подходы к обеспечению виброзащиты машин // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2022. № 1 (4). С. 41–47. DOI: 10.52170/2712-9195/2022_1_41.

24. Глушков С.П., Кочергин В.И., Проворная Д.А. Снижение колебаний мостовых сооружений // Вестник СГУПС. 2022. № 4 (63). С. 77–85. DOI: 10.52170/1815-9265_2022_63_77.

REFERENCES

1. Kozlova N.A., Mishina V.M. About methods of vibration protection of the buildings' foundations in a city. *Nauka, obrazovanie i eksperimental'noe proektirovanie*. 2020; 1: 208–210. (in Russ.) DOI: 10.24411/9999-034A-10044.

2. Kolmogorov G.L., Kychkin V.I., Esipenko I.A. Dynamic response of pavement to the action of moving load. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2015; 5: 39–47. (in Russ.)

3. Agostinacchio M., Ciampa D., Olita S. The vibrations induced by surface irregularities in road pavements – a Matlab® approach. *European Transport Research Review*. 2014; 6: 267–275. DOI 10.1007/s12544-013-0127-8.

4. Osinovskaya V.A. Forecasting of durability of asphalt pavement on the basis of levels of their vibration loading. *Science & Technique*. 2015; (6): 49–53. (In Russ.)

5. Czech K.R. The impact of the type and technical condition of road surface on the level of traffic-generated vibrations propagated to the environment. *Procedia Engineering. Advances in Transportation Geotechnics* 3. 2016; 143: 1358–1367. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.160.

6. Safonov R.A. Typical paving defects in Russia. *Bulletin of the South Ural state university. Series Construction Engineering and architecture*. 2020; 20, vol. 2: 75–84. DOI: 10.14529/build200210. (in Russ.)

7. Sun M., Nguyen V. Vibration influence of different types of heavy-duty trucks on road surface damage. *Maintenance, reliability and condition monitoring*. 16 December 2022; 2669–2961. URL: <https://www.researchgate.net/publication/367325762>. DOI: 10.21595/marc.2022.23020.

8. Žuraulis V., Levulytė L., Sokolovskij E. The impact of road roughness on the duration of contact between a vehicle wheel and road surface. *Transport*. 2014; 29(4): 431–439. DOI:10.3846/16484142.2014.984330.

9. Loktev A.A., Illarionova L.A. Modeling the Influence of Local Irregularities of the Railway Track on Vibration Propagation. *Transport of the Russian Federation*. 2024; (2): 39–41. (In Russ.)

10. Illarionova L.A., Loktev A.A., Bokov S.S. Dynamic Impact of Crew on Viscoelastic Base Plate of Urban Transport. *Science and Technology in Transport*. 2023; (1): 52–56. (In Russ.) EDN: CHMOKL

11. Loktev A.A., Barakat A. Behavior analysis of span structures with cracks during vibrations. *Russian journal of transport engineering*. 2022; 9, vol. 3. (in Russ.) URL: <https://t-s.today/PDF/04SATS322.pdf>. DOI: 10.15862/04SAT322.
12. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Majstrenko I.YU., Kokodeev A.V. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 1. *Russian journal of transport engineering*. 2017; 4, vol. 4. URL: <https://t-s.today/PDF/14TS417.pdf>. DOI: 10.15862/14TS417.
13. Loktev A.A., Korolev V.V., Shishkina I.V. Features of assessing the condition and behavior of low-water bridges. *RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL*. 2021; 80(6): 334–342. (In Russ.) <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-6-334-342>
14. Castaldo P. Passive energy dissipation devices. *Integrated seismic design of structures and Control systems*. November 2014: 21–62. DOI: 10.1007/978-3-319-02615-22.
15. Dallard P. et al. *Millennium Bridge, London: Problems and solutions*. Structural Engineer. Project: London Millennium Pedestrian Bridge. January 2001; 79(8): 15–17.
16. Liu, K., Liu, J. The damped dynamic vibration absorbers: revisited and new result. *Journal of Sound and Vibration*. 2005; 284 (3-5): 1181–1189. DOI:10.1016/j.jsv.2004.08.002.
17. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Filippova V.O. Dancing bridge in Volgograd: reasons, analogies, measures. Part 1. Reasons. *Naukovedenie*. 2015; 7, vol. 6: 1–21. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/08KO615.pdf>. DOI: 10.15862/08KO615.
18. Korytov M.S., Kashapova I.E., Shcherbakov V.S. Optimization method for main parameters of vibration protection system in motor grader seat with quasi-zero static characteristic. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(2): 180–193. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-180-193>. EDN: WKLVO
19. Zhang W., Qian Ch., Pan L., Wang Y., Xu N. Design and research of a closed active quasi-zero stiffness vibration isolation device. *Journal of precision instrument and machinery*. 2022; 2, vol. 1: 18 – 24. DOI: 10.23977/jpim.2022.020103.
20. Klitnoi V, Gaydamaka A. On the problem of vibration protection of rotor systems with elastic adaptive elements of quasi-zero stiffness. *Diagnostyka*. 2020; 21(2): 69–75. DOI: 10.29354/diag/122533.
21. Zotov A.N., Kreminsky D.A. Equal frequency vibration isolating system based on an elastic element moving between the guides of the calculated shape perpendicular to their axis of symmetry. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2020; no. 3: 87–91. DOI:10.24411/0131-4270-2020-10316
22. Sergey P. Glushkov, Victor I. Kochergin. Use of devices with quasi-zero stiffness for vibration protection of machines and mechanisms, Marine intellectual technologies. 2024; 3 part 1: P. 113–119. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.030
23. Glushkov S.P., Kochergin V.I. New approaches to vibration protection of machines. *Fundamental and Applied Transport Issues*. 2022; 1 (4): 41–47. DOI: 10.52170/2712-9195/2022_1_41. (in Russ.)
24. Glushkov S.P., Kochergin V.I., Provornaya D.A. Reduction of vertical acceleration bridge structure. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2022; (63): 77–85. (In Russ.). DOI: 10.52170/1815-9265_2022_63_77.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Кочергин В.И. Организация и проведение экспериментов, обработка экспериментальных данных, подготовка материала для статьи.

Глушков С.П. Формулирование теоретических предпосылок, цели и задач исследования, разработка методики проведения исследования.

Абраменков Д.Э. Организация и проведение экспериментов.

CO-AUTHORS' CONTRIBUTION

Glushkov S.P. Formulation of theoretical prerequisites, goals and objectives of the study, development of the research methodology

Kochergin V.I. Organization and conduct of experiments, processing of experimental data, preparation of material for the article

Abramenkov D.E. Organization and conduct of experiments

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кочергин Виктор Иванович – д-р техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения (630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4883-1458>,

SPIN-код: 2949-7253,

e-mail: vkplus2011@yandex.ru

Глушков Сергей Павлович – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин» Сибирского государственного университета путей сообщения (630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5745-4658>,

SPIN-код: 3313-6164,

e-mail: rcpl.glushkov@yandex.ru

Абраменков Дмитрий Эдуардович – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Здания, строительные конструкции и материалы» Сибирского государственного университета путей сообщения (630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7939-6014>,

SPIN-код: 3329-5595,

e-mail: abramenkovde@sgups.stu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktor I. Kochergin – Dr. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department “Technology of Transport Engineering and Operation of Machines” Siberian Transport University (191, Dusi Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4883-1458>,

SPIN-code: 2949-7253,

e-mail: vkplus2011@yandex.ru

Sergey P. Glushkov – Dr. of Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department “Technology of Transport Engineering and Operation of Machines” Siberian

Transport University (191, Dusi Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5745-4658>,

SPIN-code: 3313-6164,

e-mail: rcpl.glushkov@yandex.ru

Dmitrij E. Abramenzkov – Dr. of Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department “Buildings, Structures and Materials” Siberian Transport University (191, Dusi Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7939-6014>,

SPIN-code: 3329-5595,

e-mail: abramenzkovde@sgups.stu.ru

Научная статья

УДК 625.71

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-972-983>

EDN: JBGKHN



ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАТОРФОВАННЫХ ГРУНТОВ ПРИ УПЛОТНЕНИИ И ПРОМОРАЖИВАНИИ

И.С. Кузнецов ✉, **В.В. Сиротюк**, **П.В. Орлов**, **В.Н. Кузнецова**

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),

г. Омск, Россия

✉ ответственный автор

ilyxa_kyznetsov@vk.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Известно, что обводненные заторфованные грунты преобладают на Севере России и на территории её Арктической зоны. Такие грунты обладают малой несущей способностью, что снижает возможность их использования при строительстве автозимников. Уплотнение (обжимка) заторфованных грунтов изменяет их теплофизические и физико-механические свойства, изменяя режимы промерзания и оттаивания слабых оснований, а также несущую способность сухопутных автозимников на заболоченных территориях. В статье отражены результаты экспериментальных исследований изменения теплофизических и физико-механических показателей заторфованного грунта при разной степени его уплотнения.

Методы и материалы. Для исследований применяли маловлажный грунт с высоким содержанием органического вещества (торфа) более 50%. Его уплотняли нагрузками, величина которых характерна при операциях по уплотнению (обжимке) слабых заторфованных оснований на автозимниках (0,01, 0,03 и 0,06 МПа), и замораживали в камере до температуры минус 15 °С. Контроль температуры осуществляли на различной глубине образца через заданные промежутки времени. Для этого скомпоновали прибор, основными элементами которого являются термодатчики марки DS18B20 и микроконтроллер ArduinoNano. Теплопроводность талого и мёрзлого грунта определяли с помощью зондового прибора МИТ-1. Для определения прочности (твёрдости) образцов использовали динамический плотномер Д-51 и универсальный пенетромметр ПУС-3М.

Результаты. Уточнены свойства исследуемого органического грунта. Определена теплоёмкость этого грунта в зависимости от его влажности, температуры и плотности. Оценено влияние степени уплотнения грунта на кинетику его промораживания. Представлены результаты исследования зависимости условной прочности (твёрдости) грунта при разной температуре и плотности, а также результаты интерпретации результатов динамического зондирования в модуль упругости для исследуемого заторфованного грунта.

Заключение. Уплотнение (обжимка) заторфованного грунта увеличивает его теплопроводность и скорость промерзания верхнего слоя болота, что способствует ускорению ввода автозимника в эксплуатацию. Уплотнение (обжимка) заторфованного грунта значительно увеличивает его прочность при замораживании, что предопределяет увеличение несущей способности автозимников на болотах. Наиболее перспективно использование для оперативного контроля плотности и прочности промороженной торфяной плиты на автозимниках методов динамического зондирования пенетрометрами различной конструкции. Получены результаты определения условного показателя прочности (твёрдости) торфяного грунта с помощью зондирования динамическим плотномером и универсальным пенетромметром.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автозимник, заторфованный грунт, уплотнение, промораживание, теплофизические и механические свойства

Статья поступила в редакцию 05.10.2024; одобрена после рецензирования 29.11.2024; принята к публикации 17.12.2024.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Кузнецов И.С., Сиротюк В.В., Орлов П.В., Кузнецова В.Н., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Кузнецов И.С., Сиротюк В.В., Орлов П.В., Кузнецова В.Н. Изменение теплофизических и механических свойств заторфованных грунтов при уплотнении и промораживании // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 972-983. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-972-983>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-972-983>

EDN: JBGKHJ

CHANGES IN THE THERMOPHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BLOCKED SOILS DURING COMPACTION AND THE PROMOTION

Ilya S. Kuznetsov ✉, Viktor V. Sirotiuk, Pavel V. Orlov, Viktoria N. Kuznetsova

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

✉ corresponding author
ilyxa_kuznetsov@vk.com

ABSTRACT

Introduction. It is known that flooded, blocked soils prevail in the North of Russia and in the territory of its Arctic zone. Such soils have a low bearing capacity, which reduces the possibility of their use in the construction of winter roads. Compaction (crimping) of blocked soils changes their thermophysical and physico-mechanical properties by changing the modes of freezing and thawing of weak bases, as well as the bearing capacity of overland winter trucks in wetlands. The article reflects the results of experimental studies of changes in the thermophysical and physico-mechanical parameters of the blocked soil at different degrees of its compaction.

Methods and materials. Low-moisture soil with a high content of organic matter (peat) of more than 50% was used for research. It was compacted with loads, the magnitude of which is typical for sealing (crimping) operations of weak blocked bases on autosomes (0.01, 0.03 and 0.06 MPa), and frozen in a chamber to a temperature of -15 °C. Temperature control was carried out at different depths at predetermined intervals. To do this, we put together a device, the main elements of which are DS18B20 brand thermal sensors and an Arduino Nano microcontroller. The thermal conductivity of thawed and frozen soil was determined using the MIT-1 probe device. A dynamic density meter D-51 was used to determine the strength (hardness) of the samples and the universal penetrometer PUS-3M.

Results. The properties of the studied organic soil have been clarified. The heat capacity of this soil is determined depending on its humidity, temperature and density. The influence of the degree of soil compaction on the kinetics of its freezing is estimated. The results of the study of the dependence of the conditional strength (hardness) of the soil at different temperatures and densities, as well as the results of the interpretation of the results of dynamic zonation and the modulus of elasticity for the studied blocked soil are presented.

Conclusion. Compaction (crimping) of the blocked soil increases its thermal conductivity and the rate of freezing of the upper layer of the swamp, which helps to accelerate the commissioning of the winter truck. Compaction (crimping) of the blocked soil significantly increases its strength during freezing, which determines an increase in the bearing capacity of autozomers in swamps. The most promising use for operational control of the density and strength of a frozen peat slab on autozomers is dynamic sensing methods with penetrometers of various designs. The results of determining the conditional strength index (hardness) of peat soil using probing with a dynamic density meter and a universal penetrometer are obtained.

KEYWORDS: autozymer, blocked soil, sealing, freezing, thermophysical and mechanical properties

The article was submitted: 05.10.2024 approved after reviewing: 29.11.2024; accepted for publication: 16.12.2024.

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. Kuznetsov I.S., Sirotiuk V.V., Orlov P.V., Kuznetsova V.N. Changes in the thermophysical and mechanical properties of blocked soils during compaction and the promotion. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): 972-983. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-972-983>

© Kuznetsov I.S., Sirotiuk V.V., Orlov P.V., Kuznetsova V.N., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Освоение северных территорий является стратегической задачей для России. Площадь российской Арктики составляет более 5 млн км², протяжённость её морской границы около 20 тыс. км. Для северных территорий нужно обеспечить транзит всех ресурсов, завоз материалов и оборудования, необходимых для создания инфраструктуры, обустройства месторождений полезных ископаемых и населённых пунктов. Строить капитальные дороги в таких сложных климатических и грунтово-гидрологических условиях очень дорого и не всегда целесообразно. Поэтому основной грузопоток в этих регионах идёт по временным дорогам – автозимникам. Протяжённость автозимников в России составляет около 30 тыс. км, по ним перевозятся сотни тысяч тонн грузов. Основным недостаток временных дорог – ограниченные сроки службы (3-4 месяца) и грузоподъёмности. Следовательно, исследования, направленные на улучшение транспортно-эксплуатационных показателей автозимников, являются актуальными^{1,2} [1, 2, 3, 4].

Известно, что обводнённые заторфованные грунты преобладают на Севере России. Они обладают малой несущей способностью, что осложняет их использование при строительстве автозимников. Существует два основных способа технической мелиорации заторфованных грунтов: осушение и уплотнение.

Осушение является трудоёмким процессом на рассматриваемых территориях, поэтому для строительства автозимников его используют редко. Уплотнение (обжимка) заторфованных грунтов изменяет их теплофизические и физико-механические свойства, что, в свою очередь, меняет режимы промерзания и оттаивания слабых оснований, а также несущую способность автозимников на заболоченных территориях. Этому вопросу посвящены многочисленные исследования³ [5, 6, 7, 8].

Для уплотнения заторфованных грунтов рекомендуется использовать технику повышенной проходимости с малым удельным давлением на поверхность. Кроме того, возможно

использование специального навесного оборудования, позволяющего уплотнять грунт по всей ширине автозимника [9, 11, 12, 13].

Цель проведённых исследований – дальнейшее развитие знаний и закономерностей по вопросу технической мелиорации заторфованных грунтов методом уплотнения (обжатия). В статье отражены результаты экспериментальных исследований изменения теплофизических и физико-механических показателей заторфованного грунта при разной влажности и степени его уплотнения, при разной температуре.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для исследований использован грунт, доставленный из карьера у п.г.т. Тевриз в Омской области. Испытания показали, что этот грунт имеет естественную влажность 354%, содержание органических веществ – 89,6%, зольность – 27,3%, показатель pH – 7,0.

В соответствии с ГОСТ 25100–2020 образец относится к органическим грунтам с высоким содержанием органического вещества (торфа) более 50%.

Твёрдое вещество этого торфа состоит из не полностью разложившихся растительных остатков (растительного волокна, продуктов разложения растительных остатков), тёмного бесструктурного вещества (гумуса) и неорганических примесей. Волокнистая часть образует своеобразный структурный каркас, ячейки которого заполнены аморфной массой из продуктов разложения и неорганических примесей.

В соответствии с работой [9] при зольности 20–40% торф следует относить к высокозольным (минерализованным), маловлажным (300–600%), с нейтральной кислотностью.

Для определения динамики изменения теплофизических свойств талого и мёрзлого грунта применяли измеритель теплопроводности материалов «МИТ-1» (рисунок 1), предназначенный для оперативного определения теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов зондовым методом по ГОСТ 30256–94 и ГОСТ Р 71038–2023 (п.6).

¹ Копылов С.В. Особенности нормативно-правовой документации по устройству и эксплуатации автозимников // Транспортные системы и дорожная инфраструктура Крайнего Севера: сборник материалов III Всероссийского форума, Якутск, 29 марта 2022 года. Якутск: Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 2022. С. 273–277.

² Лотышева А.А., Конорева А.А. К вопросу о строительстве и эксплуатации автозимников // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: сборник материалов IV Национальной научно-практической конференции, Омск, 22–23 апреля 2021 года. Омск: СИБАДИ, 2021. С. 699–703.

³ Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах (к СНиП 2.05.02-85). Союздорнии Минтрансстроя СССР. М.: Стройиздат. 1989. 192 с.



Рисунок 1 – Общий вид прибора МИТ-1
Источник: Интерприбор.

Figure 1 – General view of the MIT-1 device
Source: Interpribor.

Принцип действия этого прибора основан на измерении изменения температуры измерительного зонда за определённое время при его нагреве постоянной мощностью.

Перед началом эксперимента в образце грунта высверливали вертикальное отверстие диаметром 6 мм, в которое помещали зонд испытательного прибора. Далее производили включение прибора и выбор предполагаемой теплопроводности материала. Дальнейшие действия по определению теплопроводности прибор выполняет в автоматическом режиме ожидания стабилизации температуры. По окончании измерений на экране прибора высвечивается измеренное значение теплопроводности грунта. Для повышения достоверности полученных результатов измерения повторяли не менее 3 раз, просверливая новое отверстие на расстоянии не менее 30 мм от первого и выжидая 30 мин для стабилизации температуры измерительного зонда. При измерении показателей мёрзлого грунта образец с погруженным зондом выдерживали в морозильной камере не менее 6 ч для формирования однородного температурного поля.

Измерения проводили на образцах грунта разной плотности в талом состоянии и в процессе их промораживания.

Исследования влияния плотности грунта на скорость его промораживания при разных температурах выполняли на образцах размером 400x400x100 мм. Внутреннюю поверхность форм утепляли и укрывали пленкой для обеспечения верхнего промораживания без потери влаги (рисунок 2).

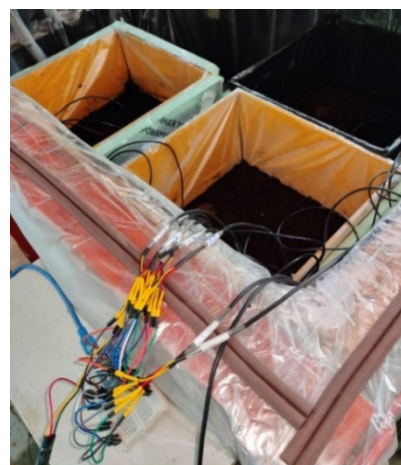


Рисунок 2 – Образцы грунта с подключенными датчиками температуры
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Soil samples with connected temperature sensors
Source: compiled by the authors.

Грунт уплотняли плунжером с 3-кратным приложением нагрузки и выдерживанием её в течение 1 мин. Величину нагрузки назначали исходя из возможностей машин, применяемых при операциях по уплотнению (обжимке) слабых заторфованных оснований на автозимниках (0,01, 0,03 и 0,06 МПа) [10].

Для измерения температур в каждую форму вставляли по три термодатчика. Верхний датчик № 1 располагали на глубине 2 см от поверхности грунта, второй датчик – на глубине 5 см, третий – на глубине 8 см.

Устанавливали по три формы в климатическую камеру, подключали контроллеры и замораживали при температуре до минус 15 °С круглосуточно до стабилизации температуры по всей глубине образца. Фиксировали изменение температуры по глубине каждый час промораживания.

Для контроля температуры образцов скомпоновали специальный прибор, основными элементами которого являются термодатчики марки DS18B20 и микроконтроллер ArduinoNano. Для работы микроконтроллера разработана программа управления с выводом результатов измерения на монитор компьютера.

В процессе промораживания контролировали условный показатель прочности (твёрдости) мёрзлого грунта методом динамического зондирования при помощи динамического плотномера RGK Д-51А (рисунок 3). Этот показатель определяли по количеству ударов гири массой 2500 г, сбрасываемый по стержню высоты 400 мм, до погружения этого конического стержня на глубину 100 мм.

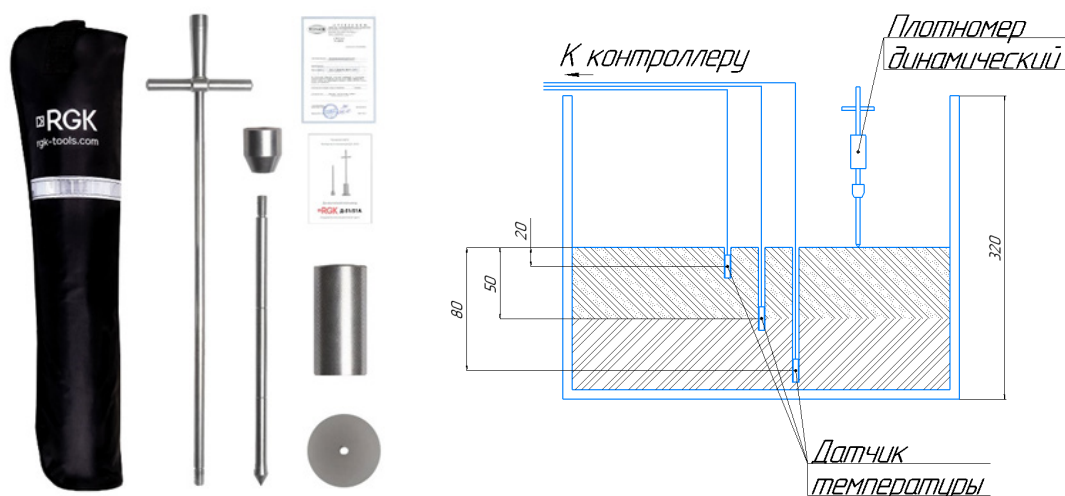


Рисунок 3 – Динамический плотномер RGK Д-51А и схема проведения эксперимента
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Dynamic density meter RGK D-51A and the scheme of the experiment
Source: compiled by the authors.

Динамическое зондирование – процесс погружения зонда в грунт под действием ударной нагрузки с измерением показателей сопротивления грунта внедрению зонда.

Этот метод испытаний относится к классу динамических испытаний грунтов. Он был предложен в начале 20-х годов прошлого столетия и широко применяется в зарубежной практике исследований свойств грунтов [14]. За рубежом разработаны многочисленные нормативы по применению этого метода испытаний грунтов^{4,5,6,7} [15, 16].

