

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



научный рецензируемый журнал

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

СИБАДИ •

“Vestnik SibADI”

Том 21, № 5. 2024
Vol.21, No. 5. 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: 10.26518/2071-7296-2024-21-5

TOM 21, № 5. 2024

VOL. 21, No. 5. 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 17.10.2024. Дата выхода в свет 31.10.2024. Формат 60×84 ¼ Гарнитура Arial. Печать оперативная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 27,25 Тираж 500 экз. Заказ 500 экз. Свободная цена. Отпечатано в типографии Издательско-полиграфического комплекса ФГБОУ ВО «СибАДИ», Россия, г. Омск, проспект Мира, д. 5.

Контент доступен под лицензией CC BY.

Поступившие в редакцию материалы не возвращаются.

Гонорары не выплачиваются.

Все статьи публикуются бесплатно.

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 17.10.2024. Publication date is 31.10.2024. 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 Жигadlo 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 Author ID 57170706600, **Researcher ID** H-7490-2017,
ORCID ID 0000-0003-2763-0515

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

Транспорт

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

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

Строительство и архитектура

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Савельев Сергей Валерьевич, д-р техн. наук, доц., проф. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 57159787800, **Researcher ID** A-4081-2019, **ORCID** 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 Author 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. Saveliev, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Russia
Scopus Author ID 57159787800, **ORCID ID** 0000-0002-4034-2457, **Researcher ID** A-4081-2019

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

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

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

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

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

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

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

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, Bialystok, Poland
Scopus Author ID 9843546900, **Researcher ID** N-3447-2017, **ORCID ID** 0000-0001-7052-9602

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

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

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

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

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

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

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

РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

В.О. Барсуков

**ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМА РАЗРЯДА ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ
ДЛЯ ШПУРОВОГО РАЗРУШЕНИЯ МОНОЛИТНЫХ ОБЪЕКТОВ 652**

В.Н. Дятлов, Д.П. Кононов

**РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ ПЕРИОДОВ ПРОВЕДЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ
ОБСЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭСКАЛАТОРОВ
МЕТРОПОЛИТЕНА 662**

Е.Р. Магдина

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ
НА ДВИЖЕНИЕ ЭКСКАВАТОРА-ПОГРУЗЧИКА ЧЕРЕЗ
ВОДНУЮ ПРЕГРАДУ ВБРОД 672**

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

А.В. Климов

**ИСПЫТАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА ПОДАВЛЕНИЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ
ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ТОРМОЖЕНИИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА 692**

Е.В. Печатнова, И.А. Новиков, И.И. Кирюшин, Н.Н. Нагорный

**ФАКТОРЫ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЙ АВАРИЙНОСТИ
В ПРИГОРОДНОЙ ЗОНЕ 714**

И.Н. Пугачев, Н.Г. Шешера, Д.Е. Григорьев

**ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРОТ ИНТЕРВАЛОВ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГНОЗА ИНТЕНСИВНОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА 726**

А.И. Федотов, О.С. Яньков, Д.О. Ухватов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ПОДКЛЮЧАЕМОГО ПОЛНОГО ПРИВОДА КОЛЁСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ
НА СТЕНДАХ С БЕГОВЫМИ БАРАБАНАМИ 736**

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

А.С. Александров, Т.В. Семенова

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КРИТЕРИЯ МОРА – КУЛОНА ДЛЯ РАСЧЕТА
ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД ДОРОГ С НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ДВИЖЕНИЯ 756**

М.А. Высоцкая, В.С. Лесовик, Я.М. Катрич, Д.Ю. Егоров

**ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ПОРОШКОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ БИТУМНОГО
ВЯЖУЩЕГО К ТЕРМИЧЕСКИМ ДЕФОРМАЦИЯМ 770**

Н.А. Слободчикова, С.В. Клюев, К.В. Плюта

**ЗАВИСИМОСТЬ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ГРУНТОВ,
УКРЕПЛЕННЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИМИ ВЯЖУЩИМИ, ОТ ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ ... 786**

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Vyachslav O. Barsukov

SUBSTANTIATION OF THE DISCHARGE MODE OF ELECTROHYDRAULIC EQUIPMENT FOR DRILLING DESTRUCTION OF MONOLITHIC OBJECTS 653

Vyacheslav N. Dyatlov, Dmitry P. Kononov

RATIONALIZATION OF DIAGNOSTIC EXAMINATION PERIODS FOR METALWORK ELEMENTS OF SUBWAY ESCALATORS 663

Yelizaveta R. Magdina

ASSESSMENT OF HYDRODYNAMIC PRESSURE EFFECT ON BACKHOE-LOADER MOVEMENT TO WADE THROUGH THE WATER OBSTACLE 673

PART II. TRANSPORT

Alexander V. Klimov

TESTING THE EFFECTIVENESS OF AN ALGORITHM FOR SUPPRESSING SELF-EXCITED VIBRATIONS DURING INTENSIVE BRAKING OF A VEHICLE 693

Elena V. Pechatnova, Ivan A. Novikov, Ivan I. Kiryushin, Nikolay N. Nagorny

FACTORS CONTRIBUTING TO ROAD TRAFFIC ACCIDENTS IN SUBURBAN AREAS 715

Igor N. Pugachev, Nikolay G. Sheshera, Denis Ye. Grigorov

STUDY OF THE INTERVAL WIDTH OF FEATURES FOR IMPROVING FORECASTING EFFICIENCY OF THE TRANSPORT FLOW INTENSITY 727

Alexander I. Fedotov, Oleg S. Yankov, Dmitrii O. Ukhvatov

INVESTIGATION OF CONTROL SYSTEM OPERATION IN PLUG-IN FOUR-WHEEL DRIVE OF WHEELED VEHICLES ON ROLLER TEST BENCHES 737

PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Anatoly S. Aleksandrov, Tatiana V. Semenova

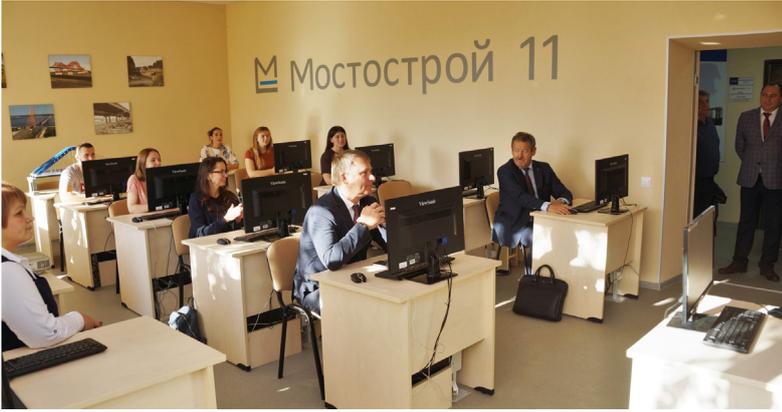
IMPROVEMENT OF MOHR-COULOMB CRITERION FOR DESIGNING PAVEMENTS OF ROADS OF LOW TRAFFIC INTENSITY 757