В нашей стране метод динамического и статического зондирования грунтов также нашёл широкое распространение⁸ [17, 18] в промышленном и гражданском строительстве. Методы зондирования нормируются в ГОСТРИСО 22476-2–2017 Испытания полевые. Часть 2 Динамическое зондирование

(DP), ГОСТ 19912–2012 Динамическое зондирование грунтов.

В транспортном строительстве этот метод испытаний пока не нормирован. Он применяется для оперативного контроля плотности грунтов в земляном полотне, но требует подтверждения методами стандартных испытаний. Только в Руководстве по эксплуатации гражданских аэродромов РФ (РЭГА РФ-94) рекомендуется применять твёрдомер НИАС (аналог статического зонда) для определения показаний прочности (несущей способности) уплотнённого снежного покрытия. Этот документ также рекомендует определять показатель прочности грунта с помощью ударника У-1 (аналог динамического зонда).

Кроме динамического пенетрометра для определения прочностных и деформационных характеристик заторфованного грунта использовался универсальный пенетрометр ПУС-3М (рисунок 4).

⁴ ASTM D 4633-86* Standard test method for stress wave energy measurements for dynamic penetrometer testing systems (Стандартный метод испытания изменением энергии волн напряжений для испытательных систем с динамическим пенетрометром).

⁵ EN 1997-2, Eurocode 7: Geotechnical design – Part 2: Ground investigation and testing (Еврокод 7 Геотехническое проектирование. Часть 2. Исследование грунтов и проведение испытаний).

⁶ EN ISO 22476-3, Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 3: Standard penetration test (ISO 22476-3:2005) [Геотехнические исследования и испытания. Полевые испытания. Часть 3. Стандартное испытание проникающей способности (ISO 22476-3:2005)]

⁷ Пособие к ст. нормам Респ. Беларусь. Проектирование забивных и набивных свай по результатам зондирования грунтов: П2-2000 к СНБ 5.01.01-99: утв. М-вом архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь 25.06.2000: введ. 01.07.2001. Минск: Минстрой архитектуры, 2001. 22 с.

⁸ Мухаметзянов Ф.З. Разработка метода и средств использования данных динамического зондирования при проектировании усиления фундаментов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Ф.З. Мухаметзянов. Уфа, 2005. 21 с.

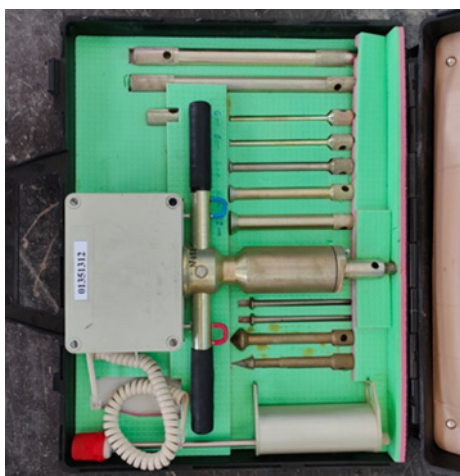


Рисунок 4 – Универсальный пенетрометр ПУС-3М, общий вид
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Universal penetrometer PUS-3M, general view
Source: compiled by the authors.

Прибор позволяет оперативно определить: угол внутреннего трения, удельное сцепление, модуль упругости и иные параметры. Этот прибор был использован для исследований немёрзлых заторфованных грунтов, подвер-

гнутых трехкратному обжиму нагрузками 0,01, 0,03 и 0,06 МПа с периодичностью одна минута.

Испытания прибором ПУС-3М выполняли в следующем порядке:

- выбирали режим работы и диаметр рабочего наконечника, с которым проводятся измерения;
- перед началом каждого измерения прибор удерживали на весу, нажимали кнопку «Старт», затем рабочий наконечник плавно вдавливали в грунт за 10–12 сек на глубину 75 мм;
- после стабилизации показателей нажимали кнопку «Ввод».

После проведения пенетрации на индикаторе отображаются значения E_w – сопротивление пенетрации и E_g – модуль упругости.

Модуль упругости и коэффициент Пуассона замороженного торфяного грунта определяли по ГОСТ 24452–2023 на образцах призмах размером 100x100x400 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты определения теплопроводности грунта при разной плотности и температуре представлены на рисунке 5.

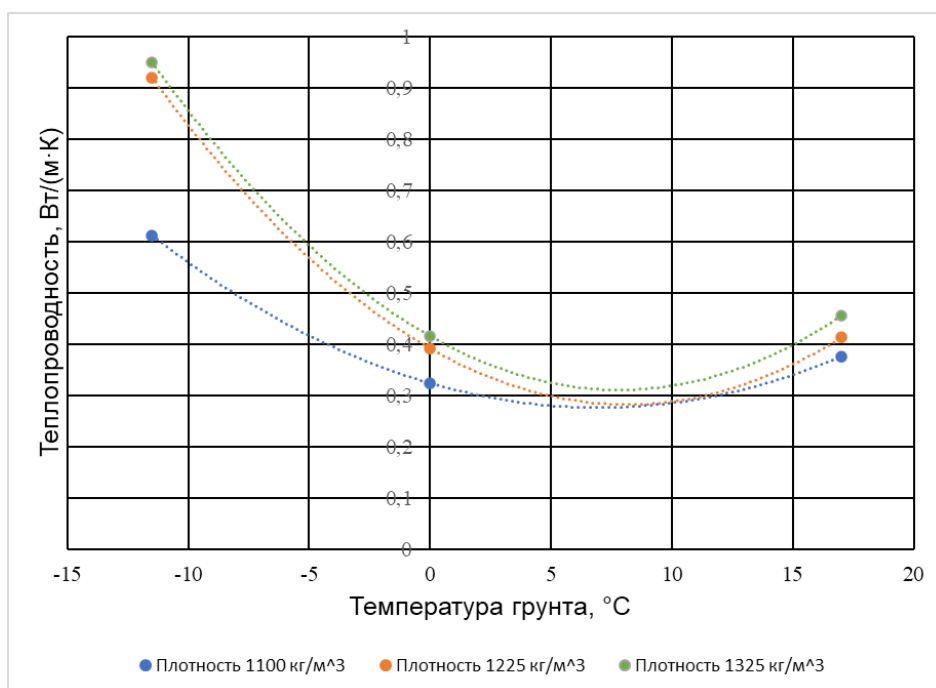


Рисунок 5 – Изменение теплопроводности грунта от его плотности и температуры
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Changes in the thermal conductivity of the soil from its density and temperature
Source: compiled by the authors.

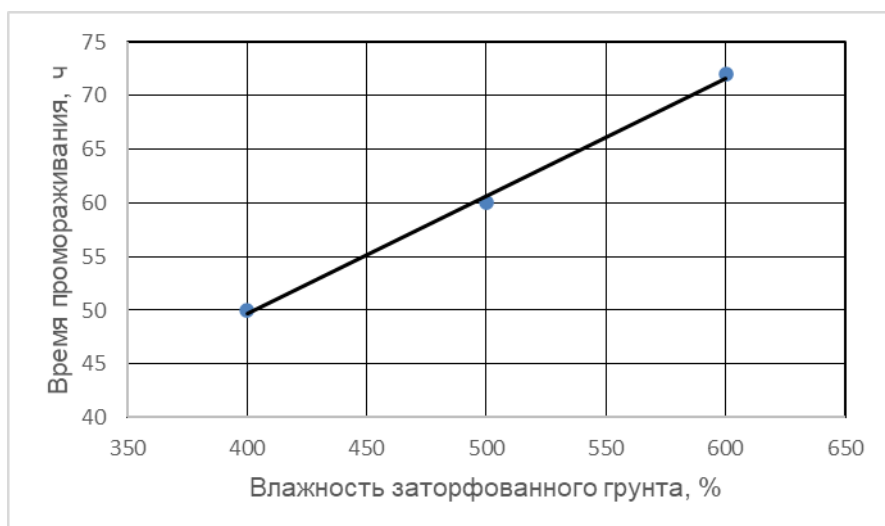


Рисунок 6 – Влияние влажности заторфованного грунта на скорость его промерзания
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – The effect of the humidity of the blocked soil on the rate of its freezing
Source: compiled by the authors.

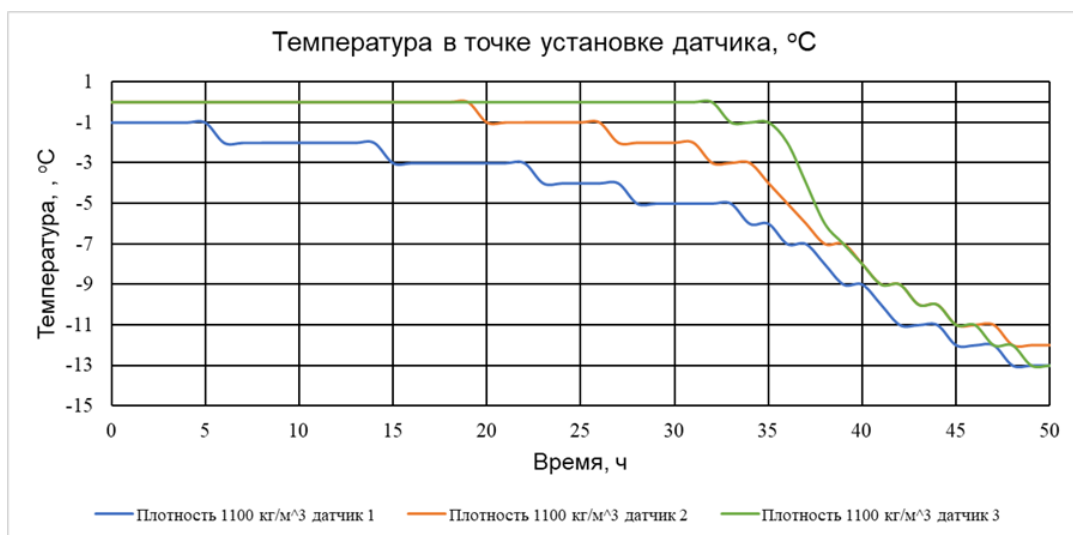


Рисунок 7 – Изменение температуры по глубине образца от времени промораживания для грунта с минимальной плотностью
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Temperature change in the depth of the sample from the freezing time for soil with a minimum density
Source: compiled by the authors.

Удельная теплоёмкость для любого вещества есть величина переменная, то есть она зависит от температуры и агрегатного состояния вещества.

Минимальная плотность – 1100 кг/м³ и минимальная теплопроводность грунта (конгломерата из твёрдой фазы, воды и воздуха) получены при уплотнении образцов нагрузкой 0,01 МПа; плотность 1225 кг/м³ получена при нагрузке уплотнения 0,03 МПа; плотность

1325 кг/м³ и максимальная теплопроводность получены при нагрузке уплотнения 0,06 МПа. Этот результат вполне логичен, т.к. повышение плотности происходит за счёт частичного отжатия воздушной фазы из грунта с понижением его пористости. В рассматриваемом диапазоне положительных температур теплопроводность воздуха составляет всего 0,0228–0,255 Вт/ (м град), в то время как воды – в 24 раза больше: 0,569–0,588 Вт/ (м град).

При переходе в зону отрицательных температур теплопроводность воздуха и твёрдой фазы изменяются мало, а при переходе воды в лёд её теплопроводность увеличивается в 4 раза – до 2,34 Вт/ (м град). На рисунке 6 представлен график влияния влажности заторфованного грунта одинаковой плотности на скорость промерзания слоя 20 см при минус 15 °С.

Наблюдается прямая пропорциональная зависимость: с увеличением влажности в 1,5 раза скорость промерзания возрастает в 1,44 раза.

На рисунках 7 и 8 представлены результаты экспериментов по определению времени промерзания заторфованного грунта при постоянной влажности (400%), но разной плотности (1100 кг/м³ и 1325 кг/м³, полученной в результате уплотнения нагрузками 0,01 МПа и 0,06 МПа).

Как следует из результатов эксперимента, на начальном этапе (до 30 ч) происходит процесс охлаждения и кристаллизации воды, содержащейся в грунте. В связи с этим температура практически не изменяется, что связано с теплотой фазового перехода воды. Для грунта с минимальной плотностью (1100 кг/м³) основным фактором, определяющим скорость промораживания на начальном этапе, является наличие значительного объёма воздушных каверн, обеспечивающих снижение градиента температуры от поверхности в глубину образца. Для грунта с максимальной плотностью (1325 кг/м³) на начальном этапе основной вклад вносит образовавшийся на поверхности лёд. После 40 ч скорость промораживания выравнивается и в дальнейшем промораживание идёт по типу единого грунтово-ледяного конгломерата.

Таким образом, увеличение плотности образцов на 12% приводит к ускорению их промерзания на 15%. Сопоставляя графики на рисунках 6, 7 и 8 можно констатировать, что увеличение влажности на эту же величину (12%) увеличивает скорость промерзания только на 10%. Следовательно, увеличение плотности грунта за счёт отжатия воздушной фазы даёт больший эффект, нежели его осушение (в рассматриваемых границах).

Данные, полученные нами при экспериментальных исследованиях, хорошо согласуются с результатами ранее опубликованных исследований по этому вопросу [6, 8, 9, 19].

Графики на рисунке 9 отражают результаты исследования изменения условной прочности (количества ударов на погружение стержня ударника на 10 см) образцов заторфованного грунта по мере его промораживания.

Увеличение плотности образцов на 12% приводит к кратному увеличению их прочности после замораживания.

Столь значительное увеличение прочности водонасыщенного замороженного заторфованного грунта объясняется превращением воды в лёд. Прочность каркаса из льда находится в обратной зависимости от температуры. Например, в диапазоне от 0 °С до -40 °С прочность на сжатие речного льда увеличивается примерно в 4 раза, а на растяжение – лишь в 1,5 раза.

Торфяные волокна, армирующие грунт, делают его в 2-3 раза прочнее по сравнению с чистым льдом. Но прочность увеличивается только в верхнем слое залежи до 40 см. В нижележащих слоях слабого основания повышается температура торфа и содержание незамёрзшей воды. И, как правило, наблюдается более высокая степень разложения торфа с уменьшением содержания армирующих волокон.

Для интерпретации результатов динамического зондирования получены десятки формул и графиков почти для всех разновидностей дисперсных грунтов, но для заторфованных грунтов в талом или мёрзлом состоянии мы не обнаружили публикаций по данному вопросу.

На рисунке 10 представлены результаты интерпретации результатов динамического зондирования, полученные нами с помощью корреляционной зависимости между количеством ударов для погружения зонда на 10 см и модулем упругости для исследуемого заторфованного грунта.

Испытания показали, что при замораживании заторфованного грунта величина модуля упругости может возрастать в сотни раз.

Главное преимущество применения методов зондирования в дорожном строительстве заключается в относительной простоте и оперативности получения информации по одному из механических показателей грунтов. Основным недостатком этих методов – необходимость интерпретации получаемых результатов со стандартными методами изучения механических свойств грунтов.

Выполнены обширные исследования [20] для выявления эмпирических зависимостей между индексом динамического проникновения конуса (DCPI, мм/удар) и, например, Калифорнийским числом несущей способности грунта (CBR). Корреляционная связь CBR с DCPI может быть записана в общем виде формулой

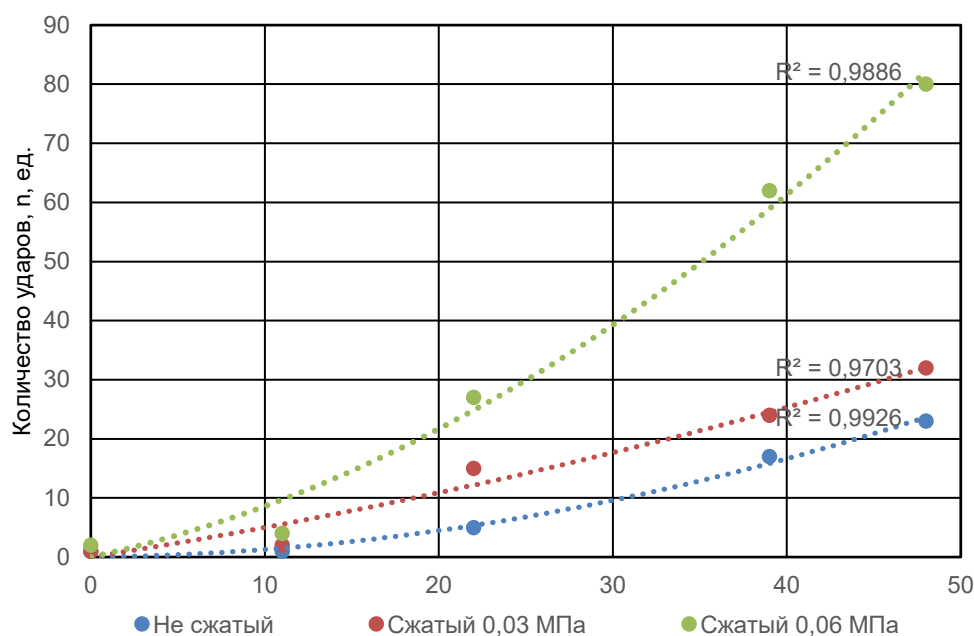


Рисунок 9 – Зависимость прочности (количества ударов, n) от времени промораживания образца
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Dependence of strength (number of impacts, n) on the freezing time of the sample
Source: compiled by the authors.

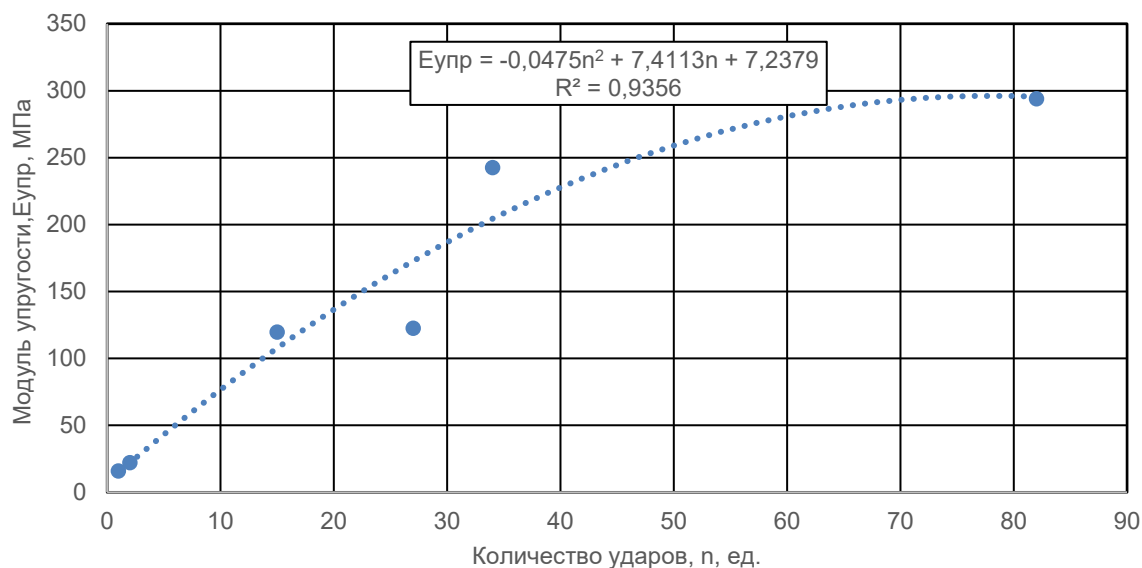


Рисунок 10 – Зависимость между количеством ударов при динамическом зондировании и модулем упругости
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – The relationship between the number of impacts during dynamic sensing and the modulus of elasticity
Source: compiled by the authors.

$$\text{Log (CBR)} = f - g \text{ Log (DCPI)},$$

где DCPI – индекс проникновения конуса, мм/удар; f и g – параметры уравнения регрессии, зависящие от вида и состояния тестируемого материала.

В данной статье показатель динамического зондирования мы назвали условным показателем прочности (твёрдости) мёрзлого грунта, в отличие от классических (стандартных) методов определения механических свойств материалов. Критический анализ т.н. стандартных методов показывает, что их также можно отнести к условным. Это подтверждается тем, что все методы определения механических свойств материалов всецело зависят от методик испытаний, а также от применяемого оборудования и приборов, физических параметров материалов, при их испытаниях и т.п. А поэтому все основные методы определения прочности и деформативности материалов детально прописаны в регулярно меняющихся нормативах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов экспериментальных исследований можно сделать некоторые выводы и заключение:

1. Уплотнение (обжимка) заторфованного грунта увеличивает его теплопроводность и скорость промерзания верхнего слоя болота на 15%, что способствует ускорению ввода автозимника в эксплуатацию.
2. Уплотнение (обжимка) заторфованного грунта значительно увеличивает его прочность при замораживании, что предопределяет увеличение несущей способности автозимников на болотах при их уплотнении.
3. До настоящего времени не развиты методы оперативного контроля плотности, прочности и прогнозирования несущей способности промороженной торфяной плиты на автозимниках. Наиболее перспективно использование для этой цели методов динамического зондирования пенетрометрами различной конструкции. Однако это сопряжено с объективной трудностью, связанной с интерпретацией получаемых результатов для достоверного получения стандартизированных механических показателей замороженных торфяных грунтов. Нами получены результаты определения условного показателя прочности (твёрдости) с помощью динамического зондирования промороженного торфяного грунта плотномером. Установлена эмпирическая зависимость между показателем динамического зондирования

и модулем упругости исследуемого заторфованного грунта.

ДАЛЬНЕЙШЕЕ НАПРАВЛЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Дальнейшие исследования по определению закономерностей изменения теплофизических и механических показателей заторфованных грунтов и получения достоверных расчётных численных значений этих показателей будут выполняться при испытаниях на реальных опытных участках автозимников.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Куликов А.В., Фирсова С.Ю., Дорохина В.С. Повышение эффективности автомобильных перевозок в условиях Крайнего Севера Российской Федерации // Вестник СибАДИ. 2021; 18(3): 286–305. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-3-286-305>
2. Филиппова Н.А. Научные пути решения проблем организации и планирования перевозок грузов в районы Крайнего Севера и Арктические зоны России // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2024. № 2. С. 11–22. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-2-11>.
3. Боброва Т.В., Бедрин Е.А., Дубенков А.А. Прогнозирование эффективности дорожных конструкций на многолетнемерзлых грунтах // Вестник СибАДИ. 2011. № 22. С.11–16.
4. Куклина В.В., Осипов М.Е. Роль зимников в обеспечении транспортной доступности арктических и субарктических районов Республики Саха (Якутия) // Общество. Среда. Развитие. 2018. № 2. С. 107–112.
5. Морозов В.С. Расчет однослойных зимних автомобильных дорог на прочность // Инновационная наука. 2015. №11. С. 84–88.
6. Морозов, В.С., Фомин Е.Г. Исследование реологических свойств мерзлого торфа // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 2009. № 6. С. 72–80.
7. Морозов В.С. Расчет на прочность оснований зимних дорог на заболоченных грунтах // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 2012. № 6. С. 58–65.
8. Иванов Г.Н. Изучение упругих свойств торфа при промерзании // Труды Инсторфа. 2021. № 23 (76). С. 11–17.
9. Мадьяров Т.М., Русмиленко А.К., Костырченко В.А. Технология строительства автозимников специального назначения для перевозки негабарита с применением комбинированной машины // Инженерный вестник Дона. 2021. № 10 (82). С. 291 – 300.
10. Егоров А.Л., Мерданов М.Ш., Черняков Е.Н., Чернякова О.О. Комплект машин для строительства временных зимних дорог // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. С. 97 – 101.
11. Шитый В.П., Шаруха А.В., Мерданов Ш.М., Сысоев Ю.Г. Обоснование целесообразности создания машин, совмещающих технологические опе-

рации при строительстве снежоледовых дорог // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3. С. 145

12. Мадьяров Т.М., Русмиленко А.К., Костырченко В.А. Компоновка комбинированной машины на базе автомобиля КамАЗ // Инженерный вестник Дона. 2022. № 4 (88). С. 566 – 575.