Marina Al. Vysotskaya, Valeriy S. Lesovik, Yaroslav M. Katrich, Dmitriy Y. Egorov

THE INFLUENCE OF MINERAL POWDERS ON THE RESISTANCE OF BITUMEN BINDER TO THERMAL DEFORMATIONS 771

Nadezhda A. Slobodchikova, Sergey V. Klyuev, Kseniya V. Plyuta

DEPENDENCE OF THE SOILS' ELASTIC MODULUS REINFORCED WITH INORGANIC BINDERS ON COMPRESSIVE STRENGTH 787



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



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

Научная статья
УДК 620.1-1/-9
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-652-661>
EDN: PYUWOO



ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМА РАЗРЯДА ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ШПУРОВОГО РАЗРУШЕНИЯ МОНОЛИТНЫХ ОБЪЕКТОВ

В.О. Барсуков

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
(СПбГАСУ),
г. Санкт-Петербург, Россия
barsukovvyach@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье поднимаются проблемы, связанные с электрогидравлическим шпуровым разрушением негабаритных монолитных объектов, которые встречаются, в частности, на территории проведения строительных работ. На данный момент оценка эффективности внедрения технологии отсутствует, из чего следует: необходим метод обоснования оптимального режима разряда и его воспроизводимости на промышленных установках.

Цель статьи: обоснование оптимальных энергетических параметров для разрушения монолитных объектов шпуровым электрогидравлическим способом.

Материалы и методы. Произведен анализ факторов шпурового электрогидравлического разрушения монолитных объектов – выявлены наиболее значимые факторы. Предлагается характеризовать режим разряда набором параметров, отвечающих за переходные процессы в моменты разрушения проводника, длительностью разряда и количеством вводимой энергии, вычисление которых представлены на страницах публикации.

Результаты и обсуждение. На основании выявленных действующих факторов разработан стенд для регистрации явления электрогидравлического эффекта. Выведены параметры обеспечения воспроизводимости режима разряда в зависимости от изменения величины индуктивности разрядного контура. Предложено формирование области применения на основании анализа данных.

Заключение. Результаты исследования позволяют простое планирование эксперимента для оценки эффективности внедрения технологии. Статья заинтересует научные кадры в области электрогидравлических и электроимпульсных технологий, сотрудников организаций, задействованных в расчистке территорий от монолитных объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электрогидравлический эффект, электротермическое разрушение проводника, разрушение негабаритов, режим разряда, воспроизводимость режима разряда

Статья поступила в редакцию 30.07.2024; одобрена после рецензирования 13.09.2024; принята к публикации 17.10.2024.

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: Барсуков В.О. Обоснование режима разряда электрогидравлической установки для шпурового разрушения монолитных объектов // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 5. С. 652-661. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-652-661>

© Барсуков В.О., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-652-661>

EDN: PYUWOO

SUBSTANTIATION OF THE DISCHARGE MODE OF ELECTROHYDRAULIC EQUIPMENT FOR DRILLING DESTRUCTION OF MONOLITHIC OBJECTS

Vyachslav O. Barsukov

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU),

Saint-Petersburg, Russia

barsukovvyach@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The article raises the problems associated with electrohydraulic drilling destruction of oversized monolithic objects, which are found, in particular, on the territory of construction works. At the moment, there is no assessment of the technology effectiveness, which means that methods are needed to justify the optimal discharge mode and its reproducibility in industrial equipment.

The purpose of the article is substantiation of optimal energy parameters for destructing monolithic objects by using electrohydraulic drilling method.

Materials and methods. The analysis of factors contributing to electrohydraulic fracture of monolithic objects was carried out and the most significant ones were identified. It is proposed to characterize the discharge mode with a set of parameters related to the transitional processes at the moments of conductor destruction, the discharge duration and the amount of energy input. Calculation of the parameters has been presented in this paper.

Results and discussions. Based on the identified active factors, a stand for registration the electrohydraulic effect has been developed. Parameters for ensuring reproducibility of the discharge mode are derived depending on the change in the discharge circuit inductance. Practical implications are proposed based on data analysis.

Conclusion. The research findings advance a simple experiment planning to evaluate technology effectiveness. The article will be of interest to researchers in the field of electrohydraulic and electropulse technologies, and practitioners involved in clearing territories and removing monolithic objects.

KEYWORDS: electrohydraulic effect, electrothermal destruction of a conductor; destruction of oversized objects, discharge mode; reproducibility of discharge mode

The article was submitted 30.07.2024; approved after reviewing 13.09.2024; accepted for publication 17.10.2024.

The author have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Barsukov O.V. Substantiaiton of the discharge mode of electrohydraulic equipment for drilling destruction of monolithic objects. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (5): 652-661. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-652-661>

© Barsukov O.V., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

В процессе возведения дорог, зданий и сооружений проводится очистка территорий от каменных валунов и прочих монолитных объектов, удаление которых без разрушения осложняют работу на строительной площадке¹ [1, 2]. Широко используются буровзрывной и механизированный методы. Тем не менее сопутствующие взрыву негативные аспекты, такие как образование пыли, разлёт осколков и выброс токсичных отходов, ограничивают применение взрывчатых веществ. Преимущества эксплуатации электрогидравлического оборудования при шпуровом разрушении монолитных объектов перед традиционными методами подробно отражены в источниках^{2,3,4,5} [1, 2, 3]. Вдобавок размещение предлагаемого оборудования возможно не только на стационарных платформах, но и на передвижных. Рассмотрение вопроса отражено в трудах⁶.

Решение о введении новых технологий принимается если не на основании возможности работы с задачами, невыполнимыми другими способами, то на основании более благоприятных энергетических параметров в сравнении с традиционными методами. Учитывая факт применения электрогидравлического эффекта (ЭГЭ) в зависимости от специфики выполнения задач⁷ [4, 5, 6, 7, 8], универсальный метод

технического обоснования отсутствует. Далеко не для всех технологических процессов, действующих ЭГЭ, существуют методы оценки внедрения в отрасль.

Относительно электрогидравлического шпурового разрушения монолитных объектов научных исследований ранее не проводилось. В литературе⁷ встречаются упоминания о проведении опытов по разрушению гранитных валунов. Однако обоснование режима разряда и критерии его выбора не публиковались.

Помимо оценки эффективности стоит обратить внимание на воспроизводимость оптимального режима разряда. На него непосредственно влияют характеристики разрядного контура – составной части электрогидравлического оборудования, которая изменяется от серии к серии [9, 10, 11, 12]. Поэтому актуальным вопросом остается повторение оптимального режима разряда на промышленном оборудовании, обеспечивая повышение уровня взаимозаменяемости техники.

Цель научно-исследовательской работы: разработка метода обоснования оптимальных энергетических параметров для разрушения монолитных объектов шпуровым электрогидравлическим способом.

Задачи:

- определение направленных на разрушение монолитных объектов значимых факторов;

¹ Барсуков В.О., Репин С.В. Обеспечение безопасной эксплуатации передвижной электрогидравлической установки для дробления монолитных объектов // Современное состояние безопасности на транспорте и перспективы ее совершенствования: материалы Межвузовской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, Петергоф, 20 апреля 2022 года. Санкт-Петербург, Петергоф: Военный институт (инженерно-технический) – структурное подразделение Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева» министерства обороны Российской Федерации, 2022. С. 13–20.

² Там же. С. 13–20.

³ Барсуков В.О., Букиров Р.Р., Васильева П.В. Инновационные методы проведения работ по демонтажу зданий и сооружений с применением электрогидравлического оборудования // Актуальные проблемы современного строительства: материалы LXXIV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 5–9 апреля 2021 года. Том Часть 2. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. С. 28–34.

⁴ Барсуков В.О. Применение электрогидравлического эффекта для работ в условиях карьера // Проблемы функционирования систем транспорта: материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Тюмень, 2 – 4 декабря 2020 года. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2020. С. 209–213.

⁵ Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Ленинград: Машиностроение, 1986. С. 254.

⁶ Барсуков В.О., Репин С.В. Указ. соч. С. 13–20.

⁷ Жданов Д.А. Экспериментальное исследование электрогидроимпульсной формовки листового металла в открытую матрицу / Д.А. Жданов, Т.С. Мурзагалиев, Д.Г. Черников // XVII Королёвские чтения: Материалы Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием, посвящённой 35-летию со дня первого полёта МТКС «Энергия-Буря». В 2-х томах, Самара, 03–05 октября 2023 года. Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2023. С. 61–62. EDN DSLRYM.

- формулирование способов их регулирования;
- обеспечение воспроизводимости режима на промышленном оборудовании.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Разрушение высокопрочных монолитных объектов посредством инициации разряда через проволоку в шпуре – специальная задача, решение которой требует учета множества одновременно протекающих процессов. Вариант аналитической оценки эффективности применения названного электрогидравлического устройства отсутствует. Единственный способ достоверного получения данных – проведение серии опытов для конкретного типа разрушаемого объекта. Автором рассмотрены явления, возникающие при разряде, и аргументирован выбор главных параметров при составлении плана эксперимента.

Ниже представлен механизм разрушения монолитного объекта (рисунок 1). В объекте пробуривается шпур, в который помещается электрод и вода. Разряду в шпуре предшествует накопление энергии на блоке конденсаторов, входящих в состав импульсного

источника тока. При достижении критического значения напряжения на клеммах блока конденсаторов происходит пробой в разрядном промежутке между электродами. Из-за резкого увеличения сопротивления ток падает до нуля, не успев достигнуть хоть сколько-нибудь значительной величины (паузы тока), а все напряжение, практически равное напряжению заряда конденсаторной батареи, прикладывается к разрядному промежутку. Через образовавшийся ионный тоннель происходит разряд, в результате которого возникает ударная волна [3]. При соединении контактов рабочего промежутка тонкой проволокой происходит увеличение мощности разряда [13, 14, 15].

Рассмотрев технологию проведения работ⁸ [1, 2], следует принять во внимание ограничения, налагаемые на параметры разрядного контура при проведении эксперимента: диаметр проводника не может быть меньше 0,02 мм; вариация длины проводника, как и вариация индуктивности контура, не учитывается, оптимальный диаметр шпура – 30 мм. Отступление от названных пунктов влечет увеличение стоимости эксплуатации оборудования.

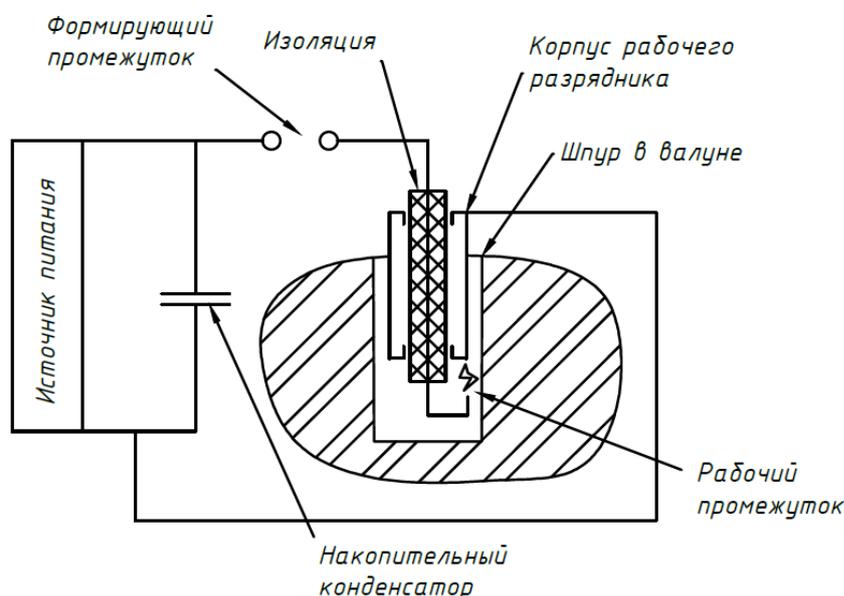


Рисунок 1 – Схема работы электрогидравлической установки [2]

Figure 1 – Operation of electrohydraulic equipment [2]

⁸ Барсуков В.О., Букиров Р.Р., Васильева П.В. Инновационные методы проведения работ по демонтажу зданий и сооружений с применением электрогидравлического оборудования // Актуальные проблемы современного строительства: материалы LXXIV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 5–9 апреля 2021 года. Том Часть 2. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. С. 28–34.

При этом качество разрушения не будет изменяться. Утверждение сформулировано при разработке лабораторной установки и его непосредственной апробации (рисунок 2).