13. Обухов А.Г., Шаруха А.В., Костырченко В.А. Прицепное вибрационное устройство для проминки болотистых оснований под строительство снежоледовых дорог // Вестник Курганской ГСХА. 2015. № 4 (16). С. 71–72.

14. Болдырев Г.Г. Руководство по интерпретации данных испытаний методами статического и динамического зондирования для геотехнического проектирования: монография. М.: Изд-во ООО «Прондо». 2017. 476 с.

15. Matsumoto, T; Sakaguchi, H., Yoshida, H. & Kita, K: Significance of two-points train measurements in SPT. *Soils and Foundations*. JSSMFE. 1992. Vol. 32. № 2. pp. 67–82.

16. Самофеев Н.С., Ковалева Д.В. Оценка эффективности применения средств малой механизации при динамическом зондировании грунта в стесненных условиях // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». Том 9, № 6 (2017). <https://naukovedenie.ru/PDF/05EVN617.pdf> <https://naukovedenie.ru/PDF/05EVN617.pdf> (доступ свободный).

17. Пономарев А.Б., Сычкина Е.Н. Сопоставление механических свойств аргиллитов раннепермского возраста по результатам полевых и лабораторных испытаний // Вестник МГСУ. 2013. № 2. С. 55–63.

18. Протодьяконова Н.А. Теплофизические свойства торфов и заторфованных песчаных грунтов / Н.А. Протодьяконова, А.В. Степанов, А.М. Тимофеев, О.Н. Кравцова, Н.И. Таппырова // Успехи современного естествознания. 2024. № 1. С. 52–57; URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38207> (дата обращения: 12.10.2024).

19. Милляев А.С. Альтернативная методика расчета промерзания слоистых оснований сезонных зимних лесовозных дорог // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. Петрозав. гос. ун-т. Петрозаводск, 2010. Вып. 8. С. 83–87. DOI: 10.15393/j2.art.2010.1773. Текст: электронный. Режим доступа: Resources and Technology: научный журнал. 2010. Вып. 8. URL: <https://elibrary.petrus.ru/books/50450> (дата обращения: 12.11.2024).

20. Семёнова Т.В., Долгих Г.В., Полугородник Б.Н. Применение Калифорнийского числа несущей способности и динамического конуса пенетromетра для оценки качества уплотнения грунта // Вестник СибАДИ. 2013. № 1(35). С. 59–66.

REFERENCES

1. Kulikov A.V., Firsova S.Y., Dorokhina V.S. Improving efficiency of car transportation in extreme north conditions in Russian Federation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (3): 286–305. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-3-286-305>

2. Filippova N.A. [Scientific ways for solving problems of organizing and planning cargo transportation to the areas of the Far North and Arctic Zones of Russia]. *Intellekt. Innovacii. Investicii [Intellect. Innovations. Investments]*. 2024; Vol. 2: 11–22. (in Russ.) <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-2-11>.

3. Bobrova T.V., Bedrin E.A., Dubenkov A.A. Forecasting the effectiveness of road structures on permafrost soils. *Vestik SibADI*. 2011; 22: 11–16. (in Russ.)

4. Kuklina V.V., Osipov M.E. The role of winter roads in ensuring transport accessibility of the Arctic and subarctic regions of the Republic of Sakha (Yakutia). *Society. Environment. Development ("TERRA HUMANA")*. 2018; 2: 107–112. (in Russ.)

5. Morozov V.S. Calculation of single-layer winter highways for durability. *Innovative science*. 2015; 11: 84–88. (in Russ.)

6. Morozov V.S., Fomin E. G. Investigation of rheological properties of frozen peat. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*. 2009; 6: 72–80. (in Russ.)

7. Morozov V.S. Strength Analysis of Winter Road Bases on the Boggy Grounds. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*. 2012; 6: 58–65. (in Russ.)

8. Ivanov, G.N. The study of elastic properties of peat during freezing. *Proceedings of Instorf*. 2021; 23 (76): 11–17. (in Russ.)

9. Magyarov T.M., Rusmilenko A.K., Kostyrchenko V.A. Technology of construction of special-purpose winter trucks for the transportation of oversized cargo using a combined machine. *Engineering journal of Don*. 2021; 10 (82). (in Russ.)

10. Egorov, A.L., Mardanov M.Sh., Chernyakov E.N., Chernyakova O.O. A set of machines for the construction of temporary winter roads. *Modern problems of science and education*. 2013; 5. (in Russ.)

11. Shityi V.P., Sharukha A.V., Merdanov S.M., Sysoev Y.G. Substantiation of the expediency of creating machines combining technological operations in the construction of snow-covered roads. *Modern problems of science and education*. 2014; 3. (in Russ.)

12. Magyarov, T.M., Rusmilenko A.K., Kostyrchenko V.A. The layout of a combined vehicle based on a KamAZ car. *Engineering journal of Don*. 2022; 4 (88). (in Russ.)

13. Obukhov A.G., Sharukha A.V., Kostyrchenko V.A. Trailed vibrating device for washing marshy foundations for the construction of snow-covered roads. *Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy*. 2015; 4 (16): 71–72. (in Russ.)

14. Boldyrev G.G. Guidelines for the interpretation of test data by static and dynamic sensing methods for geotechnical design. Publishing house, Pron-do LLC, Moscow. 2017: 476. (in Russ.)

15. Matsumoto, T; Sakaguchi, H., Yoshida, H. & Kita, K: Significance of two-point strain measurements in SPT. *Soils and Foundations*. JSSMFE. 1999; Vol. 32, № 2: 67–82. EN 1997-1, Eurocode 7: Geotechnical design/ -Part 1: General rules.

16. Samofeev N.S., Kovaleva D.V. Evaluation of the effectiveness of the use of small-scale mechanization tools for dynamic soil sounding in confined. *Nauko-*

vedenie. 2017; Volume 9, No. 6. <https://naukovedenie.ru/PDF/05EVN617.pdf> <https://naukovedenie.ru/PDF/05EVN617.pdf> (free access).

17. Ponomarev A.B., Sychkina E.N. Comparison of the mechanical properties of mudstones of early Permian age according to the results of field and laboratory tests. *Vestnik MGSU*. 2013; 2: 55–63. (in Russ.)

18. Protodyakonova N.A., Stepanov A.V., Timofeev A.M., Kravtsova O.N., Tappyrova N.I. Thermophysical properties of peat and peaty sand soils. *Advances in current natural sciences*. 2024;1: 52–57. (in Russ.) URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38207> (accessed: 12.10.2024).

19. Milyaev A.S. An alternative method for calculating the freezing of layered foundations of seasonal winter forest roads. *Resources and Technology*. 2010; 8: 83–87. (in Russ.) DOI: 10.15393/j2.art.2010.1773. (accessed: 12.11.2024).

20. Semenova T.V., Dolgih G.V., Polugorodnik B.N. Application of the California number of bearing capacity and the dynamic cone of the penetrometer to assess the quality of soil compaction. *Vestnik SibADI*. 2013; 1(35): 59–66. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Кузнецов И.С. Обзор и анализ публикаций по заявленной тематике. Выполнение экспериментальных исследований. Написание статьи (35%).

Сиротюк В.В. Формулирование проблемы, направления и темы исследования. Постановка задач исследования. Написание статьи. Формулировка результатов и выводов (30%).

Орлов П.В. Руководство исследованиями. Материальное обеспечение исследований (20%).

Кузнецова В.Н. Руководство процессом разработки темы. Выбор методологии и методов исследования. Редактирование статьи (15%).

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Kuznetsov I.S. Review and analysis of publications on the stated topic. Performing experimental studies. Writing an article (35%).

Sirotyuk V.V. Formulation of the problem, directions and methods of research. Setting research objectives. Writing an article. Formulation of results and conclusions (30%).

Orlov P.V. Research management. Financial support for research (20%).

Kuznetsova V. N. Management of the development process of themes. The choice of methodology and research methods. Editing an article (15%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Илья Сергеевич – старший преподаватель кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского государ-

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6524-4976>,
SPIN-код: 6890-3069,

e-mail: ilyxa_kyznetsov@vk.com

Сиротюк Виктор Владимирович – главный научный сотрудник, д-р техн. наук проф., Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2254-8803>,
SPIN-код: 2583-7458,

e-mail: sirvv@yandex.ru

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9363-0735>,
SPIN-код: 2413-6194.

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3546-0894>,
SPIN-код: 1039-7546,
e-mail: dissovetsibadi@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov Ilya S. – Senior Lecturer of the Department “Operation of Oil and Gas and Construction Equipment”, Siberian State Automobile and Road University (SibADI) (644050, Omsk, ave. Mira, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6524-4976>,
SPIN-code: 6890-3069,
e-mail: ilyxa_kyznetsov@vk.com

Sirotyuk Viktor V. – Chief Scientific Officer, Dr. of Sci. (Eng), Professor, Siberian State Automobile and Road University (SibADI) (644050, Omsk, ave. Mira, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2254-8803>,
SPIN-code: 2583-7458,
e-mail: sirvv@yandex.ru

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9363-0735>,
SPIN-code: 2413-6194.

Kuznetsova Victoria N. – Dr. of Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of “Operation of Oil and Gas and Construction Equipment”, Siberian State Automobile and Road University (SibADI) (644050, Omsk, ave. Mira, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3546-0894>,
SPIN-code: 1039-7546,
e-mail: dissovetsibadi@bk.ru

Научная статья
УДК 691.168
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-984-1001>
EDN: QVKREJ



ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ВОСКОВ НА АДГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО

В.В. Ядыкина¹, О.А. Михайлова¹ ✉, М.С. Лебедев², Е.В. Фомина¹

¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

✉ ответственный автор
mihaylovalymar@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время в дорожном строительстве с целью уменьшения энергозатрат и снижения вредных выбросов все более широко применяют технологии теплых асфальтобетонных смесей. Одним из способов понижения температуры приготовления асфальтобетонной смеси является применение добавок на основе природных и синтетических восков. В связи с этим актуальным является изучение влияния восковых добавок на свойства битумного вяжущего как основы асфальтобетонной смеси. Сцепление вяжущего с минеральным заполнителем является важнейшим свойством, определяющим долговечность асфальтобетонного покрытия. Цель данной статьи – изучение влияния добавок на основе синтетических восков на адгезионные свойства битумного вяжущего.

Материалы и методы. Представлены характеристики исследованных добавок на основе синтетических восков: Вискодор ПВ-2, Sasobit и Licomont BS-100. Для моделирования процессов старения вяжущего был использован метод прогрева в тонком слое по ГОСТ 18180 с увеличенным до 9 ч временем термостатирования. Для оценки адгезии исходного и модифицированного битумного вяжущего, а также вяжущего после старения, был применен метод кипячения в воде каменного материала, покрытого битумом, и оценка внешнего вида в соответствии с ГОСТ 11508. Изучение механизма сцепления битумного вяжущего с минеральным заполнителем проводилось посредством спектрального анализа.

Результаты и обсуждение. Произведен анализ влияния добавок на основе синтетических восков на сцепление битумного вяжущего с минеральным материалом. Выявлено изменение адгезионных свойств модифицированного исследуемыми добавками битума при термоокислительном старении. Проведено сравнение ИК-спектров исходного и модифицированного битума до и после взаимодействия с каменным материалом и определены различия в механизмах влияния вводимых добавок на сцепление с минеральным заполнителем. Установлено, что добавка Вискодор ПВ-2 значительно улучшает адгезию битума. При этом эффект улучшения адгезии указанной добавкой сохраняется и после термоокислительного старения, хотя несколько снижается. Импортные добавки Sasobit и Licomont BS-100 оказывают меньшее влияние на адгезионные свойства битума.

Заключение. Полученные результаты показывают, что применение добавок на основе синтетических восков улучшает адгезионные свойства битума, что положительно отразится на долговечности дорожного покрытия. Так как отечественная добавка Вискодор ПВ-2 превосходит по эффекту улучшения адгезионных свойств известные добавки Sasobit и Licomont BS-100, внедрение в производство исследуемой добавки взамен дорогостоящих импортных позволит одновременно улучшить качество асфальтобетонного покрытия и уменьшить его стоимость.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: адгезия, асфальтобетон, битум, битумное вяжущее, температуропонижающие добавки, воски, теплые асфальтобетонные смеси, минеральный материал, термоокислительное старение, поверхностно-активные вещества

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность редакции журнала «Вестник СибАДИ» и рецензентам статьи. Исследование выполнено с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

© Ядыкина В.В., Михайлова О.А., Лебедев М.С., Фомина Е.В., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> и Правительства Белгородской области, Соглашение №3 от 24.03.2022.

Статья поступила в редакцию 24.09.2024; одобрена после рецензирования 25.10.2024; принята к публикации 16.12.2024.

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: Ядыкина В.В., Михайлова О.А., Лебедев М.С., Фомина Е.В. Влияние добавок на основе синтетических восков на адгезионные свойства битумного вяжущего // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 984-1001. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-984-1001>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-984-1001>

EDN: QVKREJ

THE EFFECT OF SYNTHETIC WAX ADDITIVES ON ADHESIVE PROPERTIES OF BITUMEN BINDERS

Valentina V. Yadykina¹, Olga A. Mikhailova¹✉, Mikhail S. Lebedev², Ekaterina V. Fomina¹

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
Belgorod, Russia

²National Research Tomsk State University,
Tomsk, Russia

✉ corresponding author
mihaylovalymar@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Currently, in road construction, in order to reduce energy costs and harmful emissions, warm asphalt concrete mixture technologies are being increasingly used. One way to reduce the temperature of asphalt concrete mixture prepared is to use additives based on natural and synthetic waxes. In this regard, it is important to study the influence of wax additives on the properties of bitumen binder as a basic component of asphalt concrete mixture. The adhesion between the binder and the mineral filler is the most important property that determines the durability of an asphalt concrete pavement. The purpose of this article is to study the effect of synthetic wax additives on the adhesive properties of bitumen.

Materials and methods. The characteristics of the studied synthetic wax additives Viskodor PV-2, Sasobit and Licomont BS-100 have been presented. To simulate binder aging, the heating method in a thin layer, according to GOST 18180, was used with the temperature control time increased to 9 hours. To assess the adhesion between original and modified bitumen binder, as well as the aged binder, the method of boiling stone material coated with bitumen was used, and the assessment of its appearance in accordance with GOST 11508 was made. The study of the adhesion mechanism for the bitumen binder and the mineral filler was carried out by means of spectral analysis.

Results and discussion. The influence of synthetic wax additives on the adhesion between bitumen binder and mineral material was analyzed. A change in the adhesive properties of bitumen modified with the studied additives during thermal-oxidative aging was revealed. A comparison was made of the IR spectra of the original and modified bitumen before and after interaction with stone material and the differences in the mechanisms of affecting the adhesion to the mineral filler by the introduced additives were determined. It has been established that the Viskodor PV-2 additive significantly improves bitumen adhesion. Moreover, the effect of improved bitumen adhesion with this additive remains after thermal-oxidative aging, though slightly reduced. Imported additives Sasobit and Licomont BS-100 have a significantly less impact on the adhesive properties of bitumen.

Conclusion. The results obtained show that the use of synthetic wax additives improves the adhesive properties of bitumen, which can positively affect the durability of the road surface. Since the domestic additive Viskodor PV-2 is superior in the effect of improving the adhesive properties of bitumen compared to the studied additives Sasobit and Licomont BS-100, the introduction of this additive into production instead of expensive imported additives will provide both improvement in the quality of asphalt concrete pavement and reduction of costs.

© Yadykina V.V., Mikhailova O.A., Lebedev M.S., 2024



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

KEYWORDS: *adhesion, asphalt concrete, bitumen, bitumen binder, temperature-reducing additives, waxes, warm asphalt concrete mixtures, mineral material, thermal-oxidative aging, surfactants*

ACKNOWLEDGMENTS: *The authors express their gratitude to the Russian Automobile and Highway Industry Journal editorial staff and the reviewers of the article. During investigation the equipment was used from the Center for High Technologies of BSTU named after. V.G. Shukhov.*

The study was funded by the RNF grant No. 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> and the Government of the Belgorod Region, Agreement No. 3 of 03/24/2022.

The article was submitted: 24.09.2024; approved after reviewing: 25.10.2024; accepted for publication: 16.12. 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: Yadykina V.V., Mikhailova O.A., Lebedev M.S. The effect of synthetic wax additives on adhesive properties of bitumen binders. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): 984-1001. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-984-1001>*

ВВЕДЕНИЕ

Традиционные горячие асфальтобетонные смеси, используемые для устройства дорожного покрытия, имеют значительное количество недостатков: большое потребление энергоресурсов, высокие температуры приготовления и укладки, что сопровождается выбросами парниковых газов и вредными условиями труда работников асфальтобетонных заводов и дорожных рабочих. Способом минимизации таких недостатков является применение технологий теплых асфальтобетонных смесей [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Теплые асфальтобетонные смеси готовят при температуре на 20–40 °С ниже, чем горячие, что достигается различными методами снижения вязкости дорожного битума. Применение технологий теплых асфальтобетонов позволяет решить целый ряд актуальных задач: экономия энергии, снижение вредных выбросов, улучшение условий труда работников, возможность внесения в состав большего количества переработанного асфальтобетона, возможность укладки смесей при более низких температурах окружающей среды, продление сезона дорожных работ [2].

В связи с вышеперечисленными преимуществами теплые асфальтобетонные смеси с каждым годом все шире применяются в дорожном строительстве. По прогнозам некоторых специалистов, в ближайшее время доля теплых асфальтобетонов может увеличиться до 40% от общего количества производимых асфальтобетонных смесей [3].

Негативным фактором при использовании добавок, снижающих вязкость битума, является вероятность снижения прочности асфальтобетона и устойчивости к колебно-

стидорожного покрытия при высоких летних температурах [4].

Применение органических добавок – природных и синтетических восков – позволяет получить теплые асфальтобетонные смеси с повышенной прочностью и устойчивостью к колееобразованию. В качестве таких добавок используются органические амидные воски, монтан-воски, воски Фишера-Тропша, а также природные воски и парафины [5]. До недавнего времени ассортимент восковых добавок для битума был представлен исключительно импортными добавками (например, Sasobit, Licomont, Asphaltan и др.). На данный момент в условиях острой необходимости импортозамещения на рынке дорожного строительства появились отечественные восковые модификаторы, например, Вискодор [6].

Использование таких добавок позволяет снизить вязкость битума при температуре выше температуры плавления воска, и таким образом понизить температуру приготовления и укладки смеси. При понижении температуры вязкость битума в сравнении с немодифицированным увеличивается, что позволяет повысить прочность и колееустойчивость дорожного покрытия [7].

Многочисленные исследования [8, 9, 10, 11, 12] доказывают эффективность применения восковых добавок в теплых асфальтобетонных смесях в качестве модификатора реологии битума и для повышения прочностных свойств асфальтобетонного покрытия. Но тем не менее некоторые аспекты влияния восковых добавок на свойства битумного вяжущего и асфальтобетона изучены недостаточно полно.

Одним из наиболее важных свойств битумного вяжущего является сцепление с мине-

ральным материалом. Плохая адгезия между битумом и заполнителем приводит к отслаиванию вяжущего под воздействием воды и внешней нагрузки. В результате в дорожном полотне начинаются процессы эрозии, шелушения, образуются трещины [13]. Поэтому для получения качественного дорожного покрытия ключевым фактором при подборе состава битумного вяжущего является обеспечение высокой адгезии между битумом и минеральными компонентами асфальтобетонной смеси.

Взаимодействие битума и минерального материала предполагает комплекс процессов: физическая адсорбция в зоне контакта битума и минерального материала, хемосорбция, избирательная диффузия компонентов битума в минеральный материал под воздействием капиллярных сил¹.

В настоящее время существует более 150 методов определения адгезионных свойств битума, причём общепринятых методов испытаний нет [14]. На основании литературных данных эти методы можно разделить на три группы: определение сил сцепления битума с различными материалами; определение стойкости битума к отслаивающему действию воды с различными материалами; определение адгезии как фундаментальной величины (измерение угла смачивания, энергии межфазного разрушения, адсорбционной способности и др.) [15].

В России наиболее распространен качественный (визуальный) метод определения в соответствии с Межгосударственным стандартом 11508. Его суть заключается в визуальной оценке степени покрытия минерального заполнителя битумом после кипячения в воде и сравнение с эталонными образцами.

Влияние восков на адгезию битума изучено недостаточно, и из-за разных подходов и методов оценки адгезии существуют некоторые противоречия в результатах исследований. Так, китайские исследователи [16], используя для оценки адгезии тест на отрыв на приборе ZQS6, выявили, что введение воска Sasobit увеличивает адгезию к минеральному материалу с ростом концентрации до 3%, но дальнейшее увеличение количества добав-

ки ведет к снижению адгезии. Исследователи из Харьковского национального автомобильно-дорожного университета [17] проводили испытания вяжущих, модифицированных восками Licomont BS-100 и Sasobit в соответствии с украинским стандартом СОУ 42.1-37641918 на сцепление со стеклом при 85°C. По их результатам, влияние указанных восков на сцепление было незначительным.

Сцеплением битумного вяжущего с поверхностью заполнителя должно быть не только высоким, но и стабильным во времени, что является одним из условий долговечности дорожного покрытия. Нагрев битума до высоких температур при приготовлении асфальтобетонной смеси вызывает термоокислительное старение битума, что, как следствие, ведет к ухудшению таких его свойств, как пластичность, эластичность, адгезия к минеральному заполнителю любого типа, что неминуемо приводит к преждевременному разрушению покрытий автомобильных дорог [18].

Изучение влияния температуропонижающих восковых добавок на адгезионные свойства битумного вяжущего является актуальной задачей. В данной статье впервые изучено влияние отечественной добавки на основе синтетических восков Вискодор ПВ-2 по сравнению с известными импортными температуропонижающими добавками, а также влияние процессов, протекающих при термоокислительном старении, на адгезионные свойства модифицированного битума.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вискодор ПВ-2 является модифицирующей битум добавкой на основе синтетических восков и катионных ПАВ. Данный модификатор разработан компанией ООО «Селена» в сотрудничестве с кафедрой автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. Воски, входящие в состав добавки, обеспечивают снижение вязкости битумного вяжущего при температурах приготовления асфальтобетонной смеси, что позволяет понизить температуры ее пригото-

¹ Zelenskaya A.D., Chernetskaya S.V. Adhesion of bitumen film to the surface of mineral aggregate // Современные прикладные исследования: материалы четвертой национальной научно-практической конференции, Шахты, 16–18 марта 2020 года. Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 2020. С. 188-191.

ления и укладки². Для улучшения адгезионных свойств в добавку введена смесь имидазолинов и амидоаминов, так как эффективность использования в качестве промотора адгезии подобных катионных ПАВ подтверждена многочисленными исследованиями^{3,4} [19, 20].

Для проведения сравнительного анализа использованы восковые добавки импортного производства: Sasobit Licomont BS-100.

Добавка Licomont BS-100 (производство Clariant, Швейцария) является амидным воском, полученным в результате реакции жирных кислот с алифатическими диаминами. По результатам исследований [21, 22], введение в состав битума добавки Licomont BS-100 обеспечивает снижение вязкости при высоких технологических температурах и ее повышение при снижении температуры, что дает структурирующий эффект при температурах эксплуатации дорожного покрытия.

Добавка Sasobit (производство SasolWax, Германия) является полиэтиленовым воском, полученным в результате синтеза Фишера-Тропша. При температуре выше 120 °С он полностью растворяется в битуме, а при снижении температуры образует в нем сетчатую структуру, в результате чего повышается температура размягчения битумного вяжущего и его вязкость, что подтверждается исследованиями [23, 24, 25].

В качестве вяжущего в работе использован битум вязкий дорожной марки БНД 100/130 производства АО «Газпромнефть – Московский НПЗ».

Для проведения испытаний битум разогревали до температуры 150 °С, вводили 2% исследуемых добавок и с помощью лабораторной мешалки перемешивали при указанной температуре в течение 1 ч. Концентрация добавок 2% была выбрана как рациональная исходя из результатов исследований [6]. Для изучения влияния процессов старения на адгезионные свойства исходного и модифици-

рованного вяжущего полученные образцы битума распределяли на чашках Петри тонким слоем (4 мм) и термостатировали в течение 9 ч в сушильном шкафу при 163 °С.

В качестве минерального материала использовали отсев гранита фракции 0–4 мм (производство ОАО «Павловск Неруд»). Минеральный материал промывали дистиллированной водой и сушили при 110 °С в течение 2 ч. Для приготовления битумо-минеральной смеси в две фарфоровые чашки помещали по 30 г минерального материала и по 1,20 г испытуемого образца вяжущего с погрешностью не более 0,01 г. Чашки выдерживали в течение 20 мин при 140 °С. Затем битум и минеральный материал в чашках перемешивали шпателем до покрытия всей поверхности минерального материала вяжущими смесь выдерживали при комнатной температуре в течение 20 мин.

Полученную битумно-минеральную смесь выкладывали на металлическую сетку № 025 равномерным слоем, опускали сетку в стакан с кипящей дистиллированной водой и выдерживали в кипящей воде в течение 30 мин. По окончании кипячения сетку помещали в холодную воду на 3 мин, содержимое выкладывали на фильтровальную бумагу и оценивали результат согласно ГОСТ 11508 (метод А) визуально. Дополнительно оценку сцепления проводили весовым методом, основанным на измерении потери массы битума в процессе кипячения. Количественную характеристику определяли по формуле

$$Sn = \frac{(m_2 - m_0) \times 100}{(m_1 - m_0)};$$

где m_0 – масса минерального материала, г;

m_1 – масса навески битумо-минеральной смеси до кипячения, г;

m_2 – масса навески битумо-минеральной смеси после кипячения, г;

² Михайлова О.А., Колесников Р.С. Исследование влияния добавок на основе синтетических восков на физико-механические свойства асфальтобетонной смеси // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова: Сборник докладов, Белгород, 16–17 мая 2023 года. Ч. 9. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. С. 234–239

³ Эфендиева Л.М., Мусалы В.Х., Насибова Г.Г. Исследование композиций, приготовленных на основе амидоаминов синтетических нефтяных кислот и моторных масел ак-15 в качестве присадки для битума // Материалы конференций, Сумгаит, 15–16 апреля 2021 года. Том 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ХИМИИ. Сумгаит: Сумгаитский государственный университет, 2021. С. 215–219.

⁴ Миргородский В.А., Савинова С.А. Влияние свойств каменных материалов на выбор адгезионной добавки // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: сборник статей 80-й Юбилейной всероссийской научно-технической конференции, Самара: Самарский государственный технический университет, 2023. С. 272–277.

Sn–сцепление битума с минеральным материалом, %.

Для оценки взаимодействия битума и модифицированных вяжущих до и после термостатирования с поверхностью минерального материала из гранитной породы был использован метод ИК-спектроскопии на приборе Vertex 70 (Bruker, Германия) в среднем ИК-диапазоне 4000–400 см⁻¹. В качестве вяжущего использовались модельные системы, состоящие из битума с 10% каждой из добавок. Минеральный материал смешивался с вяжущими и выдерживался в течение суток. Далее зерна заполнителя, покрытые битумом, разогревались, битумная пленка механически снималась с поверхности минерального зерна и использовалась для приготовления спрессованной таблетки из смеси с KBr для исследования на спектрометре.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования сцепления с минеральным материалом исходного и модифицированного битума 2% исследуемых добавок битума до и после термостатирования представлены на рисунке 1 и в таблице.

Фотографии внешнего вида минерального материала с битумным покрытием после кипячения, представленные на рисунке 1,

свидетельствуют о том, что добавки Sasobit и Licomont BS-100 улучшают адгезионные свойства битума (с 21% до 36% и 48% соответственно) (см. таблицу), но увеличение сцепления битума с минеральным материалом согласно оценке по ГОСТ 11508 остается на уровне образца № 3 (покрытие менее ¼ поверхности минерального материала). После термостатирования адгезия битума с добавкой Sasobit возрастает с 36 до 47%, а с Licomont BS-100 с 48 до 56%, но в обоих случаях по ГОСТ 11508 также не превышает уровня образца № 3.

Наибольший эффект увеличения сцепления битума с каменным материалом наблюдается при введении добавки Вискодор ПВ-2 (с 21 до 99%, а по оценке согласно ГОСТ 11505 – от образца №3 до образца №1). После старения эффект улучшения адгезии добавкой Вискодор ПВ-2 также сохраняется достаточно высоким (91% и соответствует образцу №2). Такой эффект связан с присутствием в составе добавки аминных поверхностно-активных веществ, увеличивающих адгезию и термостабильность вяжущего.

На рисунке 2 представлены результаты сравнительного анализа методом ИК-спектроскопии состава исходного немодифицированного битума БНД 100/130 и битумов, модифицированных исследуемыми добавками.

Таблица
Сцепление с минеральным материалом исходного и модифицированного битума
Источник: составлено авторами.

Table
Adhesion between mineral material and original and modified bitumen
Source: compiled by the authors.

Введенная добавка	До прогрева		После прогрева	
	Сцепление битума с минеральным материалом, Sn, %	Оценка сцепления по ГОСТ 11508 соответствует образцу, №*	Сцепление битума с минеральным материалом, Sn, %	Оценка сцепления по ГОСТ 11508 соответствует образцу, №*
Без добавки	21	3	28	3
Sasobit	36	3	47	3
LicomontBS-100	48	3	56	3
Вискодор ПВ-2	99	1	91	2

где № 1 – минеральный материал покрыт битумом полностью;
№ 2 – покрыто битумом более ¾ минерального материала;
№ 3 – покрыто битумом менее ¾ минерального материала.

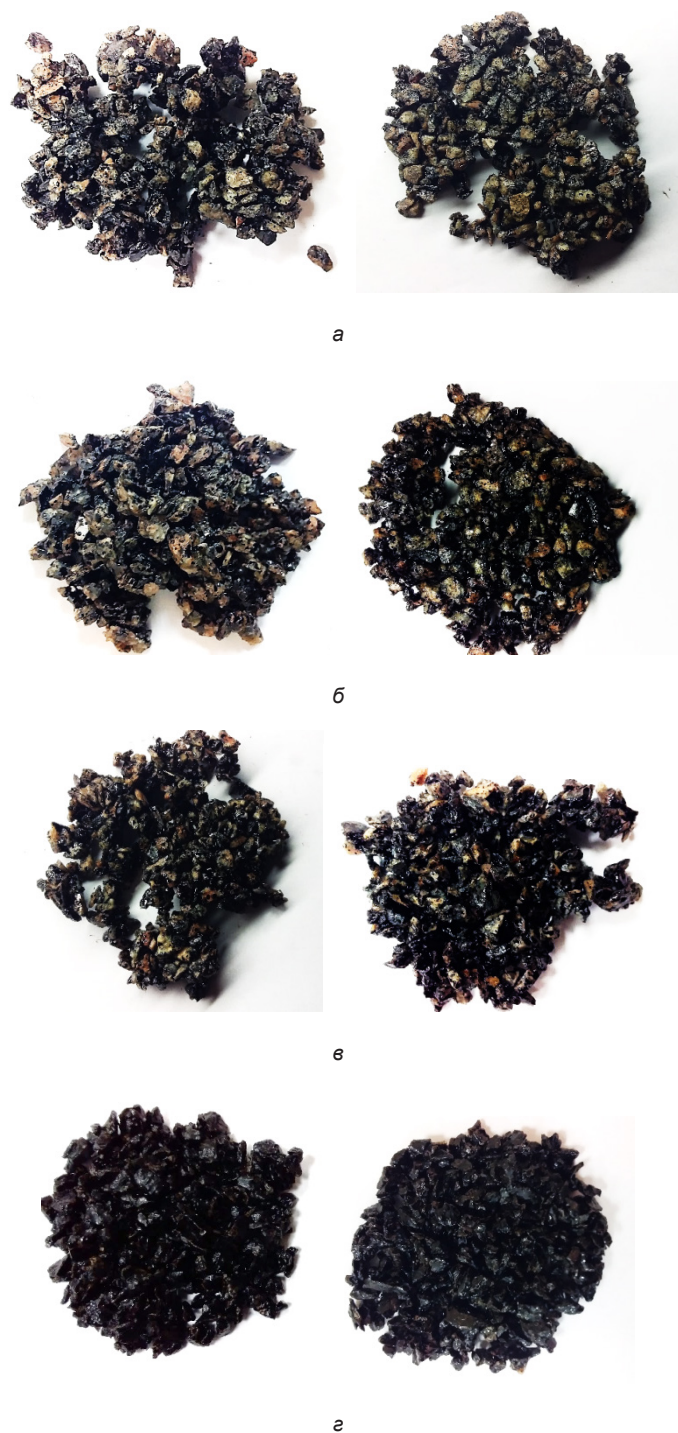


Рисунок 1 – Внешний вид минерального материала с битумным покрытием после кипячения, слева – исходное вяжущее, справа – после старения:
а – битум без добавок; б – Sasobit; в – Licomont BS-100; г – Вискодор ПВ-2
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Appearance of mineral material with a bitumen coating after boiling:
on the left – the original binder, on the right – the aged binder.
a – bitumen without additives; б – Sasobit; в – Licomont BS-100; г – Viscodor PV-2
Source: compiled by the authors.

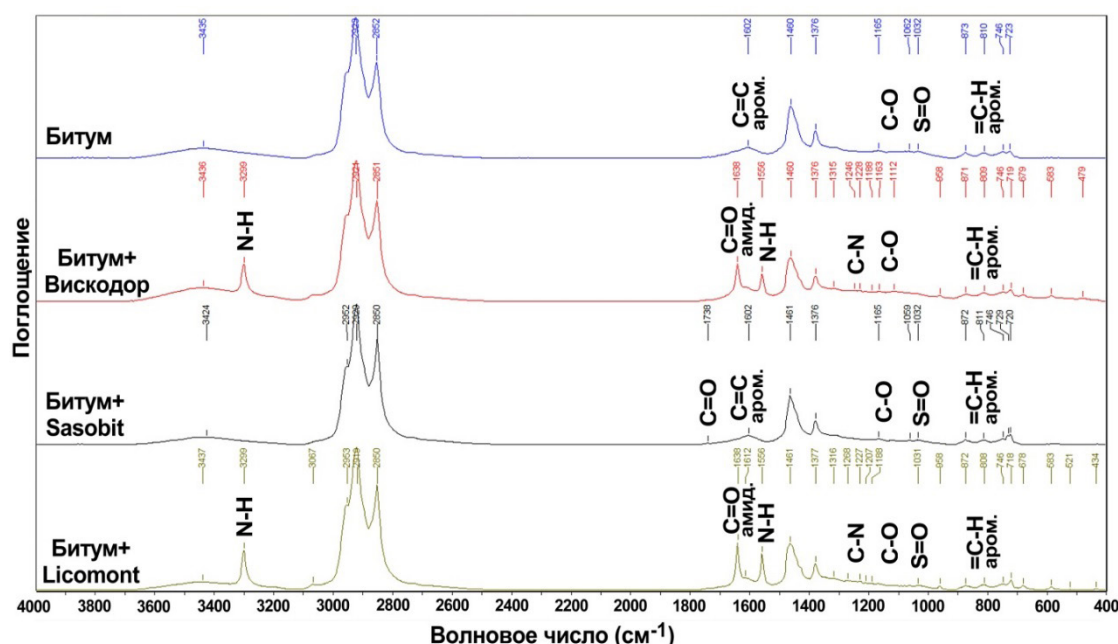


Рисунок 2 – ИК-спектры образцов битума, модифицированного различными добавками
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – FT-IR spectra of bitumen samples modified with various additives
Source: compiled by the authors.

При анализе ИК-спектра немодифицированного битума выявлено присутствие пиков, соответствующих деформационным (1460 , 1376 , 721 см^{-1}) и валентным (2952 , 2922 , 2851 см^{-1}) колебаниям CH_2 и CH_3 групп, что показывает свойственное битуму высокое содержание в составе предельных углеводородов, парафинов и масел. Полоса 1604 см^{-1} и пики в низкочастотной области (746 , 807 и 873 см^{-1}) свидетельствуют о наличии ароматических структур в составе битума [26, 27].

При сравнении ИК-спектров исходного битума и модифицированного исследуемыми добавками можно отметить изменение интенсивности полос поглощения битума, а также появление новых пиков. Наиболее близок к спектру исходного битума ИК-спектр вяжущего, модифицированного добавкой Sasobit, что

объясняется тем, что данный модификатор является окисленным полиэтиленовым воском, для которого характерно высокое содержание предельных углеводородов, сходных свходящими в состав битума. Это также подтверждают и данные, полученные китайскими исследователями [27].

При введении в состав вяжущего добавок Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 на ИК-спектрах появляются полосы 3299 и 1566 см^{-1} , соответствующие валентным и деформационным колебаниям NH -групп, полоса в области 1638 см^{-1} , доказывающая присутствие карбонильных групп третичных амидов, а также полоса в области 1248 см^{-1} , свидетельствующая о наличии C-N -групп [28, 29]. Это объясняется наличием в составе Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 амидных соединений.

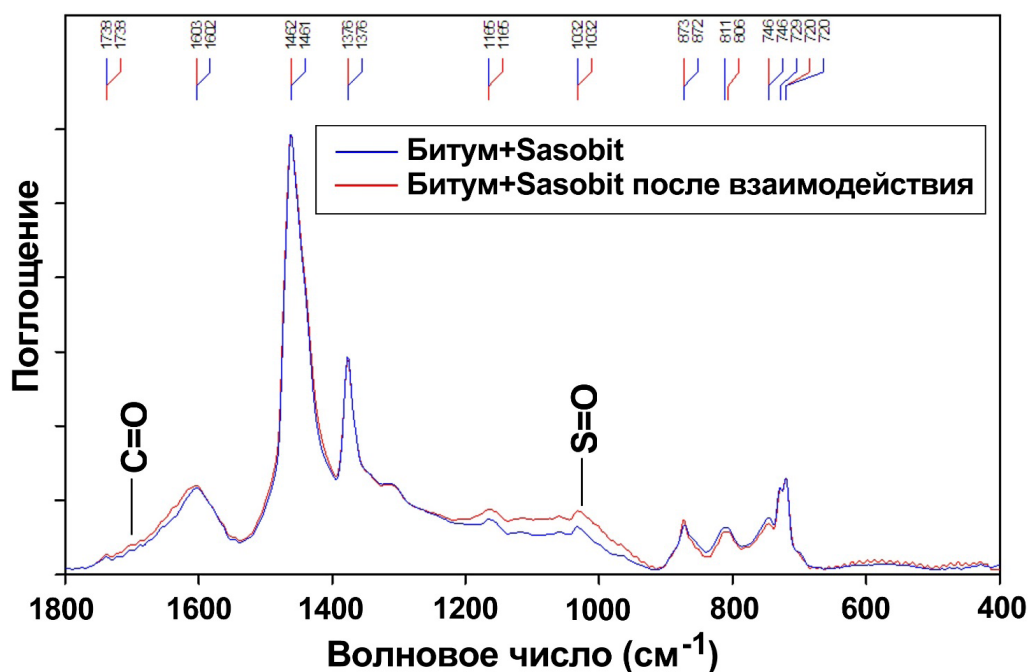


Рисунок 3 – ИК-спектры образцов битума, модифицированного Sasobit, до и после взаимодействия с поверхностью гранитного отсева
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – FT-IR spectra of bitumen samples modified with Sasobit before and after interaction with the surface of grains of granite screenings
Source: compiled by the authors.

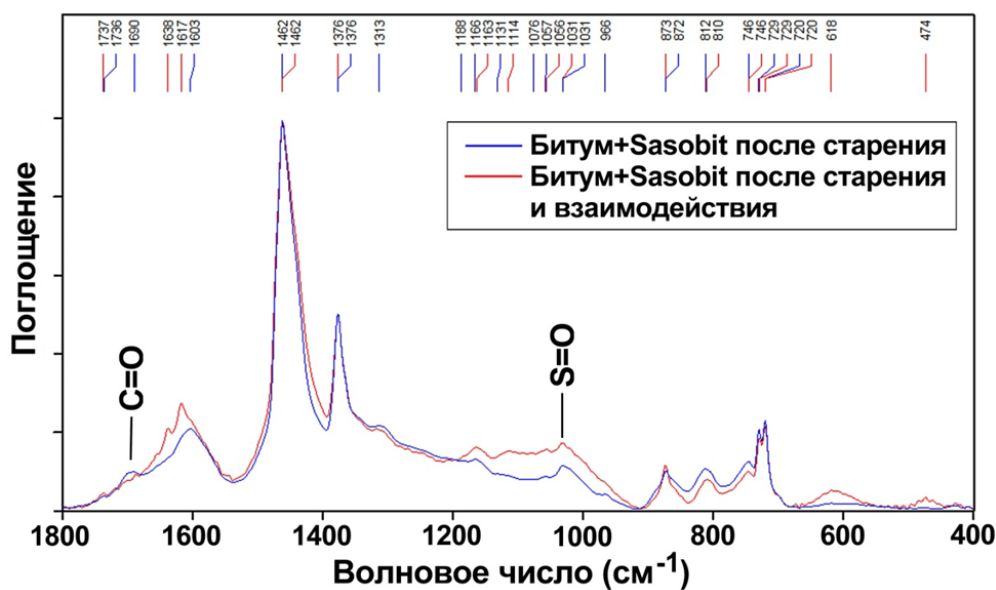


Рисунок 4 – ИК-спектры образцов битума, модифицированного Sasobit, после старения до и после взаимодействия с поверхностью гранитного отсева
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – FT-IR spectra of bitumen samples modified with Sasobit after aging before and after interaction with the surface of grains of granite screenings
Source: compiled by the authors.

При анализе ИК-спектров битума исходного и битума, модифицированного Sasobit, до и после взаимодействия с каменным материалом значительного изменения интенсивностей поглощения не обнаружено. Ввиду большой схожести картин изменения ИК-спектров немодифицированного битума и вяжущего с добавкой Sasobit в данной статье приведены только изменения ИК-спектра битума с Sasobit (рисунок 3). Увеличение количества сульфоксидных групп S=O (1031 см^{-1}) [26] и всей области $\sim 900\text{--}1200\text{ см}^{-1}$ после взаимодействия связано с присутствием в битуме, снятом с минерального материала, мельчайших частиц гранита – полиминеральной алюмосиликатной породы, имеющей максимумы поглощения на ИК-спектрах именно в этом диапазоне. Отсутствие значимого изменения интенсивностей полос ИК-спектра обусловлено тем, что добавка Sasobit не содержит в своем составе

поверхностно-активных веществ, и механизм взаимодействия с поверхностью твердых частиц носит, как и в немодифицированном битуме, преимущественно физический характер. Этим и объясняется невысокий показатель сцепления вяжущего с минеральным материалом (см. рисунок 1, таблицу).

При сравнении ИК-спектров битума, модифицированного Sasobit, после длительного прогрева до и после взаимодействия с гранитным отсевом, заметно, что в отобранном с поверхности минерального зерна вяжущем несколько уменьшается интенсивность пика, соответствующего колебаниям карбонильных групп C=O в области $\sim 1700\text{ см}^{-1}$ (рисунок 4) [26], что также наблюдалось и в состаренном немодифицированном вяжущем. Это свидетельствует о некоторой адсорбции окисленных компонентов битумного вяжущего на поверхности минерального материала.

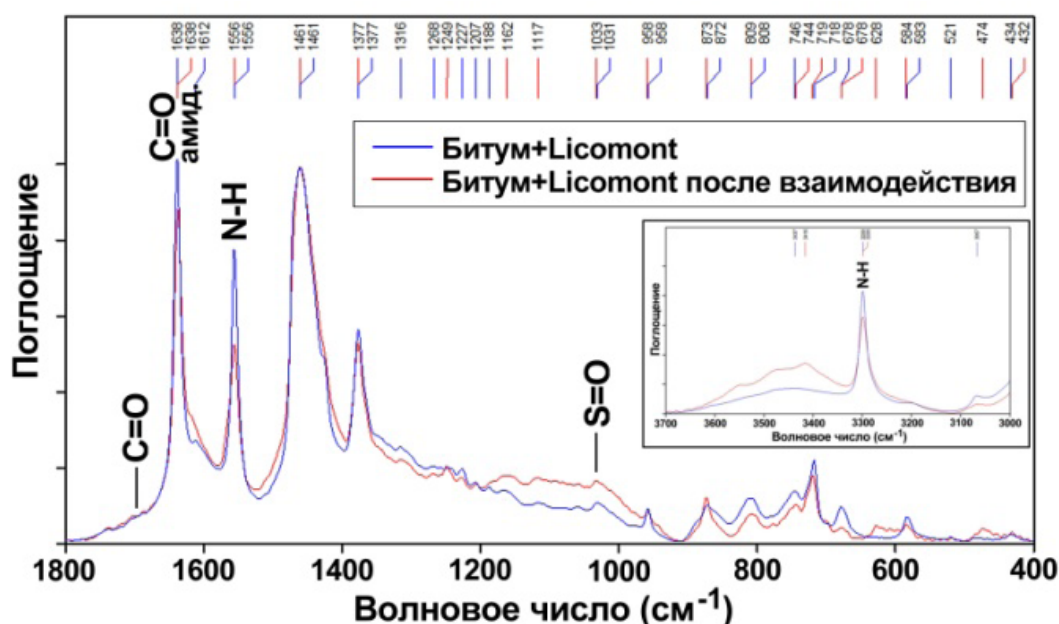


Рисунок 5 – ИК-спектры образцов битума, модифицированного Licomont BS-100, до и после взаимодействия с поверхностью гранитного отсева
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – FT-IR spectra of bitumen samples modified with Licomont BS-100 before and after interaction with the surface of grains of granite screenings
Source: compiled by the authors.

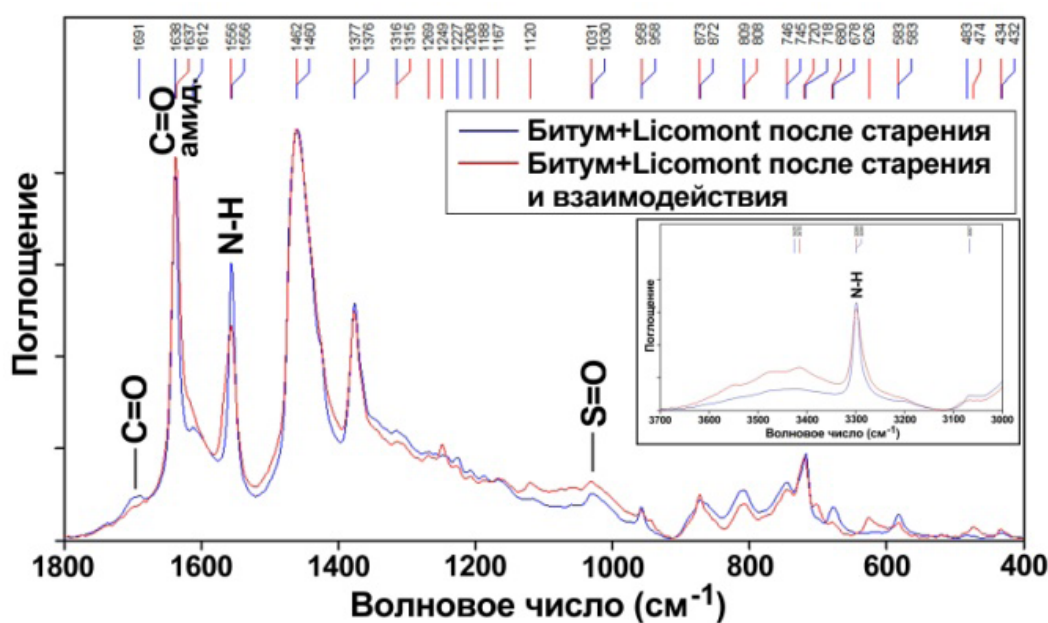


Рисунок 6 – ИК-спектры битума, модифицированного Licomont BS-100, после старения до и после взаимодействия с поверхностью гранитного отсева
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – FT-IR spectra of bitumen modified with Licomont BS-100 after aging before and after interaction with the surface of grains of granite screenings
Source: compiled by the authors.