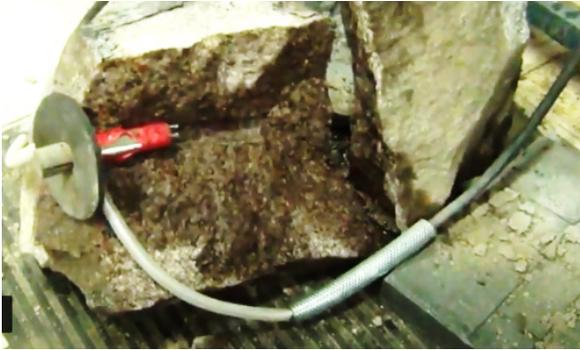


Рисунок 2 – Результат разрушения гранитного валуна шпуровой электрогидравлической установкой [1]

Figure 2 – Result of destructing a granite boulder with electrohydraulic drilling equipment [1].

На электротермическое разрушение проводника в жидкости влияют характеристики разрядного контура (напряжение на клеммах конденсатора, емкость конденсатора, индуктивность и активное сопротивление разрядного контура); геометрия проводника (длина и диаметр) [14, 15]; свойства проводника (теплопроводность и электропроводность); свойства окружающей среды (плотность, электропроводность) [16, 17]. В ходе исследований разрушающей способности электрогидравлического удара посредством инициации разряда подводным электровзрывом проводника (ПЭВП) принято решение пренебречь варьированием ряда факторов, не оказывающих значительного влияния на формирование ударной волны [1].

Метод обоснования энергетических параметров электрогидравлической установки учитывает нецелесообразность реализации конструкции генератора импульсных токов со специальными параметрами контура индуктивности. Технология изготовления надежного высоковольтного дросселя индуктивности и малая насыщенность на рынке сказывается на его цене, которая может превышать стоимость производства остальных составляющих в разы⁹ [18]. Предлагается нивелировать исключение индуктивности разрядного контура

при исследовании разрушающего действия монолитных объектов генерируемой ударной волной посредством установления режима разряда с иными техническими параметрами электрогидравлической установки. Режим характеризуется переходными процессами в разрушающемся проводнике, длительностью разряда и количеством вводимой энергии.

Критерии подобия позволяют оценить переходные процессы и выведены путем логического анализа и постановкой контрольных экспериментов на основе осциллограмм [16, 19]. Идентичные кривые могут быть получены при различных сочетаниях параметров ПЭВП. Π_1 , Π_2 и Π_3 отображают качественные преобразования энергии на начальной стадии; стадии резкого спада и стадии разряда через продукты взрыва соответственно (система уравнений 1–3) [20].

$$\left. \begin{aligned} \Pi_1 &= (R_{ц} + R_{пр})\sqrt{C/L} \\ \Pi_2 &= \frac{C^{3/7} \cdot U_0^2}{\sqrt{L} \cdot S^2 \cdot h^*} \\ \Pi_3 &= \frac{Al^2}{U_0^2 \sqrt{LC}} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $R_{ц}$ – сопротивление цепи, Ом;
 $R_{пр}$ – сопротивление проводника, Ом;
 C – емкость блока конденсаторов, Ф;
 L – индуктивность разрядного контура, Гн;
 U_0 – напряжение в момент пробоя, В;
 S – площадь сечения проводника, м²;
 A – искровая постоянная, В² с/м²;
 l – длина проводника, мм;
 h^* – константа проводника, подверженного электротермическому разрушению.

Вычисление константы, подверженной электротермическому разрушению проволоки, производится по (4) [18]:

$$h^* = \rho_{п} \cdot \sigma_{п0} (\lambda_{п} + \gamma_{п}), \quad (4)$$

где $\rho_{п}$ – плотность проводника;
 $\sigma_{п0}$ – удельная электропроводность проводника;
 $\gamma_{п}$ – удельная теплота плавления проводника;

⁹ Применение электрогидравлического эффекта в промышленности и сельском хозяйстве / В.В. Терентьев, Д.В. Барбанов, А.Н. Шевяков, С.Ф. Смирнов // Сборник научных трудов кафедры теоретической и прикладной механики: Сборник статей. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2024. С. 80–87. EDN NYUHOГ.

$\gamma_{\text{п}}$ – удельная теплота парообразования металла.

Предпочтительная среда распространения ударной волны – вода. К главным преимуществам относится легкая доступность и безвредность в эксплуатации. Данные качества привлекли к себе внимание многих исследователей, труды которых позволили применять воду в качестве рабочей жидкости для решения широкого спектра задач [9, 10, 11, 12, 19].

ПЭВП сопровождается генерацией двойных волн¹⁰ [14, 15]. Время между их появлением зависит от диаметра проводника. Существует такой диаметр проводника, называемый оптимальным (5), при котором волны, сливаясь в одну, достигают максимальной мощности. Допустимо увеличение толщины, но не уменьшение, поскольку может возникнуть обрывание цепи разряда и энергия, предназначенная для разрушения высокопрочного материала, вернется на конденсаторную батарею [16].

$$d_{\text{опт}} = \left(\frac{W_0}{zh^*} \right)^{1/4}, \text{ м}, \quad (5)$$

где W_0 – запасенная энергия на конденсаторной батарее;

z – волновое характеристическое сопротивление электрической цепи;

h^* – константа проводника, подверженного электротермическому разрушению.

Запасенная энергия на конденсаторной батарее (6):

$$W_0 = \frac{C \cdot U_0^2}{2}, \text{ В}. \quad (6)$$

Вычисление волнового характеристического сопротивления электрической цепи:

$$z = \sqrt{L/C}, \quad (7)$$

где C – емкость блока конденсаторов, Ф;

L – индуктивность разрядного контура, Гн.

Длина проводника практически не влияет на распределение энергии при особенном расположении проволоки в шпуре. Расчет длины проводника производится на основании его оптимального значения (8) [21].

$$l_{\text{опт}} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot U_0 \cdot \sqrt[4]{L \cdot C}, \text{ м}. \quad (8)$$

Проведение серии опытов для определения режима разряда электрогидравлической установки в рамках двухуровневого трехфакторного эксперимента при следующих варьируемых факторах: диаметр медной проволоки d (0,02; 0,04 мм); напряжение на обкладках конденсаторной батареи U_0 (5; 10 кВ) и емкость конденсаторов C (10, 18 мкФ). $d(5)$ определяет закономерность развития двойных волн и результирующей; U_0 – количество энергии W_0 (6), вкладываемой в разряд; C – длительность разряда $t_{\text{разр}}$ (9).

$$t_{\text{разр}} = \pi \sqrt{LC}, \text{ с}. \quad (9)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для регистрации воздействия ударной волны на окружающие объекты был разработан испытательный стенд (рисунок 3). Регистрация результатов доступно посредством фотофиксации и снятия осциллограмм. Продольно скользят шток одним концом упираются в стенки образца, а другим – в жестко закрепленные пластины. 3 штока расположены под углом 120 градусов относительно друг друга в горизонтальной плоскости и один в вертикальной. Момент разряда фиксируется камерой, поддерживающей частоту записи видео кадров в секунду, или осциллографами, снимающими данные с датчиков. Исходя из характера деформации пластин, определяется энергия, передаваемая на штоки и её интенсивность.