Поскольку добавка Licomont BS-100 представляет собой амидный воск, она содержит в своем составе поверхностно-активные вещества. Это способствует реализации, помимо физического взаимодействия модифицированного битума с минеральными частицами, химической адсорбции с поверхностью. В результате этого при сравнении ИК-спектров модифицированного указанным воском вяжущего, снятых до и после взаимодействия с минеральным материалом (рисунок 5), заметно значительное снижение интенсивности полос поглощения функциональных групп добавки таких, как N-H (3299 и 1556 cm^{-1}) и C=O в амидах (1638 cm^{-1}) [28, 29]. Однако ввиду того, что реакционные группы в составе добавки соединены с длинными и сложными углеводородными структурами с большой молекулярной массой, действие ПАВ этой добавки локализовано в местах контакта амидного воска в массе битума с минеральной поверхностью. Этим можно объяснить невысокую адгезию модифицированного битумного вяжущего с гранитным заполнителем.

Механизм адгезии состаренного вяжущего с добавкой Licomont BS-100 не меняется, если судить по ИК-спектрам (рисунок 6). Пики, характеризующие функциональные группы добавки N-H (3299 и 1556 cm^{-1}), уменьшают свою интенсивность после взаимодействия. Полоса C=O группы в амидах (1638 cm^{-1}) практически не меняет интенсивности, поскольку на нее накладываются профили O-H-групп, сорбированных бромидом калия при пробоподготовке, высота которых в образце после взаимодействия оказалась существенно выше. Дополнительный вклад в адгезионные свойства после старения вносят окисленные компоненты битума, характеризующиеся полосой поглощения карбонильной группы C=O (~1700 cm^{-1}), которых в битуме после смешения с гранитным отсеком становится несколько меньше. Выводы об изменении содержания сульфоксидных групп S=O (1031 cm^{-1}) сделать затруднительно, поскольку в битумах после взаимодействия присутствуют мельчайшие частицы гранита.

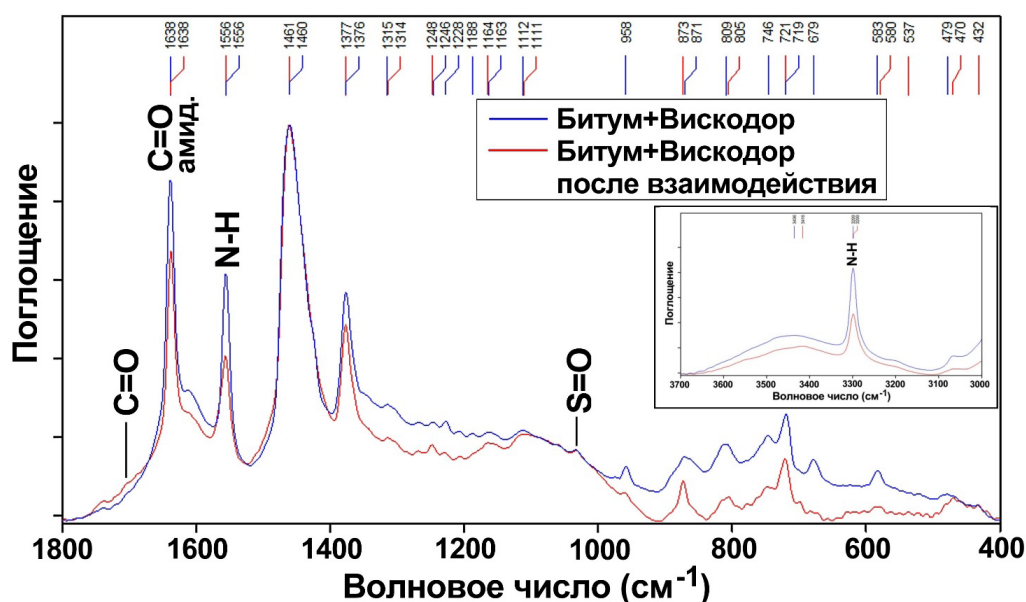


Рисунок 7 – ИК-спектры образцов битума, модифицированного Вискодор ПВ-2, до и после взаимодействия с поверхностью гранитного отсева
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – FT-IR spectra of bitumen samples modified by Viskodor PV-2 before and after interaction with the surface of grains of granite screenings
Source: compiled by the authors.

ПАВ на основе амидов жирных кислот растительных масел, входящие в состав Вискодора ПВ-2, способствуют химическому взаимодействию с активными центрами поверхности заполнителя в дополнение к физическим взаимодействиям, имеющим место на межфазной границе. Это подтверждают результаты ИК-спектроскопии – после взаимодействия интенсивности полос поглощения функциональных групп добавки (N-H (3299 и 1556 cm^{-1}) и C=O в амидах (1638 cm^{-1}) значительно снижа-

ются (рисунок 7). В целом картина очень похожа на ИК-спектры битума, модифицированного добавкой Licomont BS-100 (см. рисунок 5). Но в композиции Вискодор ПВ-2 реакционные группы входят не только в состав восков, как в Licomont BS-100, но и в состав отдельных соединений ПАВ. За счет действия ПАВ достигается хорошая адгезия с каменным материалом, значительно превосходящая все другие составы (см. таблицу, рисунок 1).

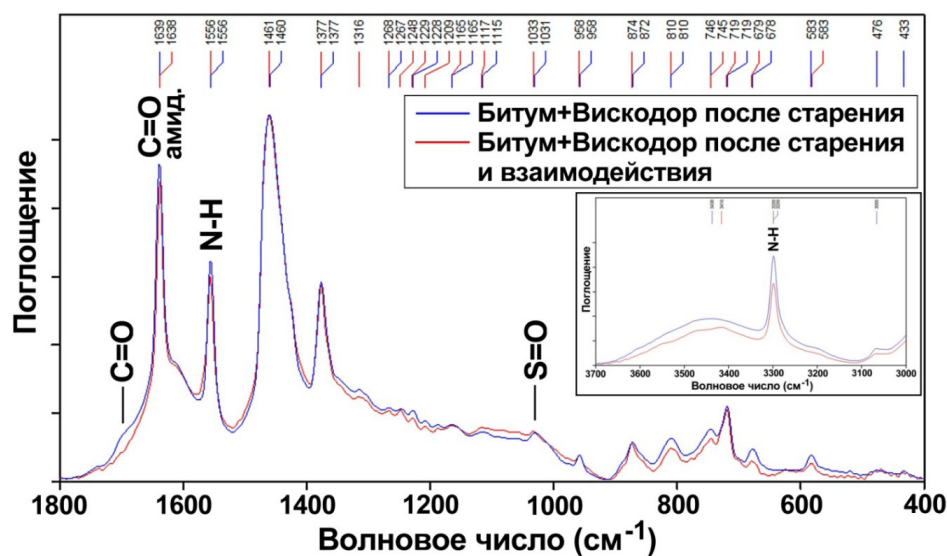


Рисунок 8 – ИК-спектры образцов состаренного битума, модифицированного Вискодор ПВ-2, до и после взаимодействия с поверхностью гранитного отсева
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – FT-IR spectra of samples of aged bitumen modified by ViscodorPV-2 Before and after interaction with the surface of grains of granite screenings
Source: compiled by the authors.

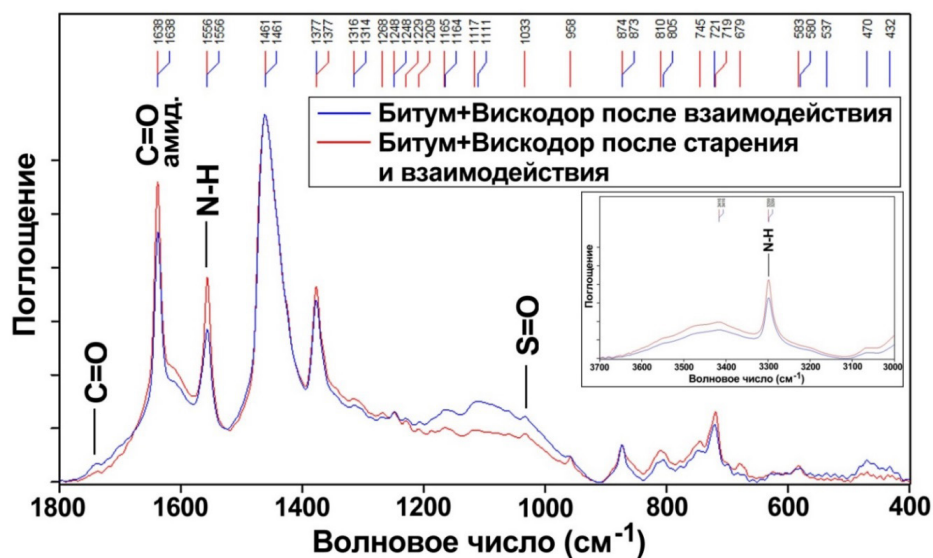


Рисунок 9 – ИК-спектры образцов битума, модифицированного Вискодор ПВ-2, взятого с поверхности зерен гранитного отсева до и после старения
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – FT-IR spectra of bitumen samples modified with Viscodor PV-2 taken from the surface of grains of granite screenings before and after aging
Source: compiled by the authors.

Необходимо отметить, что наблюдаемое на ИК-спектрах уменьшение интенсивностей полос поглощения добавки 3299, 1638 и 1556 см^{-1} значительно сильнее проявляет себя в несостаренном вяжущем. В состаренном битуме оно также заметно (рисунок 8). Дополнительный вклад в адгезию после старения здесь так же, как и на других составах, вносят окисленные компоненты битума, характеризующиеся полосой поглощения группы $\text{C}=\text{O}$ ($\sim 1700 \text{ см}^{-1}$).

Сопоставление ИК-спектров вяжущих с добавкой Вискодор ПВ-2 после взаимодействия с поверхностью минеральных зерен показало, что после термостатирования происходит уменьшение интенсивностей полос поглощения, характеризующих и сульфоксидную ($\text{S}=\text{O}$), и карбонильную ($\text{C}=\text{O}$) группу самого битума (рисунок 9). При этом в области функциональных групп самой добавки все сильно меняется. После старения и последующего взаимодействия с гранитом амидных групп в битуме становится больше, чем до прогрева. Это происходит потому, что в случае несостаренного вяжущего процесс адгезии путем химического взаимодействия ПАВ на основе амидов с поверхностью гранита происходит значительно более интенсивно, чем после старения. Можно предположить, что после старения изменяется механизм адгезии при использовании добавки Вискодор ПВ-2. Адгезия частично осуществляется за счет карбонильных и сульфоксидных соединений, которых после взаимодействия в битуме становится меньше, чем до старения. Таким образом, может происходить определенное переструктурирование битума с восками и ПАВ в составе Вискодора ПВ-2 (в том числе за счет химических процессов) в результате старения, которое впоследствии сказывается на процессах взаимодействия с каменным материалом. Все это приводит к некоторому ухудшению величины адгезии по сравнению с несостаренным вяжущим (см. таблицу, рисунок 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате данной работы выявлено, что все исследуемые восковые добавки несколько улучшают адгезионные свойства битума, но эффективность и механизм улучшения сцепления вяжущего с материалом в данных добавках различны. Так, сцепление битумного вяжущего с добавкой Sasobit возрастает до 36%, с Licomont BS-100 – до 48%, с Вискодор ПВ-2 – до 99% в сравнении с показателем сцепления битума без добавок – 21%.

Результаты ИК-спектроскопии битума, модифицированного Sasobit, до и после взаимодействия с минеральным материалом, показывают, что механизм взаимодействия с поверхностью твердых частиц носит преимущественно физический характер. Это обусловлено тем, что добавка не содержит в своем составе поверхностно-активных веществ.

При анализе ИК-спектров битума, модифицированного Licomont BS-100, до и после взаимодействия с минеральным материалом, выявлено, что механизм взаимодействия с поверхностью минерального материала обусловлен не только физическим взаимодействием, но и посредством химической абсорбции за счет присутствия в составе амидов жирных кислот, выступающих в качестве поверхностно-активных веществ, но эффект увеличения адгезии менее значимый, чем при введении добавки Вискодор ПВ-2, дополнительно содержащей в своем составе комплекс имидазолинов.

Наилучшей адгезией к минеральному материалу обладает битум, модифицированный добавкой Вискодор ПВ-2 (99% согласно оценке по весовому методу и соответствие образцу № 1 по ГОСТ 11508), благодаря наличию в его составе поверхностно-активных веществ. Усиление сцепления вяжущего с минеральным материалом за счет химической адсорбции подтверждают результаты ИК-спектроскопии – после взаимодействия интенсивности полос поглощения функциональных групп добавки ($\text{N}-\text{H}$ (3299 и 1556 см^{-1}) и $\text{C}=\text{O}$ в амидах (1638 см^{-1}) снижаются. После прогрева эффект усиления адгезионных свойств вяжущего с добавкой по сравнению с исходным битумом сохраняется, хотя и несколько снижается по сравнению с показателями сцепления модифицированного вяжущего до прогрева. Вискодор ПВ-2 по эффективности улучшения адгезионных свойств битума не уступает и даже значительно превосходит импортные восковые добавки Sasobit и Licomont BS-100. Из этого следует, что применение комплексной добавки Вискодор ПВ-2 в составе асфальтобетонной смеси взамен импортных добавок на основе восков в результате улучшения адгезионных свойств вяжущего позволит повысить прочность и долговечность дорожного покрытия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yadykina V.V., Akimov A. E., Trautvain A.I, Kholopov V.S. Influence of DAD-TA temperature-reducing additive on physical and mechanical

properties of bitumen and compaction of asphalt concrete. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. No. 327. pp. 1–5. DOI 10.1088/1757-899X/327/3/032006.

2. Kenneth A., Yaw A.T. Warm-Mix Asphalt and Pavement Sustainability: A Review. Open Journal of Civil Engineering. 2016. № 6. P. 84–93. DOI:10.4236/ojce.2016.62008.

3. Лессинч В.П., Бегей А.А. Расширение строительного сезона при устройстве асфальтобетонного покрытия за счет использования теплого асфальтобетона на основе твердых углеводов // Вестник Луганского государственного университета им. Владимира Даля. 2023. № 1(67). С. 101–106.

4. Kalgin Yu.I., Alshahwan A., Panevin N.I. Structural and Mechanical Properties of Modified Hot and Warm Mix Asphalt Concrete. Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2023. No. 2(58). P. 71–75. DOI 10.36622/VSTU.2023.2.58.008.

5. Алшахван А., Калгин Ю.И. Обзор технологий приготовления тёплых асфальтобетонных смесей // Молодой ученый. 2019. № 32(270). С. 102–107.

6. Ядыкина В.В., Михайлова О.А. Влияние температуропонижающих добавок на основе синтетических восков на свойства битума // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2023. № 3. С. 8–18. DOI 10.34031/2071-7318-2022-8-3-8-18.

7. Смирнов Д.С., Броднева В.Е., Лобанова А.С. Анализ опыта применения теплых асфальтобетонных смесей // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 4(50). С. 455–461.

8. Rezaeizadeh H.M., Valenzuela W., Rezagholilou A. New Models for the Properties of Warm Mix Asphalt with Sasobit. CivilEng. 2022. Vol. 3, No. 2. P. 347–364. DOI 10.3390/civileng3020021.

9. Remisova E. Effect of additives on reducing temperature during asphalt mixtures production. 17th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017, Albena, Bulgaria, 2017. Vol. 17. P. 123–130. DOI 10.5593/sgem2017/62/S26.016.

10. Киндеев О.Н., Высоцкая М.А., Курлыкина А.В. Наполненные битумные композиции в строительной индустрии // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023. Т. 50, № 1. С. 194–206. DOI 10.21822/2073-6185-2023-50-1-194-206.

11. Zhang H., Zhang H., Ding H. Thermal stress calculation of wax-based warm mix asphalt considering thermorheologically complex behavior. Construction and Building Materials. 2023. Vol. 368. P. 130488. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2023.130488.

12. QiuYa., Xie Q., Ding H., Xuan W. A novel method for determining the wax precipitation temperature in wax-based warm mix asphalt. International Journal of Pavement Engineering. 2023. Vol. 24, No. 2. DOI 10.1080/10298436.2023.2287143.

13. Дюрягина А.Н., Бызова Ю.С., Саликова Н.С. Изучение влияния модификаторов на процессы смачивания минеральных наполните-

лей гидрофобность битумных пленок // Химический журнал Казахстана. 2022. № 3(79). С. 28–38. DOI 10.51580/2022-3/2710-1185.77.

14. Pstrowska K., Gunka V., Sidunlu Adhesion in Bitumen aggregate System: Adhesion Mechanism and Test Methods. Coatings. 2022. Vol. 12, No. 12. p. 1934. DOI 10.3390/coatings12121934.

15. Dyuryagina A.N., Degert A.I., Lutsenko A.A., Shirina T.V. Current state of the methods for determining the adhesive and cohesive properties of road bitumen // Химический журнал Казахстана. 2023. № 4(84). pp. 101–117. DOI 10.51580/2023-4.2710-1185.44.

16. Peng Ch., Yang H., You Zh. Investigation of Adhesion Performance of Wax Based Warm Mix Asphalt with Molecular Dynamics Simulation. Materials. 2022. Vol. 15, No. 17. P. 5930. DOI 10.3390/ma15175930.

17. Пыриг Я.И., Галкин А.В. Сравнительная оценка влияния энергосберегающих добавок на свойства битума // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2020. № 90. С. 114–124. DOI 10.30977/BUL.2219-5548.2020.90.0.114.

18. Высоцкая М.А., Шеховцова С.Ю., Обухов А.Г., Есипова Ю.Ю. Устойчивость модифицированных вяжущих на основе окисленных и остаточных битумов к термодеструкции // Вестник СибАДИ. 2017; 6(58): 140–147. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6\(58\)-140-147](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6(58)-140-147)

19. Шестаков Н.И., Хохлова Н.В., Приходько А.Ю. Влияние термостабилизирующих добавок на адгезионные свойства битумов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 2(782). С. 52–62. DOI 10.32683/0536-1052-2024-782-2-52-62.

20. Ядыкина В.В., Холопов В.С., Михайлова О.А. Изменение свойств битума, модифицированного температуропонижающими добавками // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2022. № 3(155). С. 100–104.

21. Silva H.M.R.D., Oliveira, J.R.M. Peralta J., Zoorob S.E. Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents. Construction and Building Materials. 2010. № 9. Pp. 1621–1631. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2010.02.030

22. Sigwarth T., Büchner J., Wistuba M. P. Bio-Degradable Wax to Modify Asphalt Binder for Warm Mix Asphalt. Sustainability. 2022. Vol. 14, No. 16. P. 10219. DOI 10.3390/su141610219.

23. Jamshidi A., Hamza M.O., You Z. Performance of Warm Mix Asphalt containing Sasobit: State-of-the-art. Construction and Building Materials. 2013. № 38. Pp. 530–553. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.015.

24. Zhao G. Workability of Sasobit Warm Mixture Asphalt. 2012 International Conference on Future Energy, Environment, and Materials. 2012. № 16. Pp. 1230–1236. DOI:10.1016/j.egypro.2012.01.196.

25. Tong B., Song, X., Shen, J., Jiang, T., Chen, J., Niu, J. Effect of Sasobit warm mix on micro properties of asphalt with different degrees of regeneration // Frontiers in Materials. 2022. № 9. DOI 10.3389/fmats.2022.950550.

26. Weigel S., Stephan D., The prediction of bitumen properties based on FTIR and multivariate analysis methods// *Fuel*. 2017. Vol. 208. Pp. 655–661. DOI 10.1016/j.fuel.2017.07.048.

27. Yue M., Yue J., Wang R., Xiong Y. Evaluating the fatigue characteristics and healing potential of asphalt binder modified with Sasobit and polymers using linear amplitude sweep test// *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 289. P. 123054. DOI 10.1016/j.conbuildmat. 123054.

28. Шарафиева Р.Р., Умарова Н.Н., Сопин В.Ф. Применение методов ИК-спектроскопии и хеометрики в анализе имидазолинов// *Вестник Технологического университета*. 2023. Т. 26, № 6. С. 62–65. DOI 10.55421/1998-7072 2023 26 6 62.

29. Аюпов Л.И., Потапова Р.И., Казакулов Д.А., Хакимуллин Ю. Н. Исследование составов дорожных поверхностно-активных веществ // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2018. № 3(45). С. 178–188.

REFERENCES

1. Yadykina V.V., Akimov A.E., Trautvain A.I., Kholopov V.S. Influence of DAD-TA temperature-reducing additive on physical and mechanical properties of bitumen and compaction of asphalt concrete. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 327: 1–5. DOI 10.1088/1757-899X/327/3/032006.

2. Kenneth A., Yaw A.T. Warm-Mix Asphalt and Pavement Sustainability: A Review. *Open Journal of Civil Engineering*. 2016; 6: 84–93. DOI:10.4236/ojce.2016.62008.

3. Lessinch V.P., Begey A.A. Expansion of the construction season in the construction of asphalt concrete pavement due to the use of warm asphalt concrete based on solid hydrocarbons. *Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Vladimira Dalja*. 2023; 1(67): 101–106. (In Russ.)

4. Kalgin Yu.I., Alshahwan A., Panevin N.I. Structural and Mechanical Properties of Modified Hot and Warm Mix Asphalt Concrete. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2023; 2(58): 71–75. DOI 10.36622/VSTU.2023.2.58.008.

5. Alshakhvan A., Kalgin Yu.I. Review of technologies for the preparation of warm asphalt concrete mixtures. *Molodojuchenyj*. 2019; 32(270): 102–107. (In Russ.)

6. Yadykina V.V. Mikhailova O.A. The effect of temperature-reducing additives based on synthetic waxes on the properties of bitumen. *Bulletin of Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov*. 2023; 3: 8–18. DOI 10.34031/2071-7318-2022-8-3-8-18. (In Russ.)

7. Smirnov D.S. Brodneva V.E., Lobanova A.S. Analysis of application experience of warm asphalt mixes. *News of the KSUAE*. 2019; 4(50): 455–461. (In Russ.)

8. Rezaeizadeh H.M., Valenzuela W., Rezagholilou A. New Models for the Properties of Warm Mix Asphalt with Sasobit. *CivilEng*. 2022; Vol. 3, No. 2: 347–364. DOI 10.3390/civileng3020021.

9. Remisova E. Effect of additives on reducing temperature during asphalt mixtures production. *17th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017*, Albena, Bulgaria. 2017; 17: 123–130. DOI 10.5593/sgem2017/62/S26.016.

10. Kindeev O.N., Vysotskaya M.A., Kurlykina A.V. Filled bituminous compositions in the construction industry. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2023; 50(1): 194–206. (In Russ.) <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2023-50-1-194-206>

11. Zhang H., Zhang H., Ding H. Thermal stress calculation of wax-based warm mix asphalt considering thermorheologically complex behavior. *Construction and Building Materials*. 2023; 368: 130488. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2023.130488.

12. Qiu Ya., Xie Q., Ding H., Xuan W. A novel method for determining the wax precipitation temperature in wax-based warm mix asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*. 2023; Vol. 24, No. 2. DOI 10.1080/10298436.2023.2287143.

13. Dyuryagina A.N., Byzova Yu.S., Salikova N.S., Ostrovnoy K.A., Gorshkova T.A., Savel'yeva P.O. Study of the influence of modifiers on the processes of wetting mineral fillers and hydrophobicity of bitumen films. *Chem. J. Kaz.* 2022, 3(79), 28–38. DOI: <https://doi.org/10.51580/2022-3/2710-1185.77>

14. Pstrowska K., Gunka V., Sidunlu Adhesion in Bitumen aggregate System: Adhesion Mechanism and Test Methods. *Coatings*. 2022; Vol. 12, No. 12: 1934. DOI 10.3390/coatings12121934.

15. Dyuryagina A.N., Degert A.I., Lutsenko A.A., Shirina T.V. Current state of the methods for determining the adhesive and cohesive properties of road bitumen. *Chemical Journal of Kazakhstan*. 2023; 4(84): 101–117. DOI 10.51580/2023-4.2710-1185.44.

16. Peng Ch., Yang H., You Zh. Investigation of Adhesion Performance of Wax Based Warm Mix Asphalt with Molecular Dynamics Simulation. *Materials*. 2022; Vol. 15, No. 17: 5930. DOI 10.3390/ma15175930.

17. Pyrig Ya.I., Galkin A.V. Comparative assessment of the effect of energy-saving additives on bitumen properties. *Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Road University*. 2020; 90: 114–124. (In Russ.) DOI 10.30977/BUL.2219-5548.2020.90.0.114.

18. Vysotskaya M.A., Shekhovtsova S.Yu., Obukhov A.G., Esipova J.Yu. Stability of modified binders on basis of oxidized and residual bitumens to thermodestructions. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017; 6(58): 140–147. (In Russ.) [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6\(58\)-140-147](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-6(58)-140-147)

19. Shestakov N.I., Khokhlova N.V., Prikhodko A.Yu. The effect of heat-stabilizing additives on the adhesive properties of bitumen. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2024; (2): 52–62. (In Russ.) DOI: 10.32683/0536-1052-2024-782-2-52-62.

20. Yadykina V.V. Kholopov V.S. Mikhailova O.A. Changing the properties of bitumen modified with tem-

perature&reducing additives. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2022; 3(155): 100–104. (In Russ.)

21. Silva H.M.R.D., Oliveira, J.R.M. Peralta J., Zoorob S.E. Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents. *Construction and Building Materials*. 2010; 9: 1621–1631. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2010.02.030

22. Sigwarth T., Büchner J., Wistuba M. P. Bio-Degradable Wax to Modify Asphalt Binder for Warm Mix Asphalt. *Sustainability*. 2022; 14, No. 16: 10219. DOI 10.3390/su141610219.

23. Jamshidi A., Hamza M.O., You Z. Performance of Warm Mix Asphalt containing Sasobit: State-of-the-art. *Construction and Building Materials*. 2013; 38: 530–553. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.015.

24. Zhao G. Workability of Sasobit Warm Mixture Asphalt. *2012 International Conference on Future Energy, Environment, and Materials*. 2012; 16: 1230–1236. DOI:10.1016/j.egypro.2012.01.196.

25. Tong B., Song, X., Shen, J., Jiang, T., Chen, J., Niu, J. Effect of Sasobit warm mix on micro properties of asphalt with different degrees of regeneration. *Frontiers in Materials*. 2022; 9. DOI 10.3389/fmats.2022.950550.

26. Weigel S., Stephan D., The prediction of bitumen properties based on FTIR and multivariate analysis methods. *Fuel*. 2017; 208: 655–661. DOI 10.1016/j.fuel.2017.07.048.

27. Yue M., Yue J., Wang R., Xiong Y. Evaluating the fatigue characteristics and healing potential of asphalt binder modified with Sasobit and polymers using linear amplitude sweep test. *Construction and Building Materials*. 2021; 289. P: 123054. DOI 10.1016/j.conbuildmat. 123054.

28. Sharafieva R.R., Umarova N.N., Sopin V.F. Application of ir spectroscopy and chemometrics in the analysis of imidazolines. *Herald of technological university*. 2023; Vol. 26, No. 6: 62–65. (In Russ.) DOI 10.55421/1998-7072 2023 26 6 62.

29. Ayupov L.I., Potapova R.I., Kazakulov D.A., Khakimullin Yu.N. Road surfactants composition investigation. *News of the KSUAE*. 2018; 3(45): 178–188. (In Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Ядыкина В.В. Постановка цели и задачи исследования, разработка алгоритма методики проведения исследования, научное сопровождение при подготовке статьи, доработка и корректировка выводов.

Михайлова О.А. Описание материалов и методов проведения исследования, обзор литературы. Выполнение эксперимента по оценке адгезионных свойств образцов, обработка результатов исследования, подготовка и оформление статьи.

Лебедев М.С. Проведение спектрального анализа образцов, обработка и оформление резуль-

татов исследования, анализ и интерпретация данных.

Фомина Е.В. Консультирование по вопросам проведения экспериментов и написанию статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Yadykina V.V. Statement of the purpose and objectives of the study; development of an algorithm for the methodology of the study, scientific support in the preparation of the article, revision and correction of conclusions.

Mikhailova O.A. Description of the materials and methods of the study; review of the literature, conducting an experiment to assess the adhesive properties of samples. Processing of research results, preparation and formatting of the article.

Lebedev M.S. Spectral analysis of samples, processing and registration of research results, analysis and interpretation of data.

Fomina E.V. Consulting on experiments and writing the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ядыкина Валентина Васильевна – д-р техн. наук, проф. кафедры «Автомобильные и железные дороги» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8289-2361>,

SPIN-код: 2468-5657,

e-mail: vvya@intbel.ru

Михайлова Ольга Анатольевна – аспирант кафедры «Автомобильные и железные дороги» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5896-5524>,

SPIN-код: 1581-1030,

e-mail: mihaylovalymar@mail.ru

Лебедев Михаил Сергеевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник научно-образовательного центра «Аддитивные технологии» Национального исследовательского Томского государственного университета (634050, г. Томск, пр-т Ленина, д. 36).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3194-9238>,

SPIN-код: 7102-9514,

e-mail: michael1987@yandex.ru

Фомина Екатерина Викторовна – канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры «Строительные материалы и конструкции» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0542-0963>,

SPIN-код: 5270-6285,

e-mail: fomina.katerina@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yadykina Valentina V. – Dr. of Sci. (Eng.), Professor of the Department of Roads and Railways of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8289-2361>,

SPIN-code: 2468-5657,

e-mail: vvya@intbel.ru

Mikhailova Olga A. – postgraduate student at the Department of Roads and Railways of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5896-5524>,

SPIN-code: 1581-1030,

e-mail: mihaylovalymar@mail.ru

Lebedev Mikhail S. – Cand. of Sci. (Eng.), Senior Researcher at the Scientific and Educational Center “Additive Technologies”, National Research Tomsk State University (634050, Tomsk, Lenin Ave., 36).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3194-9238>,

SPIN-code: 7102-9514,

e-mail: michaell1987@yandex.ru

Fomina Ekaterina V. – Cand. of Sci. (Eng.), Senior Researcher at the Department of Building Materials and Structures of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0542-0963>,

SPIN-code: 5270-6285,

e-mail: fomina.katerina@mail.ru



АРХИТЕКТУРНЫЕ БЕТОНЫ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ 3D-ПЕЧАТИ

И.А. Столетова (И.А. Черепанова) ✉, А.А. Володченко
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия
✉ ответственный автор
irinadiusa@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из восходящих архитектурных трендов настоящего времени является повышение комфортности и эстетичности территорий населённых пунктов за счёт художественного благоустройства, значительная роль в котором отводится различным видам малых архитектурных форм. Наиболее бюджетным и в то же время надёжным и долговечным материалом для них является архитектурный бетон. Узким местом использования бетона для изготовления малых архитектурных форм является относительная сложность придания ему сложных пространственных конфигураций. На современном уровне развития технологии бетонных работ данный недостаток может быть легко преодолен за счёт использования технологии строительной 3D-печати. Цель работы – создание эффективных архитектурных бетонов для изготовления малых архитектурных форм методом строительной 3D-печати на основе композиционных вяжущих, содержащих в качестве минеральной добавки выветренные кварцитопесчаники, как один из видов местного энергоэффективного сырья.

Материалы и методы. В разделе приведены сравнительные характеристики выветренных и неветренных кварцитопесчаников.

Результаты. Представлены данные по динамике помола компонентов; составах и характеристиках композиционных вяжущих и мелкозернистых бетонов на их основе; результатах изготовления опытной партии малых архитектурных форм методом строительной печати.

Обсуждение. Представлено описание и анализ полученных экспериментальных данных. Сформулированы выводы, в которых отмечается, что для организации выпуска современных малых архитектурных форм представляется технология строительной 3D-печати, позволяющая реализовать сложные разнообразные пространственные формы изделий с любым уровнем индивидуализации без повышения издержек.

Заключение. Разработанные формовочные смеси подтвердили высокую эффективность использования выветренного кварцитопесчаника в составе композиционного вяжущего и техногенного песка. Внедрение данных материалов отвечает требованиям энерго- и ресурсосбережения, так как снижается потребление портландцемента и невозобновляемых природных ресурсов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: архитектурный бетон, аддитивные технологии, строительная 3D-печать, композиционное вяжущее, энергоэффективное минеральное сырьё, выветренный кварцитопесчаник, малая архитектурная форма, благоустройство территорий

БЛАГОДАРНОСТИ: работа выполнена в рамках Программы «Приоритет – 2030» на базе Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова. Работа выполнена с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ имени В.Г. Шухова. Автор выражает благодарность д-ру техн. наук, проф. Лесовику Валерию Станиславовичу, канд. техн. наук, доц. Агеевой Марине Сергеевне и канд. техн. наук, доц. Елистраткину Михаилу Юрьевичу (Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова) за консультации по основным положениям работы. Автор благодарит компанию БетоникАрт (г. Белгород) за опытно-промышленную апробацию результатов исследований, а также выражает признательность рецензентам, вложившим свои силы и знания в повышение качества данной работы.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> и Правительства Белгородской области, Соглашение №3 от 24.03.2022.

© Столетова И.А. (Черепанова И.А.), Володченко А.А., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Статья поступила в редакцию 24.10.2024; одобрена после рецензирования 28.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Столетова И.А. (Черепанова И.А.), Володченко А.А. Архитектурные бетоны для строительной 3D-печати // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 1002-1016. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-1002-1016>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-1002-1016>

EDN: ETMVLU

ARCHITECTURAL CONCRETES FOR 3D CONSTRUCTION PRINTING

*Irina A. Stoletova (I.A. Cherepanova) ✉, Alexander A. Volodchenko
Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhov,*

Belgorod, Russia

✉ *corresponding author
irinadiusa@gmail.com*

ABSTRACT

Introduction. One of the rising architectural trends of the present time is to increase the comfort and aesthetics of the territories of populated areas through artistic improvement, a significant role in which is given to various types of small architectural forms. The most budgetary and, at the same time, reliable and durable material for them is architectural concrete. The bottleneck in the use of concrete for the manufacture of small architectural forms is the relative difficulty of giving it complex spatial configurations. At the current level of development of concrete work technology, this drawback can be easily overcome through the use of construction 3D printing technology. The aim of the work was to develop effective architectural concrete for the manufacture of small architectural forms using the 3D construction printing method, based on composite binders containing weathered quartzite sandstones as a mineral additive, as one of the types of local energy-efficient raw materials. Materials and methods: The section presents comparative characteristics of weathered and unweathered quartzite sandstones.

Results. The data on the dynamics of component grinding; compositions and characteristics of composite binders and fine-grained concretes based on them; results of manufacturing a pilot batch of small architectural forms using the construction printing method are presented.

Discussion and conclusions. The description and analysis of the obtained experimental data are presented. The conclusions are formulated in which it is noted that for the organization of the production of modern small architectural forms, the technology of 3D construction printing is used, which allows the implementation of complex various spatial forms of products with any level of individualization without increasing costs. The developed molding mixtures confirmed the high efficiency of using weathered quartzite sandstone as part of a composite binder and technogenic sand. The introduction of the developed materials meets the requirements of energy and resource conservation, since the consumption of Portland cement and non-renewable natural resources is reduced.

KEYWORDS: architectural concrete, additive technologies, construction 3D printing, composite binder, energy-efficient mineral raw materials, weathered quartzite sandstone, small architectural form, landscaping

ACKNOWLEDGEMENTS. The work was carried out within the framework of the Priority 2030 Program at V.G. Shukhov Belgorod State Technological University. The work was performed using the equipment of the High Technology Center of V.G. Shukhov Belgorod State Technological University. The author expresses his gratitude to Dr. Sc., Prof. Valeriy Stanislavovich Lesovik, Dr. Sc., Associate Professor Marina Sergeevna Ageeva and Dr. Sc. Sc., Associate Professor Mikhail Yuryevich Elistratkin (V.G. Shukhov Belgorod State Technological University) for consultations on the main provisions of the work. The author would like to thank the company BetonikArt (Belgorod) for pilot testing of the research results. The author expresses his gratitude to the reviewers who invested their efforts and knowledge in improving the quality of this work.

© Stoletova I.A. (Cherepanova I.A.), Volodchenko A.A., 2024



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

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> and the Government of the Belgorod Region, Agreement No. 3 dated 03.24.2022.

The article was submitted: 24.10.2024 approved after reviewing: 28.11.2024; accepted for publication: 16.12.2024.

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. Stoletova I.A. (Cherepanova I.A.), Volodchenko A.A. Architectural concretes for 3d construction printing. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2024; 21 (6): 1002-1016. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-1002-1016>

ВВЕДЕНИЕ

Одним из восходящих архитектурных трендов настоящего времени является повышение комфортности и эстетичности территорий населённых пунктов за счёт художественного благоустройства, значительная роль в котором отводится различным видам малых архитектурных форм (МАФ). Их грамотная установка с учётом психологии, эргономики, колористики и других научно обоснованных принципов позволяет зонировать и логически организовывать пространство, формировать требуемый эмоциональный фон у людей, осуществлять информационную, образовательную и развлекательную функцию [1].

В качестве материалов для изготовления МАФ широкое применение нашли древесина, металлы с пониженной склонностью к коррозии, стекло, полимерные материалы. Однако для большинства из них характерны высокая стоимость (металлы, стекло), для некоторых – недостаточная долговечность (древесина, полимеры и др.) или высокая сложность управления формой (стекло и др.)¹. В этой связи, с учётом необходимости наполнения активно развивающегося рынка малых архитектурных форм, особый интерес вновь обретает архитектурный бетон, ранее применявшийся для этих целей и незаслуженно забытый как наследие Советского Союза [2].

Бетон является крайне «гибким» материалом с точки зрения управления свойствами, себестоимостью, эстетичностью. Под термином «архитектурный бетон» следует понимать разновидность бетона, предназначенную как для выполнения конструкционной функции, так и решения декоративно-прикладных задач, имеющих художественную и эстетическую ценность [3].

Узким местом использования бетона для изготовления МАФ является относительная сложность придания ему сложных пространственных конфигураций. В рамках традиционной технологии получение бетонных изделий осуществляется с использованием металлических, реже полимерных форм, сравнительно простой геометрии, что связано с необходимостью обеспечения их разборности и трудоёмкостью обслуживания. На современном уровне развития технологии бетонных работ данный недостаток может быть легко преодолен, в частности, за счёт использования технологии аддитивного (послойного) формирования конструкций методом строительной 3D-печати [4].

Например, ещё в 2008 г. компания Kingdom, чтобы доказать осуществимость 3D-печати для малых архитектурных форм, изготовила изогнутую скамью (2x0,9x0,8 м) путем печати 128 слоев при скорости печати 20 мин/слой [5]. Особенностью технологии является то, что здесь не используются инструменты для выравнивания, поэтому поверхность созданной конструкции умышленно получается грубой и незавершенной.

Английская компания Monolite UK предложила струйную технологию послойного синтеза в строительстве (BinderJetting), что осуществляется за счет нанесения определенного порошкообразного материала с последующим склеиванием вяжущим веществом [6]. Основное преимущество этого метода перед другими примерами 3D-печати в строительстве заключается в том, что вся конструкция поддерживается в процессе печати за счет дополнительного песка, окружающего печатные элементы [7].

Разработкой и изучением новых строительных материалов и методов, используемых в

¹. Композиты и среда обитания человека как непрерывный процесс взаимодействия / В.С. Лесовик, М.Ю. Елистраткин, Е.В. Фомина [и др.] // Фундаментальные поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2022–2023 годы: Научные труды РААСН. В 2-х томах. М.: Издательство АСВ, 2024. С. 251–259.

технологиях послойного синтеза, в России занимаются многие ученые ведущих университетов страны, что также способствует более широкомасштабному внедрению аддитивных 3D-технологий в стройиндустрии [8]. Активная разработка самих устройств 3D-принтеров ведется в государственных научных и образовательных учреждениях [9].

Однако применение новой технологии формирования влечёт за собой проблему разработки специализированных бетонных смесей, отвечающих одновременно как требованиям строительной печати, так и архитектурных бетонов. Учитывая высокую технологичность 3D-печати, разрабатываемые составы должны быть гармонизированы с ней по научно-техническому уровню применяемых решений и обеспечивать максимальное раскрытие потенциала новой технологии [10].

Так, одним из устоявшихся трендов, при решении нестандартных задач в сфере бетоноведения, стал переход от традиционных цементов к композиционным вяжущим, получаемым на их основе. Целенаправленным выбором минеральной добавки, режима механохимической активации и химических модификаторов появляется возможность регулировать свойства получаемого вяжущего и смесей на его основе в очень широких пределах.

В работе [11] приводятся исследования по получению композиционных вяжущих с различными реологическими характеристиками для технологий послойного синтеза с использованием различных минеральных добавок, полученных из вторичного сырья. Содержание клинкерной составляющей варьировалось в пределах 50%. Предлагаемые композиционные вяжущие можно использовать при различных принципах работы формирующих устройств. При разработке составов КВ очень важно рационально подобрать соотношение входящих компонентов и способ получения композиционного вяжущего. При разработке композиционных вяжущих, а также для повышения их эффективности необходимо использовать горные породы, обладающие высокой свободной внутренней энергией. Подобный подход позволяет получать на их основе композиционные вяжущие и формовочные смеси, свойства которых удовлетворяют требованиям технологической 3D-печати.

Актуальным подходом, основанным на принципах трансдисциплинарности, стало расширение использования нестандартных видов сырья, обладающих повышенной внутренней энергией или подвергнувшихся ча-

стичной природной деструкции, в качестве минеральных добавок при получении композиционных вяжущих. Это открывает широкий простор для расширения сферы применения последних, снижения энергозатрат при получении эффективных высокотехнологичных бетонов, к которым можно отнести архитектурные бетоны для аддитивного формования.

Одним из крупнотоннажных видов сырья на территории Белгородской области являются кварцитопесчаники, утвержденные Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых, относящиеся к зеленосланцевой степени метаморфизма с породообразующим минералом кварца, отличающимся дефектной структурой кристаллической решетки. Доказано, что применение кварцитопесчаника для получения композиционных вяжущих позволяет существенно снизить расход портландцемента, что актуально при решении задач снижения глобальной антропогенной эмиссии парниковых газов [12].

В то же время мощность зоны выветренных кварцитопесчаников (ВКВП) составляет от 20 до 50 м. По основным физическим свойствам (плотность, морозостойкость и т.д.) эта порода не соответствует нормативным документам для получения щебня, поэтому она не внесена в сырьевую базу и ее запасы не утверждены Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых [13].

Выветривание – это сложный комплекс экзогенных процессов, открытая термодинамическая система, в которой происходят механические, физические, химические и биологические процессы преобразования горных пород в условиях поверхностной части литосферы. При выветривании происходит разрушение текстуры и структуры исходных горных пород за счет целого комплекса гипергенных процессов, в том числе неравномерного нагревания и охлаждения [14]. Различные породообразующие минералы имеют неодинаковые коэффициенты теплового расширения, поэтому при изменении температуры испытывают деформации в различной степени. И в результате длительного воздействия колебаний температуры, а также других факторов (например, замерзания и оттаивания в микротрещинах воды и т.д.) кварцитопесчаники распадаются на отдельные обломки. При меньшей степени развития указанных процессов структура частиц материала становится более дефектной, что обуславливает её высокую размалываемость и химическую активность [15]. Однако данный вопрос на настоящий момент изучен недостаточно.

В этой связи целью работы стало создание эффективных архитектурных бетонов для изготовления малых архитектурных форм методом строительной 3D-печати на основе композиционных вяжущих, содержащих в качестве минеральной добавки выветренные кварцитопесчаники.

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

- исследование влияния КВ20 и КВ 50 на ВКВП, отсева КВП фракции 0,315–1,25 мм в качестве заполнителя на свойства бетона;
- подбор эффективных добавок-пластификаторов;
- подбор составов 3Д-бетона для малых архитектурных форм на основе КВП;

– изучение формуемости и формоустойчивости.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе в качестве основы для получения композиционных вяжущих и для изготовления контрольных составов применялся цемент ЦЕМ I 42,5 Н (АО «Себряковцемент») с нормальной густотой цементного теста 26,7%.

В качестве сырья для получения минеральных добавок использовались кварцитопесчаники (КВП) из зоны добычи железной руды Лебединского ГОКа (Белгородская обл.). Характеристики выветренного и невыветренного КВП представлены в таблице 1, микроструктура показана на рисунке 1.

Таблица 1
Сравнительные показатели кварцитопесчаников
Источник: составлено автором.

Table 1
Comparative indicators of quartzite sandstones
Source: compiled by the author.

Показатель	Ныветренный	Выветренный
Истинная плотность рист, кг/м3	2650	2600
Средняя плотность, кг/м3	2630	2290
Пористость, %	0,91	17
Предел прочности при сжатии, МПа	1450	890
Морозостойкость, циклы	250	20

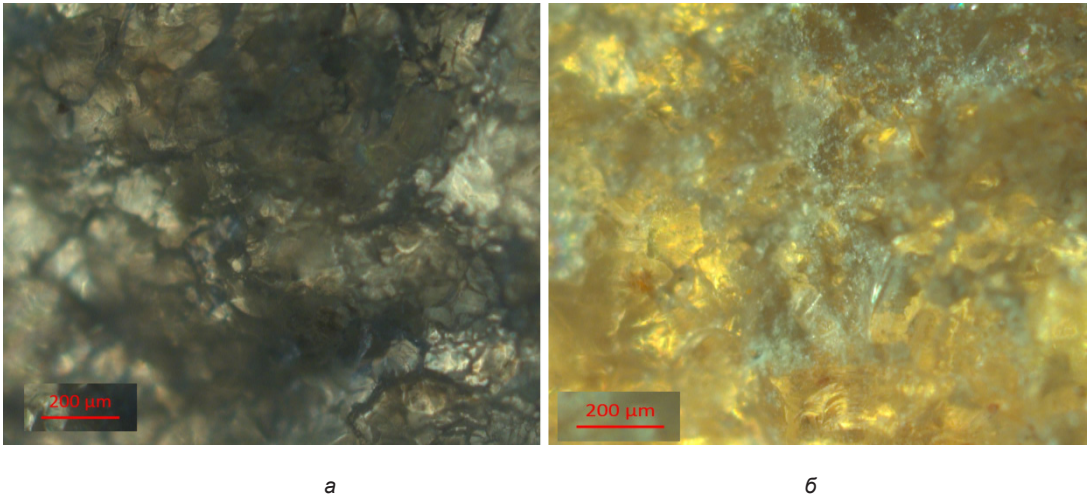


Рисунок 1 – Пластины толщиной 0,5 мм породы кварцитопесчаника:
а – незатронутый процессами выветривания; б – выветренный
Источник: составлено автором.