¹⁰ Соколов Н.С. Принципиальная схема генератора импульсных токов // Мировые научные исследования и разработки: современные достижения, риски, перспективы: материалы XIV Международной научно-практической конференции, Ставрополь, 30 октября 2023 года. Ставрополь: Общество с ограниченной ответственностью «Ставропольское издательство «Параграф», 2023. С. 242–246. EDN HSGCHA.



Рисунок 3 – Испытательный стенд
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Test stand
Source: compiled by the author.

По результатам проведения эксперимента выявляется оптимальный режим разряда, характеризуемый набором технических характеристик разрядного контура. Как указывалось ранее, индуктивность разрядного контура электрогидравлических установок может отличаться от серии к серии, что осложняет на промышленных установках воспроизводимость режима разряда, выявленного в результате проведения эксперимента. Предлагается обеспечивать требуемые значения критериев подобия, длительности разряда и количества вводимой энергии варьированием технических параметров при изменяемой индуктивности на основании формул 1–3, 6 и 9 по следующим зависимостям:

$$C_{02}(L_2) = \left(\frac{t_{\text{разр}}}{2 \cdot \pi} \right)^2 \frac{1}{L_2}, \Phi; \quad (10)$$

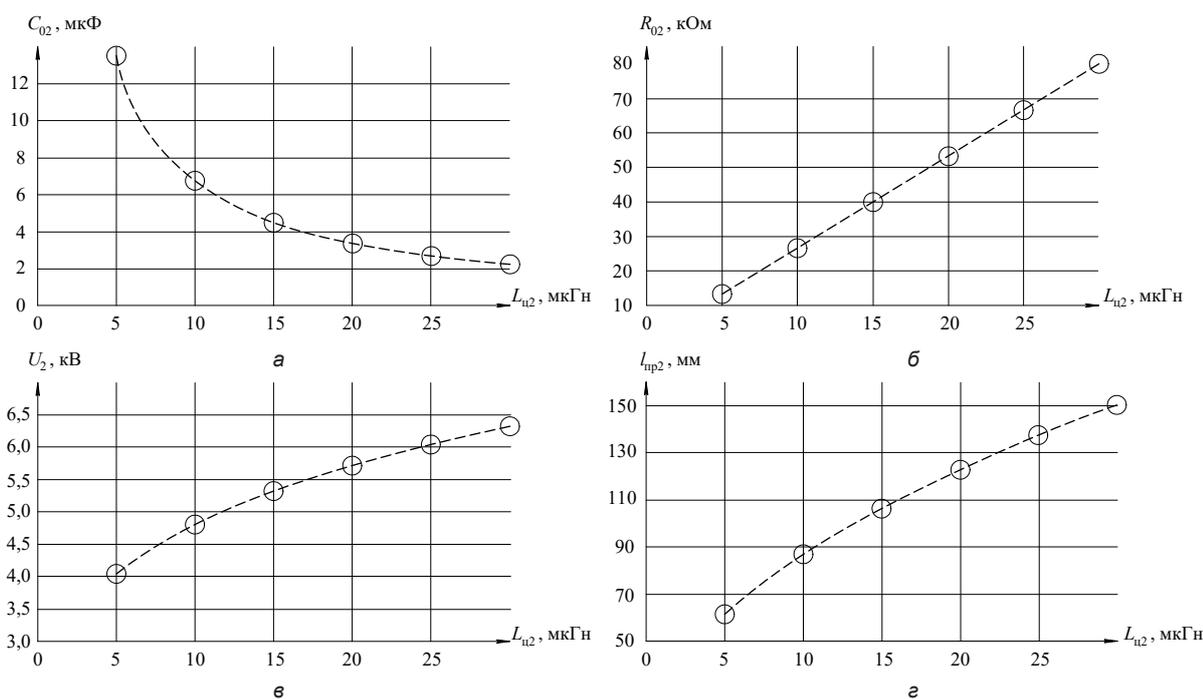


Рисунок 4 – Графики соответствия параметров: а – $C_{02}(L_2)$; б – $R_{u2}(L_2)$; в – $U_{02}(L_2)$; г – $l_2(L_2)$ воспроизводимому режиму в зависимости от изменения индуктивности
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Diagram of matching parameters (a – $C_{02}(L_2)$; b – $R_{u2}(L_2)$; c – $U_{02}(L_2)$; d – $l_2(L_2)$) reproducible mode depending on variance of inductivity
Source: compiled by the author.

$$R_{12}(L_2) = 2 \cdot \pi \frac{\Pi_1 \cdot L_2}{t_{\text{раз}}}, \text{ Ом}; \quad (11)$$

$$U_{02}(L_2) = S \sqrt{\frac{\Pi_2 \cdot h^* \cdot \sqrt{L_2}}{C_{02}^{3/7}(L_2)}}, \text{ В}; \quad (12)$$

$$l_2(L_2) = U_{02}^2(L_2) \cdot \sqrt{\frac{\Pi_3 \cdot \sqrt{t_{\text{раз}}} / \pi}{A}}, \text{ м}. \quad (12)$$

При варьировании параметров согласно графикам (рисунок 4) действительна воспроизводимость режима разряда, установленного для лабораторной установки со следующими исходными данными разрядного контура:

- емкость конденсаторной батареи $C = 18 \cdot 10^{-6}$, Ф;
- напряжение на клеммах конденсаторной батареи $U_0 = 5 \cdot 10^3$, В;
- индуктивность контура $L = 15 \cdot 10^{-6}$, Гн;
- активное сопротивление контура $R_{\text{н}} = 20 \cdot 10^3$, Ом;
- площадь сечения разрушающегося проводника $S = 20 \cdot 10^{-6}$
- длина разрушаемого проводника $l = 0,1$, м;
- плотность проводника $\rho_{\text{н}} = 8900 \text{ кг/м}^3$;
- удельная теплопроводность проводника $\sigma_{\text{н}0} = 59,6 \cdot 10^6$, $\text{С}^\circ/\text{м}$;
- удельная теплота плавления проводника $\lambda_{\text{н}} = 0,21 \cdot 10^6$, Дж/кг;
- удельная теплота парообразования металла $\gamma_{\text{н}} = 4,8 \cdot 10^6$, Дж/кг;
- искровая постоянная $A = 10^4$, $\text{В}^2 \cdot \text{с/м}^2$.