Figure 1 – 0.5 mm thick plates of quartzite sandstone rock:
a – unaffected by weathering processes; b – weathered
Source: compiled by the author.

Таблица 2
Зерновой состав песка Безлюдовского месторождения
Источник: составлено автором.

Table 2
Grain composition of sand from the Bezlyudovsky deposit
Source: compiled by the author.

Показатели	Размер отверстий сит, мм						Пыль
	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	
Остатки на ситах, г:	6,9	20,30	38,64	104,3	273,98	452,5	103,38
частные, %	0,69	2,03	3,86	10,4	27,4	45,3	10,32
полные, %	0,69	2,72	6,58	16,98	44,38	89,68	100
Плотность упаковки	0,60	0,61	0,62	0,63	0,61	0,58	0,56
Модуль крупности песка	Мкр =1,71						

Таблица 3
Физико-механические характеристики отсева кварцитопесчаника в естественном виде
Источник: составлено автором.

Table 3
Physical and mechanical characteristics of quartzite sandstone screenings in natural form
Source: compiled by the author.

Наименование показателя	Отсев дробления КВП
Модуль крупности	3,55
Насыпная плотность в неуплотненном состоянии, кг/м³	1410
Насыпная плотность в уплотненном состоянии, кг/м³	1490
Истинная плотность, кг/м³	2,71
Пустотность, %	45,8
Водопоглощение, %	5,3
Цементопотребность	0,530

В качестве мелких заполнителей при получении бетонов применялся природный кварцевый песок Безлюдовского месторождения (Белгородская обл.) и отсев кварцитопесчаника, основные характеристики которых представлены в таблицах 2 и 3 соответственно.

В качестве химических добавок при получении мелкозернистых бетонов использовались пластификатор Линомикс ПК и воздухововлекающая добавка Полипласт Аэро [16].

Помол компонентов и гомогенизация составов композиционных вяжущих в работе осуществлялись с использованием лабораторной вибрационной мельницы МВ-20.

Процесс получения композиционных вяжущих заключался в следующем: портландцемент размалывался до удельной поверхности 500 и 700 м²/кг. Отсев КВП также отдельно размалывался до удельной поверхности 300,

500 и 700 м²/кг. Далее цемент смешивали с минеральной добавкой и домалывали в течение 1 мин в вибромельнице для гомогенизации.

Изучение прочностных показателей мелкозернистого бетона проводилось на образцах размером 7х7х7 см в составах 1:1,5 и 1:3, твердеющих в воздушно-влажностных условиях (ГОСТ 310.4–81).

Для изучения состава и строения полученных композитов применялись методы рентгенофазового анализа (дифрактометр ДРОН-3М) и сканирующей растровой электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения (до 1 нм) TESCAN MIRA 3 LMU, включающий энергодисперсионный спектрометр (ЭДС) X-MAX 50 OxfordInstruments Nano Analysis для электронно-зондового микроанализа).

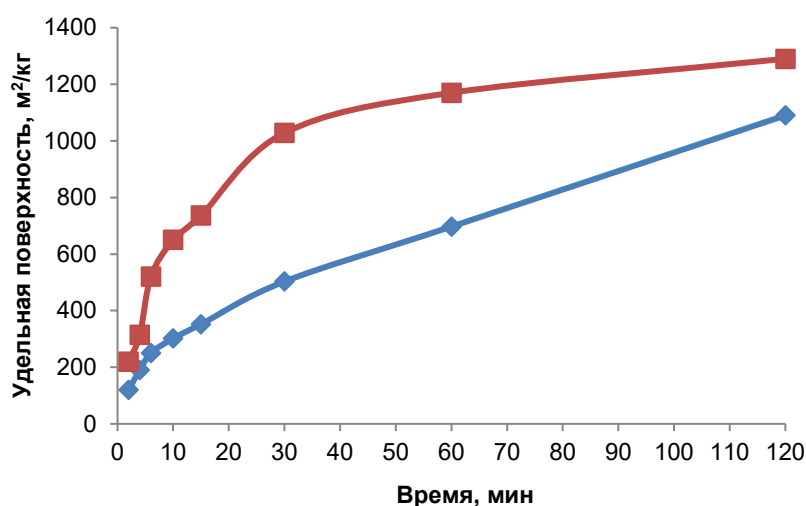


Рисунок 2 – Кинетика помола кварцитопесчаников
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Kinetics of quartzite sandstone grinding
Source: compiled by the author.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для обоснования возможности использования выветренного КВП в композиционных вяжущих в качестве минеральной добавки была изучена сравнительная кинетика помола кварцитопесчаников в лабораторной вибрационной шаровой мельнице (рисунок 2).

На основе результатов предварительных экспериментов были разработаны составы композиционных вяжущих (рисунок 3), в которых варьировалось:

- содержание минеральной добавки (20 и 50% от массы цемента);
- тонкость помола минеральной добавки (300, 500, 700 м²/кг);
- тонкость помола цемента (500, 700 м²/кг).

Процесс получения и испытания вяжущих описан в разделе «Материалы и методы». Для всех составов вяжущих были определены показатели прочности в 28-суточном возрасте, а для полученных наиболее рациональных составов – водопотребность и сроки схватывания (таблица 4).

Для дальнейших исследований были приняты композиционные вяжущие на основе вы-

ветренного КВП как наиболее эффективные. В составе вяжущего ПЦ имеет $S_{уд} = 700 \text{ м}^2/\text{кг}$, ВКВП – $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Далее в работе, с целью установления причин положительного влияния выветренности, использованного для получения минеральной добавки, кварцитопесчаника был проведён анализ микроструктуры полученного камня. Затем методом рентгенофазового анализа были изучены особенности минерального состава камня композиционных вяжущих, содержащих выветренный и неветренный кварцитопесчаники. Полнота гидратации оценивалась по наиболее сильным пикам алита (меньше – лучше). Также сравнивались интенсивности ряда пиков портландита как относительная оценка полноты гидратации и пуццолановой активности добавок.

На рисунке 4 приведены результаты использования композиционных вяжущих с минеральной добавкой из ВКВП в мелкозернистых бетонах состава Ц:П = 1:3, получавшихся на основе природного и техногенного песков.

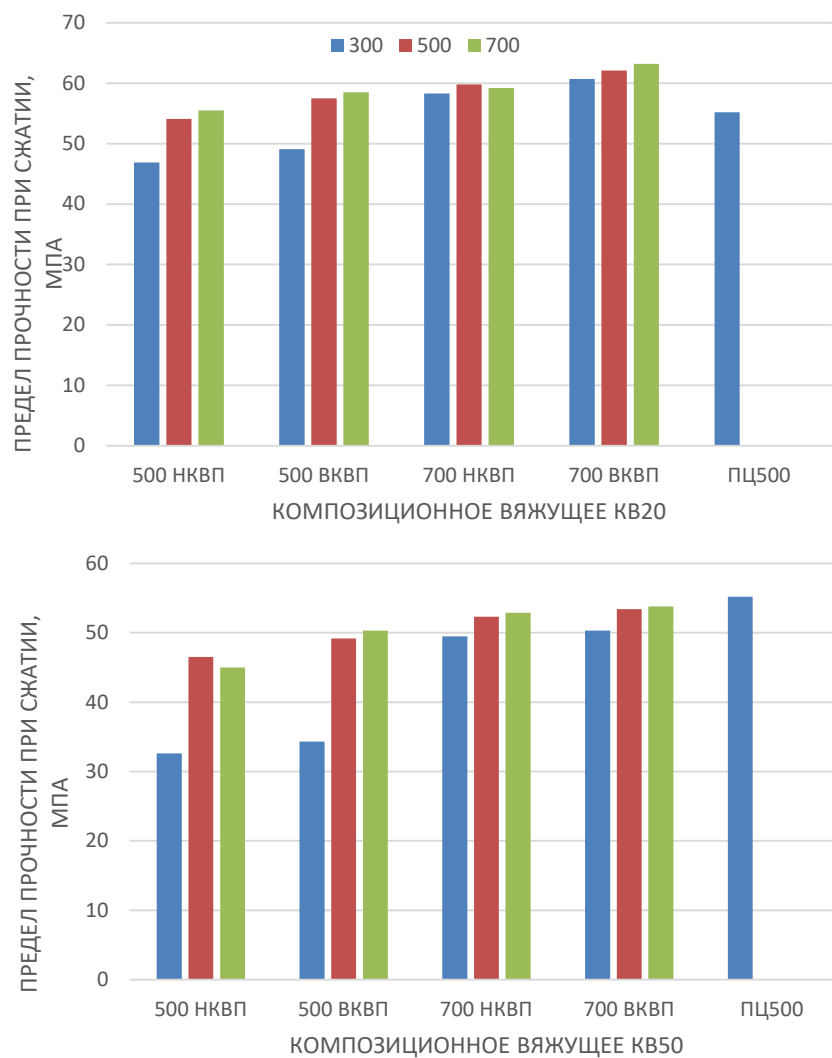


Рисунок 3 – Влияние параметров кварцевого сырья на прочность композиционного вяжущего
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Effect of quartz raw material parameters on the strength of composite binder
Source: compiled by the author.

Таблица 4
Водопотребность и сроки схватывания композиционных вяжущих
Источник: составлено автором.

Table 4
Water requirement and setting times of composite binders
Source: compiled by the author

Вяжущее	S _{уд} , м²/кг	Нормальная густота, %	Сроки схватывания, ч:мин	
			начало	конец
ЦЕМ I 42,5Н	320	26,7	1:30	4:30
КВ20в	585	29,8	1:50	2:50
КВ20н	573	28,2	1:45	2:35
КВ50в	540	34,7	2:05	3:20
КВ50н	536	33,8	1:95	3:10

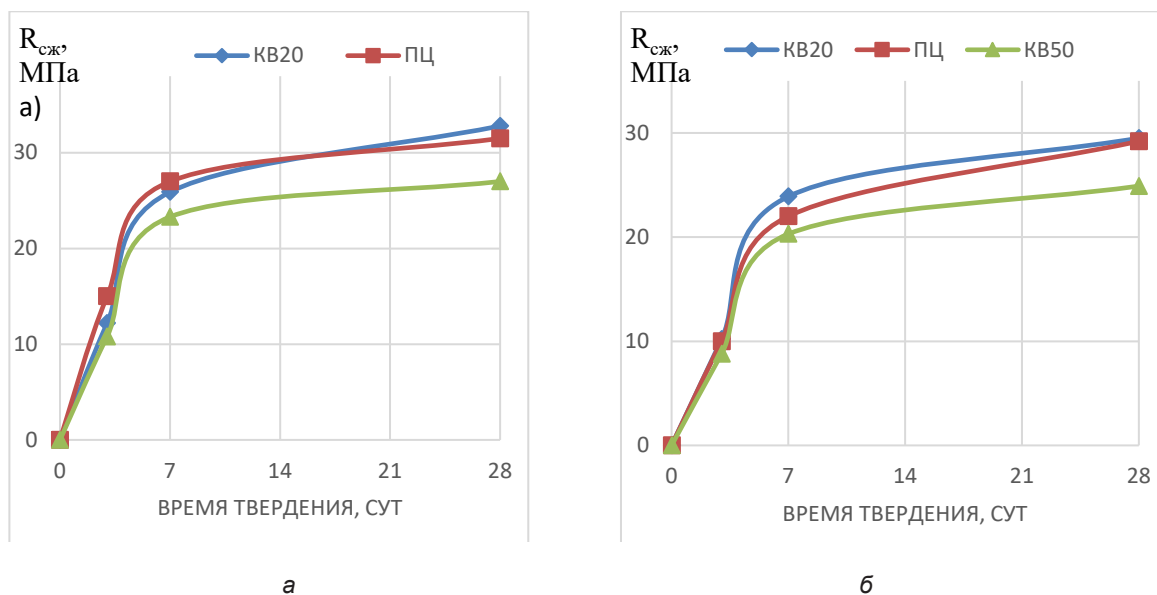


Рисунок 4 – Влияние состава композиционного вяжущего и вида мелкого заполнителя на прочность мелкозернистых бетонов (1:3): а – на фракционированном отсеве дробления КВП; б – на природном песке
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Effect of composition of composite binder and type of fine aggregate on the strength of fine-grained concrete (1:3): а – on fractionated screenings of crushed quartzite sandstone; б – on natural sand
Source: compiled by the author.

На рисунке 5 показана микроструктура контактной зоны камня на основе композиционного вяжущего и двух типов заполнителей (природного и техногенного). Отчётливо видна более шероховатая поверхность зёрен отсева дробления КВП.

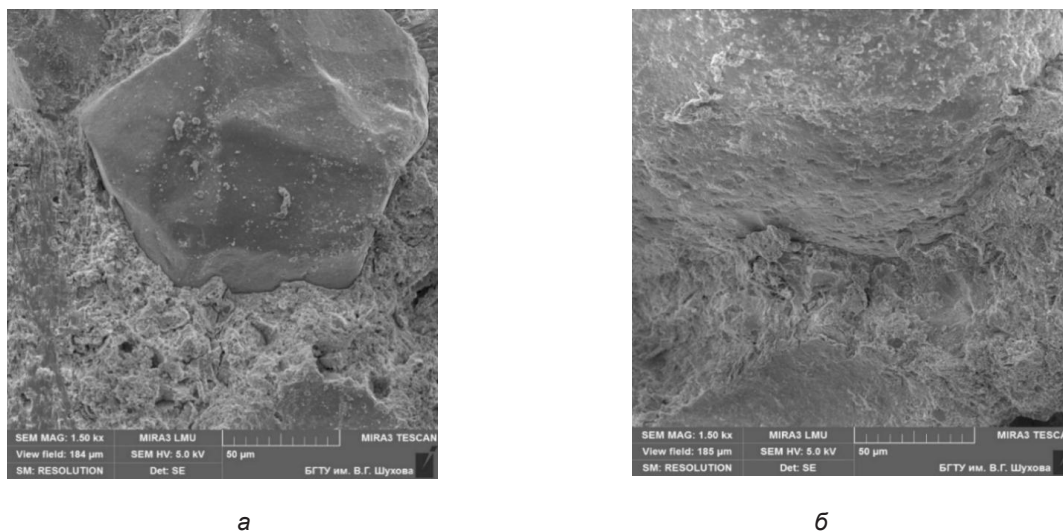


Рисунок 5 – Микроструктура контактной зоны камня на основе КВП и: а – природного кварцевого песка; б – техногенного мелкого заполнителя на основе отсева КВП
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Microstructure of the contact zone of stone based on quartzite sandstone and: а – natural quartz sand; б – man-made fine aggregate based on quartzite sandstone screenings
Source: compiled by the author.

Таблица 5

Составы и физико-механические свойства мелкозернистых бетонов для строительной печати

Источник: составлено автором.

Table 5

Compositions and physical and mechanical properties of fine-grained concrete for construction printing

Source: compiled by the author.

Состав	Пластификатор, масс. % от вяжущего	Воздухововлекающая добавка, масс. % от вяжущего	Вяз : П	Расход материалов кг/м³			В/Ц	Осадка конуса, мм	R _{сж} * МПа в возрасте, сут			ρ _{ср} кг/м³
				КВ20В	Песок	Вода			2	14	28	
Кварцевый песок												
1	–	–		792	1188	324	0,41	25	24,7	35,2	42,8	2254
1a	0,45	0,6	1:1,5					52	27,3	38,4	43,5	2140
2	–	–	1:3	500	1550	250	0,52	22	11,8	25,3	29,9	2250
2a	0,6	0,6						46	12,2	29,8	34,2	2165
Отсев КВП (0,315–1,25 мм)												
3	–	–	1:1,5	777	1166	350	0,45	24	26,8	37,8	43,5	2223
3a	0,45	0,6						48	27,4	40,0	44,5	2190
4	–	–	1:3	500	1500	275	0,55	24	11,4	29,7	34,8	2245
4a	0,8	0,6						49	14,5	30,6	35,5	2174

В таблице 5 приведены составы и основные характеристики мелкозернистых бетонов для 3D-печати.

На рисунке 6 приведен пример печати, разработанной составом 4а основания малой архитектурной формы «Скамья с вазоном» на производственном участке предприятия Бетоник-Арт (г. Белгород).



Рисунок 6 – Результат печати основания МАФ разработанной составом 4а

Источник: Бетоник-Арт (г. Белгород).

Figure 6 – Result of printing the base of the small architectural form with the developed composition 4a

Source: Betonik-Art (Belgorod).

ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе работы были изучены вопросы получения композиционных вяжущих с использованием в качестве минеральной добавки выветренного и обычного кварцитопесчаников.

Согласно представленного на рисунке 2 графика, динамика повышения удельной поверхности выветренного кварцитопесчаника значительно опережает аналогичный показатель у неветренного во всём рассмотренном интервале времени помола. В течение 30 мин помола удельная поверхность выветренного кварцитопесчаника составила 1000 м²/кг, а в случае НКВП за это время достигается только 500 м²/кг. При продолжении помола удельная поверхность неветренного КВП 1000 м²/кг была зафиксирована лишь через 2 ч от начала эксперимента. В целом процесс помола ВКВП идет значительно эффективней по сравнению с неветренным. Это объясняется наличием микротрещин, пор и пустот, а также наличием более дефектной аморфной фазы в породе. Данный факт является значимой предпосылкой для снижения энергоёмкости получения композиционного вяжущего.

Способ получения композиционных вяжущих раздельным помолом компонентов был

выбран, основываясь на предположении, что при совместном помоле цемента и минеральной добавки, происходит неконтролируемое увеличение удельной поверхности каждого из компонентов. Так, выветренный КВП, как установлено выше, измельчается быстрее невыветренного, в результате это приведет к существенному увеличению его дисперсности в составе смешанного вяжущего. Тогда как традиционный КВП может оказаться недополотым, при одинаковой удельной поверхности вяжущих, которая будет обеспечиваться за счет интенсификации помола цемента крупными частицами КВП, выступающими как бы дополнительными мелющими телами. При этом для каждой из добавок существует своя оптимальная дисперсность и, чтобы ее получить, их следует размалывать отдельно до оптимальной дисперсности и затем вводить в цемент.

Увеличение удельной поверхности цемента в составе композиционных вяжущих с 500 до 700 м²/кг закономерно приводит к повышению прочности камня у всех композиционных вяжущих. Однако такой эффект более значительно выражен у композиционных вяжущих с использованием минеральной добавки из выветренного КВП. Это объясняется большим содержанием аморфизированного кремнезема в составе такого кварцитопесчаника, который будет активнее реагировать с выделяющимся при гидратации клинкерных минералов гидрооксидом кальция. Данный процесс приводит к образованию дополнительного количества низкосоосновных гидросиликатов кальция, уплотняющих и упрочняющих композит.

Анализ прочностных показателей вяжущих с меньшим уровнем содержания минеральной добавки (20% КВП) показал, что при удельной поверхности цемента 500 м²/кг увеличение удельной поверхности минеральной добавки до 700 м²/кг является нецелесообразным с точки зрения роста энергоемкости процесса [17] и отсутствию дальнейшего существенно прироста прочностных показателей композиционного вяжущих. При удельной поверхности цемента 700 м²/кг наиболее высокие прочностные показатели достигаются у КВ20 с использованием наполнителя, размолотого до $S_{уд} = 700 \text{ м}^2/\text{кг}$. Так, у КВ20в (выветренный КВП) прочность на 23% выше прочности контрольного состава на основе товарного портландцемента. Для КВ20н (невыветренный КВП) это значение ощутимо меньше и составляет порядка 11%.

Повышение доли минеральной добавки в составе композиционного вяжущего до 50% даёт несколько иную картину. Прочность вяжущих на невыветренном КВП во всех случаях оказывается значительно ниже, чем у контрольного цемента. В то же время у КВ50в прочностные показатели близки к цементным при удельной поверхности наполнителя 500 м²/кг и 700 м²/кг.

Повышенное содержание тонкодисперсного наполнителя закономерно приводит к возрастанию водопотребности смеси, а также к тому, что большая его часть останется не прореагировавшей с выделяющимся гидроксидом кальция цементной системы. Это приводит к недобору возможной прочности и формированию более дефектной структуры композита. В этой связи было принято решение далее в работе применять композиционные вяжущие с 20% наполнителя как наиболее экономически и энергетически выгодные и имеющие наиболее высокие прочностные показатели.

Исследование микроструктуры образцов КВ20 на растровом электронном микроскопе показало, что адгезия цементного камня к частичкам КВП в обоих случаях высокая. Однако визуально более плотный камень формируется у образцов, содержащих выветренный КВП. Это можно объяснить более стесненными условиями прохождения реакций гидратации КВ20в за счет наличия аморфных минеральных фаз кварца и более активно протекающего процесса гидратации путем связывания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при прохождении пуццолановой реакции.

Взаимодействие выветренного КВП и цемента способствует синтезу большего числа гидратных фаз и уплотнению более слабых мест контактной зоны. Дополнительное количество гидратных кристаллических фаз на рубеже контактной зоны активизирует процесс структурообразования, заполняя пустоты в кристаллической матрице цемента, при этом у КВ20н количество таких пор выше. Кроме того, обладающие высокой дисперсностью частички КВП также являются центрами кристаллизации и выступают наполнителем на микроуровне.

Изменение количества гидратных фаз оценивали по данным рентгенофазового анализа. Полученные данные свидетельствуют о более полном связывании портландита с образованием дополнительных порций гидросиликатов кальция в основном низкосоосновного типа у вяжущего КВ20в, поскольку интенсивность дифференциальных отражений, характерных для $\text{Ca}(\text{OH})_2$, в вяжущем уменьшается для выве-

тренного КВП, при одновременном снижении остаточного содержания алита [18].

На основании вышесказанного можно утверждать, что образовавшиеся в процессах выветривания аморфные фазы кремнезема в составе минеральной добавки интенсифицируют гидратацию клинкерных минералов портландцемента за счет достаточно высокой пуццолановой активности, что приводит к связыванию портландита в низкоосновные гидросиликатные фазы. Установлено, что применение выветренного кварцитопесчаника в составе композиционных вяжущих в количестве 20% позволяет существенно снизить долю цемента и энергоемкость процесса помола с возможностью увеличения активности композиционного вяжущего в сравнении с исходным портландцементом.

На *следующем этапе* была осуществлена разработка мелкозернистых бетонных смесей.

Для оценки эффективности использования композиционных вяжущих с минеральной добавкой из ВКВП в мелкозернистых бетонах были получены и испытаны составы Ц:П = 1:3 (см. рисунок 3). В качестве контрольного вяжущего применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н. Все составы твердели в нормальных условиях. В качестве мелкого заполнителя использовался природный песок $M_{кр} = 1,76$ и техногенный (отсев дробления кварцитопесчаника фракции 0,315–1,25 мм) с $M_{кр} = 1,8$. Выбор заполнителей осуществлялся исходя из предположения, что такой модуль крупности позволит обеспечить минимальную водопотребность смеси при максимальной пластичности, необходимой в последующем для экструдирования с помощью 3D-принтера. Исключение из техногенного песка мелких фракций менее 0,315 мм способствует сокращению содержания примесей слюдистых минералов, препятствующих адгезии цементного камня к заполнителю.

Как видно из полученных данных, разработанные составы формовочных смесей достаточно быстро набирают начальную прочность, что обеспечивает возможность через 48 ч извлекать изделия из поля печати. Реотехнологические свойства разработанных составов, содержащих комбинацию пластификатора и воздухововлекающей добавки, обеспечивают равномерную подачу смеси с помощью штатного формирующего устройства строительного принтера фирмы KeyCode (Россия), установленного на производственной площадке ООО «Бетоник-АРТ» (г. Белгород). Укладка слоёв материала происходит равномерно, их

оседание не превышает принятого на производстве значения 5%, количество дефектов печати минимально, всё это хорошо видно на рисунке 5, запечатлевшем процесс опытного внедрения разработанного состава 4а на основе композиционного вяжущего, содержащего 20% выветренного кварцитопесчаника.