Графики а, в, г имеют экспоненциальный характер изменения характеристик в отличие от линейного б. Активное сопротивление цепи, $R_{\text{н}}$; напряжение на клеммах имеют тенденцию к росту U_0 ; длина разрушаемого проводника l увеличивается с ростом индуктивности, а емкость конденсаторной батареи C – уменьшается. Стоит отметить, воспроизведение установленного режима экономически целесообразно в ограниченных условиях. Так, анализируя зависимость $C_{02}(L_2)$ на обозреваемом оборудовании, выполнение задач доступно в рабочем интервале $C_{02}(L_2) = 3 \dots 30$ мкФ; $L = 2,3 \dots 23$ мкГн. Выбор параметров вне указанной области приводит к строгому соответствию характеристик разрядной цепи, что влечет за собой увеличение стоимости оборудования и усложнение его эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования обоснованы параметры режима разряда и предложен способ его воспроизводимости на промышленном оборудовании для электрогидравлического шпурового способа разрушения монолитных объектов.

Определены направленные на разрушение значимые факторы (переходные процессы в разрушающемся проводнике, длительность разряда и количество вводимой энергии), регулирование которыми осуществляется тремя параметрами: диаметром проводника, напряжением на клеммах конденсаторной батареи и ее емкостью. Воспроизводимость режима характеризуется в свою очередь четырьмя в соответствии с формулами (10) – (13): напряжением на клеммах конденсаторной батареи и ее емкостью; активным сопротивлением цепи; длиной разрушаемого проводника. Выявлена специфика воспроизводимости режима разряда, связанная с определением области применения технологии.

Представленная методика является основанием для оценки внедрения технологии в отрасль. На данный момент в ней заинтересованы организации, связанные с подготовкой территорий к строительству; дроблением горных пород и освобождением участков складирования негабаритов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Барсуков В.О., Репин С.В., Зазыкин А.В. Расчёт энергозатрат установки для электрогидравлического разрушения монолитных объектов / В.О. Барсуков, С.В. Репин, А.В. Зазыкин [и др.] // Строительные и дорожные машины. 2022. № 6. С. 23–25.
2. Барсуков В.О., Репин С.В., Зазыкин А.В. Электрогидравлическая установка для разрушения валунов и монолитных конструкций при производстве строительных работ / В.О. Барсуков, С.В. Репин, И.И. Воронцов [и др.] // Грузовик. 2022. № 4. С. 38–41.
3. Мартынов Н.В., Добромиров В.Н., Барсуков В.О., Аврамов Д.В. Электрогидравлическая технология разрушения объектов // Горная промышленность. 2021. № 2. С. 132–136. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-2-132-136.
4. Савенко Э.С., Савенков Н.В., Матвиенко С.А., Каспарьянц А.Г. Моделирование процесса электроразряда при восстановлении поршневых пальцев ДВС // Вестник СибАДИ. 2024; 21(2): 242–255. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-242-255>. EDN: INTOSP
5. Ефимова А.М. Эффективные способы демонтажа железобетонных конструкций // Наукосфера. 2024. № 1-2. С. 162–168. EDN VMFZOQ.

6. Ким К.К. Использование электрогидроимпульсного эффекта в железнодорожной отрасли / К.К. Ким. Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. 203 с. ISBN 978-5-4486-0730-1. EDN EXSJFU.
7. Юницкий А.Э., Першай Н.С., Арнаут С.А. Исследование влияния электрогидроудара на измельчение бурого угля как компонента почвогрунта // Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки. 2023. № 2(14). С. 64–73. EDN IIAYSYD.
8. Liu K. et al. Study on the coaxial electrode in electrohydraulic shockwave drilling technology // *Geoenery Science and Engineering*. 2023. T. 231. P. 212284.
9. Le Mentec R. et al. Electrohydraulic crimping of tubes within rings // *Metals*. 2023. T. 13. №. 8. P. 1382.
10. Wang Z. et al. Antisymmetric deformation behavior during eccentric explosion electro-hydraulic sheet forming process // *Materials and Manufacturing Processes*. 2023. T. 38. №. 6. P. 692–700.
11. Косенков В.М. Влияние объема цилиндрической разрядной камеры с жесткими стенками на поле давления в заполняющей ее воде // *Электронная обработка материалов*. 2022. Т. 58, №. 2. С. 68–80.
12. Akiyama H. Streamer discharges in liquids and their applications // *IEEE Transactionson Dielectrics and Electrical Insulation*. 2000. vol. 7. No. 5. pp. 646–653.
13. Jones H.M., Kunhardt E.E. The influence of pressure and conductivity on the pulsedbreakdown of water // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 1994. vol.1. pp. 1016–1025.
14. Knyazyev M., Holzmüller M., Homberg W. Investigation of pressure fields generated by two simultaneous discharges in liquid initiated by wires // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2023. T. 7. №. 1. P. 40.
15. Ledoux Y. Experimental investigation of the pulse duration on the efficiency and electrode wear of electrohydraulic forming process // *Manufacturing Review*. 2023. T. 10. P. 17.
16. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. Монография. Киев: Науковадумка, 1986. 206 с.
17. Mackersie J.W., Timoshkin I.V., Mac.Gregor S.J. Generation of high-power ultrasound by spark discharges in water // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2005. vol. 33. pp. 1715–1724.
18. Locke B.R., Sato M., Sunka P., Hoffmann M.R., Chang J.-S. Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment, Industrial and engineering chemistry research: American Chemical Society. 2006. vol. 45. No 3. pp. 882–905.
19. Wei Y., Zhang F., Wei B., Xu H., He K. Experimental and numerical analyses of tubular electrohydraulic forming process // *Key Engineering Materials*. 871(2021). pp. 80–86.
20. Дерен Ф.Д., Пепин В.М., Васильев А.Н. Моделирование переходных процессов в цепях формирования высоковольтных импульсов // *Агротехника и энергообеспечение*. 2023. № 2(39). С. 29–37. EDN ATNHLF.