ВЫВОДЫ

Таким образом:

1. Как видно из графиков (см. рисунок 3), применение техногенного песка из отсева дробления КВП (0,315–1,25 мм) повышает прочность мелкозернистого бетона по сравнению с бетоном на природном кварцевом песке на 9–11% через 28 сут твердения. Это может быть объяснено более дефектной структурой поверхности частиц заполнителя и отсутствия мелкой песчаной и пылевидных фракций, что приводит к образованию прочной контактной зоны заполнителя с вяжущим (см. рисунок 4). В зависимости от вида используемого композиционного вяжущего возможно получение мелкозернистых бетонов прочностью 25–30 МПа на обычном песке и 27–35 МПа на техногенном из отсева дробления КВП.

2. Для оптимизации реологических показателей мелкозернистых смесей под требования строительной печати на основании ранее выполненных разработок и предварительных исследований была применена комбинация пластифицирующей (Линамикс ПК) и воздухововлекающей (ПолипластАэро) добавок. В таблице 3 показано сравнительное влияние указанной комбинации добавок на пластичность составов мелкозернистых бетонов для строительной печати и их основные физико-механические показатели [19].

3. Применение композиционного вяжущего на основе отсева выветренного КВП (20%) и мелкого заполнителя из отсева КВП позволяет получать прочные мелкозернистые бетоны В30–35 в нормальных условиях твердения. Повышение прочностных свойств мелкозернистых бетонов обусловлено, во-первых, формирующейся уплотненной структурой цементной матрицы мелкозернистого бетона, заполнение пор в которой происходит не только растущими новообразованиями, но и частицами тонкодисперсного наполнителя, которые при этом играют роль активных центров кристаллизации; во-вторых, повышенной адгезией формирующейся цементной матрицы к мелкому заполнителю из отсева КВП, на развитой поверхности зерен которого формируются тонкие пленки гидратных фаз, что

приводит к усилению контактной зоны между заполнителем и цементным камнем.

4. Определение формоустойчивости и формуемости бетонной смеси для 3D-печати осуществляли по методике, разработанной на кафедре СМИИК БГТУ им. В.Г. Шухова. Разработанные составы формовочных смесей достаточно быстро набирают начальную прочность, что позволяет «отпечатанным» слоям без деформаций воспринимать нагрузку вышележащих слоев с необходимым интервалом времени между циклической печатью, а также обеспечить требуемое сцепление между слоями в течение заданного времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учётом сложившихся тенденций по повышению эстетичности, удобства и комфорта искусственной среды обитания человека, сегмент рынка малых архитектурных форм в ближайшее время будет одним из самых быстрорастущих. Наименьшая конкуренция в настоящий момент имеет место в нише МАФ из архитектурного бетона. Развитие данного направления позволит ощутимо расширить гамму предлагаемой продукции, отличающейся низкой стоимостью, высокой функциональностью и долговечностью.

Для организации выпуска современных МАФ из архитектурного бетона большой интерес представляет технология строительной 3D-печати, позволяющая реализовать сложные разнообразные пространственные формы изделий с любым уровнем индивидуализации без повышения издержек. Однако требует решения вопрос разработки специализированных архитектурных бетонов оптимизированных под технологию строительной печати. Эффективность по комплексу свойств, эстетичности, долговечности, энерго- и ресурсосбережению может быть обеспечена за счёт применения наиболее прогрессивных теорий строительного материаловедения, а именно: композиционных вяжущих адаптированных под конкретную задачу, использования нетрадиционных видов сырья, положений архитектурной геоники [20].

Разработанные формовочные смеси подтвердили высокую эффективность использования композиционного вяжущего с микронаполнителем (20%) из отсева ВКВП и мелкого заполнителя из отсева КВП для аддитивного 3D-производства бетонных оснований малых архитектурных форм.

Внедрение разработанных материалов отвечает требованиям энерго- и ресурсосбере-

жения, экологичности производства, так как снижается потребление портландцемента и невозобновляемых природных ресурсов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лесовик В.С. Экологические аспекты строительного материаловедения // Промышленное и гражданское строительство. 2008. № 6. С. 20–21.
2. Дегтев Ю.В. Эволюция малых архитектурных форм в России // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 1. С. 41–44.
3. Фролова М.А. Неразрушающий контроль качества бетонных строительных композитов / М.А. Фролова, А.С. Тутыгин, А.М. Айзенштадт, Г.А. Махов, В.С. Лесовик // Строительные материалы. 2013. № 3. С. 20–22.
4. Тютин А.Д., Аралов И.А. Перспективы применения 3d-печати в строительстве и архитектуре // Евразийское научное объединение. 2021. № 2-2 (72). С. 128–130.
5. Lim S., Buswell R.A., Le T.T., Austin S.A., Gibb A.G., Thorpe T. Developments in construction-scale additive manufacturing processes // Automation in construction. 2012. Т. 21. pp. 262–268.
6. Batikha M., Jotangia R., Baaj M.Y. 3D Concrete printing for sustainable and economical construction: a comparative study // Automation in construction. 2022. pp. 104087.
7. Bedsrf P., Dillenburger B., Dutto A., Zanini M. Foam 3d printing for construction: a review of applications, materials, and processes // Automation in construction. 2021. pp. 103861.
8. Robayo-Salazar R., Mejía de Gutiérrez R., Villaquirán-Caicedo M.A., Delvasto Arjona S. 3D printing with cementitious materials: challenges and opportunities for the construction sector // Automation in construction. 2023. pp. 104693.
9. Симаклова Е.А., Селякова К.И., Кравченко Д. Применение 3D-печати в строительстве // Инженерные исследования. 2021. № 1. С. 3–11.
10. Elistratkin M., Podgornyi D., Alfimova N. Influence of Equipment Operation Parameters on the Characteristics of a Track Produced with Construction 3D Printing // Buildings. 2022. Vol. 12, No. 5. P. 593.
11. Глаголев Е.С. 3D-аддитивные строительные технологии. Теория и практика // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2021. № 2. С. 8–14.
12. Zagorodnuk L.H., Lesovik V.S., Shkarin A.V., Belikov D.A. Creating effective insulation solutions, taking into account the law of affinity structures in construction materials // World Applied Sciences Journal. 2013. Т. 24. № 11. pp. 1496–1502.
13. Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Зиганшина Л.В. Модифицированные мелкозернистые цементные бетоны для аддитивного строительного производства // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 5. С. 77–93. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-785-5-77-93.

14. Матыева А.К., Асаналиева Ж.Д. Исследование техногенных продуктов и их эффективность применения в качестве сырья для стройиндустрии // Вестник международной ассоциации экспертов по сейсмостойкому строительству. 2019. № 7. С. 29–34.

15. Шаталова С.В. Разработка комплексного решения для 3D-печати стеновых конструкций / С.В. Шаталова, Н.В. Чернышева, В.С. Лесовик [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 10. С. 8–19.

16. Лесовик В.С., Фомина Е.В., Айзенштадт А.М. Некоторые аспекты техногенного метасоматоза в строительном материаловедении // Строительные материалы. 2019. № 1-2. С. 100–106. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-100-106>

17. Иноземцев А.С., Королев Е.В., ЗыонгТхань Куй. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13, Вып. 7 (118). С. 863–876. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876

18. Аласханов А.Х. Современные подходы к разработке многокомпонентных вяжущих с использованием техногенного сырья: науч. журнал / А.Х. Аласханов, Х.Э. Таимасханов, М.С. Саидумов, Т.С. Муртазаева // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2022. Том 18, №1 (27). С. 63–70.

19. Лесовик В.С., Фролова М.А., Айзенштадт А.М. Поверхностная активность горных пород // Строительные материалы. 2013. № 11. С. 71–73.

20. Лесовик В.С., Пьеркова М.В., Бабаев В.Б. Архитектурная геоника как междисциплинарное направление в архитектурной науке и практике // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 1. С. 9–12.

REFERENCES

1. Lesovik V.S. Ecological aspects of building materials science. *Industrial And Civil Engineering*. 2008; 6: 20–21. (In Russ.)

2. Degtyarev Yu.V. Evolution of small architectural forms in Russia. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2013; 1: 41–44. (In Russ.)

3. Frolova M.A., Tutygin A.S., Aizenshtadt A.M., Makhov G.A., Lesovik V.S. Non-destructive testing of the quality of concrete building composites. *Stroitel'nye Materialy (Construction Materials)*. 2013; 3: 20–22. (In Russ.)

4. Tyutina A.D., Aralov I.A. Prospects for the Application of 3D Printing in Construction and Architecture. *Scientific Association*. 2021; 2-2 (72): 128–130. (In Russ.)

5. Lim S., Buswell R.A., Le T.T., Austin S.A., Gibb A.G., Thorpe T. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in construction*. 2012; T. 21: 262–268.

6. Batikha M., Jotangia R., Baaj M.Y. 3D Concrete printing for sustainable and economical construction: a comparative study. *Automation in construction*. 2022:104087.

7. Bedsrf P., Dillenburger B., Dutto A., Zanini M. Foam 3d printing for construction: a review of applications, materials, and processes. *Automation in construction*. 2021: 103861.

8. Robayo-Salazar R., Mejía de Gutiérrez R., Villaquirán-Caicedo M.A., Delvasto Arjona S. 3D printing with cementitious materials: challenges and opportunities for the construction sector. *Automation in construction*. 2023: 104693.

9. Simakova E.A., Selyakova K.I., Kravchenko D. 3D printing in construction. *Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]*. 2021; 1(1): 3–11. (In Russ.)

10. Elistratkin M., Podgornyi D., Alfimova N. Influence of Equipment Operation Parameters on the Characteristics of a Track Produced with Construction 3D Printing. *Buildings*. 2022; Vol. 12, No. 5: 593.

11. Glagolev E.S. 3D additive construction technologies. theory and practice. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2021; 2: 8–14. (In Russ.)

12. Zagorodnuk L.H., Lesovik V.S., Shkarin A.V., Belikov D.A. Creating effective insulation solutions, taking into account the law of affinity structures in construction materials. *World Applied Sciences Journal*. 2013; T. 24. №. 11: 1496-1502.

13. Mukhametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R., Ziganshina L.V. Modified cement fine-grained concrete for 3DCP. News of Higher Educational Institutions. *Construction*. 2024; (5): 77–93. (In Russ.) DOI: 10.32683/0536-1052-2024-785-5-77-93.

14. Matyeva, A.K., Asanaliyeva D. Study of technogenic products and their efficiency of use as raw materials for the construction industry. *Bulletin of the international association of experts in earthquake engineering*. 2019; 7: 29–34. (In Russ.)

15. Shatalova S.V., Chernysheva N.V., Lesovik V.S., Elistratkin M.Y., Sheremet A.A. Development of a comprehensive solution for 3d printing of wall structures. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022; 10: 8–19. (In Russ.)

16. Lesovik V.S., Fomina E.V., Ayzenshtadt A.M. Some aspects of technogenic metasomatism in construction material science. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2019; 1–2: 100–106. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-100-106> (In Russ.)

17. Inozemtcev A.S., Korolev E.V., Duong Thanh Qui. Analysis of existing technological solutions of 3D-printing in construction. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*. 2018; vol. 13, issue 7 (118): 863–876. (In Russ.) DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876

18. Alaskhanov A.Kh., Taimaskhanov Kh.E., Saidumov M.S., Murtazaeva T.S. Modern approaches to the development of multicomponent binders using technogenic raw materials: scientific. *Herald of GSTOU. Technical Sciences (hereinafter referred to as the Journal)*. 2022; T. 18, No. 1 (27): 63–70. (In Russ.)

19. Lesovik V.S., Frolova M.A., Aizenshtadt A.M. Surface activity of rocks. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2013; 11: 71–73. (In Russ.)

20. Lesovik V.S., Perkova M.V., Babaev V.B. Architectural Geonics as an interdisciplinary direction in architectural science and practice. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2013; 1: 9–12. (In Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Столетова И.А. (Черепанова И.А.) Формулирование основной концепции исследования, подготовка текста статьи, проведение экспериментов.

Володченко А.А. Проведение критического анализа материалов и формирование выводов, оформление результатов исследования в графиках.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Stoletova I.A. (Cherepanova I.A.) Formulation of the main concept of the study, preparation of the article text, conducting experiments.

Volodchenko A.A. Conducting a critical analysis of materials and drawing conclusions, presenting the results of the study in graphs.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Столетова Ирина Александровна (Черепанова) – ассистент кафедры «Архитектура и градостроительство» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8946-451X>,

SPIN-код: 7387-5219,

e-mail: irinadiusa@gmail.com

Володченко Александр Анатольевич – канд. технич. наук, доцент кафедры «Строительные материалы и конструкции» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8919-7185>,

Researcher ID: A-8344-2014,

SPIN-code: 8837-7100,

Scopus ID: 56450953600

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Stoletova Irina A. (Cherepanova) – Assistant of the Department of Architecture and Urban Planning, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia (308012, Belgorod, Kostyukova str. 46). V.G. Shukhov Russia (308012, Belgorod, Kostyukova str., 46).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8946-451X>,

SPIN-code: 7387-5219,

e-mail: irinadiusa@gmail.com

Volochenko Aleksandr A. – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Construction Materials and Structures of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (308012, Belgorod, Kostyukova St., 46).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8919-7185>,

Researcher ID: A-8344-2014,

SPIN-code: 8837-7100,

Scopus ID: 56450953600

ИСПРАВЛЕНИЕ / ERRATUM



Check for updates

Научная статья

УДК 625.81

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-1017-1018>

EDN: XCRHGS

ИСПРАВЛЕНИЕ К СТАТЬЕ:

**ЗАВИСИМОСТЬ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ГРУНТОВ,
УКРЕПЛЕННЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИМИ ВЯЖУЩИМИ,
ОТ ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ**

Н.А. Слободчикова, С.В. Ключев, К.В. Плюта

Вестник СибАДИ. 2024; 21 (5): 786-800.

На странице 786 вместо

Н.А. Слободчикова¹, С.В. Ключев², К.В. Плюта³ ✉¹ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»,
г. Иркутск, Россия 2²ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова»,
г. Белгород, Россия 3³ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»,
г. Иркутск, Россия✉ ответственный автор
kv_plyuta@mail.ru

следует читать:

Н.А. Слободчикова¹, С.В. Ключев^{2,3}, К.В. Плюта⁴ ✉¹ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»,
г. Иркутск, Россия²ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова»,
г. Белгород, Россия³ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов»,
г. Москва, Россия⁴ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»,
г. Иркутск, Россия✉ ответственный автор
kv_plyuta@mail.ru

На странице 800 вместо

Ключев Сергей Васильевич – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1995-6139>, SPIN-code: 5944-3648, e-mail: klyuyev@yandex.ru

следует читать:

Ключев Сергей Васильевич – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46); ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов» (117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1995-6139>, SPIN-code: 5944-3648, e-mail: klyuyev@yandex.ruОригинальная статья может быть найдена по DOI <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-786-800>

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-1017-1018>
EDN: XCRHGS

ERRATUM TO:

DEPENDENCE OF THE SOILS' ELASTIC MODULUS REINFORCED WITH INORGANIC BINDERS ON COMPRESSIVE STRENGTH

Nadezhda A. Slobodchikova, Sergey V. Klyuev, Kseniya V. Plyuta
The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2024; 21 (5): 786-800.
Page 786, in instead of

Nadezhda A. Slobodchikova¹, Sergey V. Klyuev², Kseniya V. Plyuta³ ✉

¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

²Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

³Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

✉ corresponding author

kv_plyuta@mail.ru

should read

Nadezhda A. Slobodchikova¹, Sergey V. Klyuev^{2,3}, Kseniya V. Plyuta⁴ ✉

¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

²Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

³RUDN University, Moscow, Russia

⁴Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

✉ corresponding author

kv_plyuta@mail.ru

Page 800, in instead of

Klyuyev Sergey V. – Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova str., Belgorod), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1995-6139>, SPIN-code: 5944-3648, e-mail: klyuyev@yandex.ru

should read

Klyuyev Sergey V. – Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova str., Belgorod); RUDN University (6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1995-6139>, SPIN-code: 5944-3648, e-mail: klyuyev@yandex.ru

The original article can be found under <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-786-800>

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются рукописи по направлениям: Транспорт. Транспортные и технологические машины; Строительство. Строительные материалы и изделия; Редакция принимает к рассмотрению **оригинальные научные статьи** объемом 8–10 стр. машинописного текста через 1 интервал, 5–8 рисунков и (или) таблиц, 20–40 ссылок; **обзорные статьи** – (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – от 10 и более страниц, от 5 и более рисунков, до 80 ссылок.

Статья должна быть неопубликованной ранее в других изданиях, написана в контексте современной литературы, обладать новизной и соответствовать профилю журнала. Автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирования и ссылок на официальные документы и другие источники. Редакция принимает на себя обязательство ограничить круг лиц, имеющих доступ к присланной в редакцию рукописи, сотрудниками редакции, членами редколлегии, а также рецензентами данной работы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий статья будет **ретрагирована** (отозвана из печати).

Следует уделить особенное внимание качеству перевода. Недопустимо при переводе пользоваться машинами-переводчиками. Перевод должен быть выполнен профессиональными переводчиками, а лучше – носителем английского языка. Необходимо учесть, что законодательство охраняет права переводчиков авторским правом наравне с правами авторов оригинальных произведений. Перевод текста – творческий процесс, производный объект авторского права, т.е. переводчик – соавтор нового произведения.

1 УДК. На первой странице, слева в верхнем углу без отступа, указываются индекс по универсальной десятичной классификации (УДК) (размер шрифта 10 пт).

2. Заглавие статьи. Заголовок (максимально 10-12 слов) должен быть информативным, лаконичным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы. Приводится на русском и английском языках, по центру полужирным шрифтом размером 12 пт. прописными буквами.

3. Фамилии авторов. Количество авторов не должно превышать четырех. Для англоязычных метаданных важно соблюдать вариант написания сведений об авторе в последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия (Anna V. Ivanova). При латинизации фамилии можно воспользоваться системой 1 BSI – Британский Институт Стандартов (British Standards Institution) транслитерации на сайте <https://translit.ru>, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи обычным шрифтом (размер шрифта 12 пт.).

4. Аннотация. Аннотация включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе научная статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению, объем от 200 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Приводится на русском и английском языках. Начинается словом «Аннотация» с прописной буквы (шрифт полужирный, курсив, 10 пт); точка; затем с прописной буквы текст (курсив, 10 пт).

5. Ключевые слова служат ориентиром для читателя и используются для поиска статей в электронных базах, поэтому должны отражать дисциплину (область науки, в рамках которой написана статья), тему, цель и объект исследования. Рекомендуемое количество ключевых слов – 10–12, количество слов внутри ключевой фразы – не более трех. Размещаются после аннотации, на русском и английском языках.

6. Благодарности. Раздел включен в требования всеми крупными издательствами. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

7. Основные положения. Отражают ключевые результаты исследования, основное содержание статьи, изложенные тезисно и оформленные в виде 3–5 пунктов маркированного списка.

8. Основной текст статьи излагается на русском или английском языках, в электронном и бумажном виде (шрифт «Arial» (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный), в следующей последовательности:

Введение (1–4 стр.) В этом разделе описываются общая тема исследования, цели и задачи планируемой работы, теоретическая и практическая значимость, приводятся наиболее известные и авторитетные публикации по изучаемой теме, обозначаются нерешенные проблемы. Данный раздел должен содержать обоснование необходимости и актуальности исследования. Информация во Введении должна быть организована по принципу «от общего к частному».

Подразделы введения представлены на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Методы и материалы (от 2 стр. и более) В этом разделе в деталях описываются методы, которые использовались для получения результатов. Обычно сначала дается общая схема экспериментов/исследования, затем они представляются настолько подробно и с таким количеством деталей, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, организационных или структурных диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. Если было получено много похожих зависимостей, представляемых в виде графиков, то приведите только один типичный график, а данные об имеющихся количественных отличиях между ними, представьте в таблице.

Способы представления результатов представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Обсуждение и заключение. Раздел содержит интерпретацию полученных результатов исследования, предположения о полученных фактах, сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

9. Список источников (References)

В список источников включаются только те источники, которые автор использовал при подготовке статьи. Оформление библиографического списка регламентируется ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 20–40 источников, но не более 50. Из них за последние 3 года – рекомендуется указать не менее 20, иностранных – не менее 15. Важно правильно оформить ссылку на источник.

Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет.

Источники указываются в конце статьи в алфавитном порядке либо в порядке упоминания в тексте статьи.

Приводится на русском языке и в латинице по образцу, представленному на сайте журнала.

Аффилиация. Фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, ORCID i, Scopus Author ID, ResearcherID, далее указать все места работы, должность, название организации, служебный адрес, электронная почта, телефон, e-mail.

Приводится на русском и английском языках.

Технические требования к оформлению.

Формат A4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом употреблении должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подрисункной 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 – подрисункные подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы предоставляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

Общий порядок опубликования

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятыми редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

- с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;
- согласие на обработку персональных данных в научном периодическом издании;

При регистрации присваивается дата поступления и регистрационный номер статьи. Статьи регистрируются через электронную редакцию. Регистрация осуществляется бесплатно.

Первичная экспертиза на соответствие требованиям и профилю журнала (модерация). Зарегистрированные рукописи статей проходят первичную экспертизу на соответствие требованиям и профилю журнала. Началом для экспертизы рукописи статьи редакцией является дата регистрации статьи. Редакция журнала оставляет за собой право отбора присылаемых материалов. Только прошедшие первичную экспертизу рукописи статей, полностью соответствующие требованиям редакции журнала, соответствующие профилю журнала, получают статус «Принята к рассмотрению». Для них отдельно регистрируется дата приема рукописи статьи к рассмотрению.

Рецензирование. Принятые к рассмотрению рукописи статей направляются на слепое рецензирование для оценки их научного содержания нескольким специалистам соответствующего профиля, членам редакционной коллегии и/или редакционного совета. Экспертиза и рецензирование осуществляются бесплатно.

Решение о принятии к публикации основывается на поступивших рекомендациях рецензентов журнала. Если принято решение «рекомендовать с учетом исправления отмеченных недостатков», то автору направляются рекомендации и вопросы для исправления. Рукопись статьи, скорректированная автором, повторно направляется на рецензирование. Рукописи статей, не рекомендованные к публикации, повторно не рассматриваются. Автору рукописи направляется мотивированный отказ в публикации.

Редакционная подготовка. Рукописи статей, принятые к публикации, проходят редакционную подготовку к публикации – литературное редактирование и сверку данных, корректуру, форматирование, макетирование. Общий срок редакционной подготовки статьи, успешно прошедшей рецензирование, составляет 2 месяца в соответствии с периодичностью и графиком публикации выпусков. Корректуре статей авторам не высылается, тем не менее вопросы, возникающие в процессе редактирования высылаются авторам для согласования.

Окончательный вариант макета статьи высылается по электронной почте автору на утверждение. На рассмотрение отводится три дня, по истечении которых в случае неполучения ответа от автора, макет автоматически считается автором одобренным и в представленном виде направляется в печать.

Публикация. Подготовленный к публикации макет тиражируется в типографии СибАДИ и размещается на сайте журнала в открытом бесплатном доступе. Публикация всех статей одного выпуска осуществляется единой датой.

Метаданные опубликованных статей выпуска регистрируются в РИНЦ, размещаются в библиографических сервисах и базах данных в сроки, установленные соответствующими договорами, распространяются по подписке.