REFERENCES

1. Barsukov V.O., Repin S.V., Zazykin A.V., Kobzar A.A., Khovalyg N.D.K. Energy consumption's calculation monolithic object's electrohydraulic destruction. *Construction and road machines*. 2022; 6: 23–25 (In Russ.).
2. Barsukov V.O., Repin S.V., Vorontsov I.I., Orlov D.S., Riznyk A.A. Electrohydraulic installation for destruction of boulders and monolithic structures during construction works. *Truck*. 2022; 4: 38–41 (In Russ.).
3. Martynov N.V., Dobromirov V.N., Barsukov V.O., Avramov D.V. Electrohydraulic Technology for Breaking Solid Objects. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2021;(2):132–136. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2021-2-132-136.
4. Savenko E.S., Savenko E.S., Matvienko S.A., Kasparyants A.G. Electric discharge process modelling when piston pins recovery in internal combustion engines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024;21(2):242-255. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-242-255>. EDN: IHTOCP
5. Efimova A.M. Effective ways of dismantling reinforced concrete structures. *Nauko – sfera*. 2024; 1-2: pp. 162-168. EDN VMFZOQ (In Russ.)
6. Kim K.K. *The use of the electrohydroimpulse effect in the railway industry*. Saratov: AI–Pi–Er–Media, 2019. 203 p. ISBN 978-5-4486-0730-1. EDN EXSJFU. (In Russ.)
7. Yunitskiy A.E., Arnaut S.A., Pershai N.S. Influence of electrohydraulic impact on the brown coal grinding as a soil component. *Bulletin of the Baranovichi State University. Series: Technical Sciences*. 2023; 2(14): 64–73. EDN IIAYSYD (In Russ.).
8. Liu K. et al. Study on the coaxial electrode in electrohydraulic shockwave drilling technology. *Geoenery Science and Engineering*. 2023; T. 231: 212284. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212284>.
9. Le Mentec R. et al. Electrohydraulic crimping of tubes within rings. *Metals*. 2023; T. 13. no 8: 1382. <https://doi.org/10.3390/met13081382>.
10. Wang Z. et al. Antisymmetric deformation behavior during eccentric explosion electro-hydraulic sheet forming process. *Materials and Manufacturing Processes*. 2023; T. 38. no 6: 692–700. <https://doi.org/10.1080/10426914.2022.2116041>.
11. Kosenkov V. M. Cylindrical discharge chamber's volume with rigid walls dependence on the pressure field in the water. *Electronic processing of materials*. 2022; vol. 58. No. 2: 68–80 (In Russ.).
12. Akiyama H. Streamer discharges in liquids and their applications. *IEEE Transactionson Dielectrics and Electrical Insulation*. 2000; vol. 7. No. 5: 646–653. DOI: 10.1109/94.879360
13. Jones H.M., Kunhardt E.E. The influence of pressure and conductivity on the pulsedbreakdown of water. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 1994; vol.1: 1016–1025. DOI: 10.1109/94.368641

14. Knyazyev M., Holzmüller M., Homberg W. Investigation of pressure fields generated by two simultaneous discharges in liquid initiated by wires. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2023; T. 7. №. 1: 40. <https://doi.org/10.3390/jmmp7010040>

15. Ledoux Y. Experimental investigation of the pulse duration on the efficiency and electrode wear of electrohydraulic forming process. *Manufacturing Review*. 2023; T. 10: 17. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2023016>.

16. Krivitsky E.V. *Dynamic of an electric explosion in a liquid*. Kiev: Naukova dumka, 1986: 206 (In Russ.).

17. Mackersie J.W., Timoshkin I.V., MacGregor S.J. Generation of high-power ultrasound by spark discharges in water. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2005; vol. 33: 1715–1724. DOI: 10.1109/TPS.2005.856411.

18. Locke B.R., Sato M., Sunka P., Hoffmann M.R., Chang J.-S. Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment. *Industrial and engineering chemistry research: American Chemical Society*. 2006; vol. 45. No 3: 882–905. <https://doi.org/10.1021/ie050981u>.

19. Wei Y., Zhang F., Wei B., Xu H., He K./ Experimental and numerical analyses of tubular electrohydraulic forming process. *Key Engineering Materials*. 871(2021): 80–86. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.871.80>.

20. Deren F.D., Repin V. M., Vasiliev A.N. Simulation of transient processes in high-voltage pulses formation circuits. *Agrotechnics and energy supply*. 2023; 2(39): 29-37. EDN ATNHLF. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Барсуков Вячеслав Олегович – аспирант автомобильно-дорожного факультета 3-го года обучения по направлению 05.05.04 – Дорожные строительные и подъемно-транспортные машины Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, г. Санкт-Петербург, 3-я Красноармейская улица, 3/6), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-2548-5309>, **SPIN-код:** 1034-2869, e-mail: barsukovvyach@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Barsukov Vyachslav O. – a 3rd year postgraduate student of automobile and road department of 05.05.04 program – Road construction and hoisting and transporting machines of St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (190005, St. Petersburg, 3rd Krasnoarmeyskaya Street, 3/6), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-2548-5309>, **SPIN-code:** 1034-2869, e-mail: barsukovvyach@yandex.ru.

Научная статья
УДК 621.876.32
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-662-671>
EDN: NRBMVA



РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ ПЕРИОДОВ ПРОВЕДЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ОБСЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭСКАЛАТОРОВ МЕТРОПОЛИТЕНА

В.Н. Дятлов¹ ✉, Д.П. Кононов²

¹Великолукский филиал ПГУПС,
г. Великие Луки, Россия

²Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I,
г. Санкт-Петербурга, Россия

✉ ответственный автор
w.dyatlov@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Основным элементом эскалатора метрополитена является опорная металлоконструкция, на которую устанавливаются все элементы, узлы и агрегаты, обеспечивающие его функционирование в качестве грузоподъемной машины непрерывного действия. Опорная металлоконструкция должна выдерживать не только собственный вес и суммарный вес прикрепленных к ней узлов и механизмов, но и обеспечивать стойкость к динамическим нагрузкам, возникающим в процессе их работы. Осуществление всесторонних диагностических мероприятий, направленных на анализ уровня износа и определение остаточного ресурса металлоконструкций эскалаторов, наталкивается на ряд сложностей, связанных с высокими требованиями к временным, материальным и финансовым затратам, а также с нарушением работы общественной транспортной системы.

Основная цель, стоящая перед данным исследованием, состоит в том, чтобы оптимизировать сроки для фиксации исходных данных, получаемых в ходе диагностического обследования металлоконструкций эскалаторов при очевидном уменьшении продолжительности их вынужденных простоев.

Материалы и методы. При написании статьи применялись данные комплексного обследования эскалаторов на базе ГУП «Петербургский метрополитен» в количестве 218 шт. в период с 2005 по 2019 г., а также конструкторская документация, статистические методы и методы математического моделирования.

Результаты. Использование математической модели и принципа рационализации позволяет существенно сократить временные и, следовательно, иные затраты при определении коррозионного эффекта.

Заключение. Применение предлагаемого подхода к рациональному распределению периодов времени для проведения диагностических обследований эксплуатируемых металлоконструкций эскалаторов приводит к превентивному получению итоговой прогнозной оценки величины коррозионного эффекта при сокращении общего срока проведения контрольных мероприятий на 38%. Принцип рационализации может быть употреблен также при осуществлении ускоренных испытаний на коррозионную стойкость материалов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метрополитен, эскалатор, опорная металлоконструкция, коррозионный эффект, математическое моделирование, принцип рационализации

Статья поступила в редакцию 30.07.2024; одобрена после рецензирования 23.09.2024; принята к публикации 17.10.2024.

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: Дятлов В.Н., Кононов Д.П. Рационализация периодов проведения диагностических обследований элементов металлоконструкций эскалаторов метрополитена // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 5. С. 662-671. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-662-671>

© Дятлов В.Н., Кононов Д.П., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-662-671>
EDN: NRBMVA

RATIONALIZATION OF DIAGNOSTIC EXAMINATION PERIODS FOR METALWORK ELEMENTS OF SUBWAY ESCALATORS

V.N. Dyatlov¹ ✉, D.P. Kononov²

¹Velikiye Luki branch of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Velikiye Luki branch PGUPS),
Velikiye Luki, Russian

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg, Russian
w.dyatlov@gmail.com

✉ corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The main element of the subway escalator is a supporting metal structure, on which all elements, components and assemblies are installed, ensuring its functioning as a continuous lifting machine. The supporting metal structure must withstand not only its own weight and the total weight of the components and mechanisms attached to it, but also provide resistance to dynamic loads arising during their operation. The implementation of comprehensive diagnostic measures aimed at analyzing the level of wear and determining the residual life of escalator metal structures encounters a number of difficulties associated with high demands on time, material and financial costs, as well as disruption of the public transport system.

The main goal of this study is to optimize the timing for recording the initial data obtained during the diagnostic examination of escalator metal structures with an obvious reduction in the duration of their forced downtime.

Materials and methods. During the research process, data from a comprehensive survey of escalators based on the State Unitary Enterprise "St. Petersburg Metro" in the amount of 218 pieces in the period from 2005 to 2019 were used, design documentation, statistical methods and mathematical modeling methods were used.

Results. The use of a mathematical model and the principle of rationalization can significantly reduce the time and, consequently, other costs in determining the corrosion effect.

Conclusion. The use of the proposed approach to the rational allocation of time periods for conducting diagnostic examinations of operated escalator metal structures facilitates the preventive final forecast estimate of the magnitude of the corrosion effect while reducing the total period of control measures by 38%. The principle of rationalization can also be used in the implementation of accelerated tests for corrosion resistance of materials.

KEYWORDS: subway, escalator, supporting metal structure, corrosion effect, mathematical modeling, rationalization principle

The article was submitted 30.07.2024; approved after reviewing 23.09.2024; accepted for publication 17.10.2024.

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: Dyatlov V.N., Kononov D.P. Rationalization of diagnostic examinations periods for metalwork elements of subway escalators. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (5): 662-671. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-662-671>

© Dyatlov V.N., Kononov D.P., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Эскалаторы, функционирующие в метрополитене, представляют собой мощную металлическую каркасную структуру, устанавливаемую на фундаменте тоннеля или перекрытия, которая, в свою очередь, выступает в качестве основы для всех последующих элементов, узлов и агрегатов. Изготовление металлоконструкций эскалаторов осуществляется с помощью специализированных производственных процессов, с применением профилированной и листовой стали¹. Для эскалаторов российского производства характерно применение сталей марок СтЗсп и СтЗпс².

Опорная металлоконструкция выполняет важнейшую функцию, так как является ключевым элементом функционирования всего эскалатора³. К ней крепятся все необходимые агрегаты – двигатели, тяговые цепи, поручни и прочие механизмы. Именно опорная металлоконструкция должна выдерживать не только собственный вес и суммарный вес прикреплённых к ней узлов и механизмов, но и обеспечивать стойкость к динамическим нагрузкам, возникающим в процессе их работы [1, 2]. Стабильность металлоконструкции обеспечивает безопасность и эффективную функциональность всей системы, называемой эскалатор [3, 4].

Опорные металлоконструкции в силу особенностей их конструктивного исполнения и монтажа при проведении различных ремонтов⁴ практически всегда остаются на своих местах в течение всего периода эксплуатации, заменяются в основном вышедшие из строя агрегаты и механизмы, обеспечивающие функционирование эскалатора [1, 2, 5, 6].

Для определения и оценки индивидуального ресурса лимитирующих элементов общей металлоконструкции эскалатора используется комплексная методология, которая интегрирует как разрушающие, так и неразрушающие методы диагностики, включая аку-

стический метод и метод магнитной памяти металлов⁵, при одновременном дополнении их проверочными прочностными расчётами. Результатом такого всестороннего анализа является выявление потенциально опасных зон концентраций напряжений⁶. Обнаружение таких зон, которые на начальном этапе могут представлять собой микропластические деформации, едва различимые на поверхности металла с размерами не более нескольких микрон, особенно при целостности лакокрасочного покрытия, сопряжено с большими затратами временных, материальных и финансовых ресурсов. При любых иных условиях без всестороннего подхода вероятность попадания в данные зоны становится очень незначительной [1, 2, 7, 8, 9].

Проведение расчётов на прочность с целью определения остаточного ресурса лимитирующих элементов металлоконструкции теряет свою актуальность, если невозможно идентифицировать критические зоны с высокими напряжениями и получить репрезентативные пробы для анализа. В таких условиях прогнозная оценка может оказаться неточной. В контексте коррозионных процессов ситуация меняется; когда коррозия затрагивает элементы конструкции, ведя к уменьшению по контуру размеров повреждённого поперечного сечения, необходимо проводить расчёт на прочность с учётом коррозионного эффекта, что включает синтез величины утоньшения стенок и интенсивности коррозии с учётом того, как коррозия влияет на усталостные характеристики материала и способствует снижению его эксплуатационных свойств [1, 5, 9, 10].

Основной задачей при проведении работ, связанных со сбором и обработкой фактических данных с точки зрения эксплуатации эскалаторов, является минимизация и рационализация их остановов при проведении комплексных обследований [11, 12].

¹ Поминов И.Н. Эскалаторы метрополитена. Устройство, обслуживание и ремонт. М.: Транспорт, 1994. 320 с.

² Руководство по ремонту эскалаторов. РР-ЭС 992-17. Петербургский метрополитен. СПб., 2017. 96 с.

³ Бардышев О.А., Попов В.А., Филин А.Н., Харлов М.В. Обеспечение безопасности тоннельных эскалаторов. СПб.: Безопасность, 2020. 128 с.

⁴ Tawancy, H. M., Ul-Hamid, A., Abbas, N. M. Practical engineering failure analysis New York: Marcel Dekker, 2004, 616 p.

⁵ Руководство по ремонту эскалаторов. РР-ЭС 992-17. Петербургский метрополитен. СПб., 2017. 96 с.

⁶ Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчёт элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.

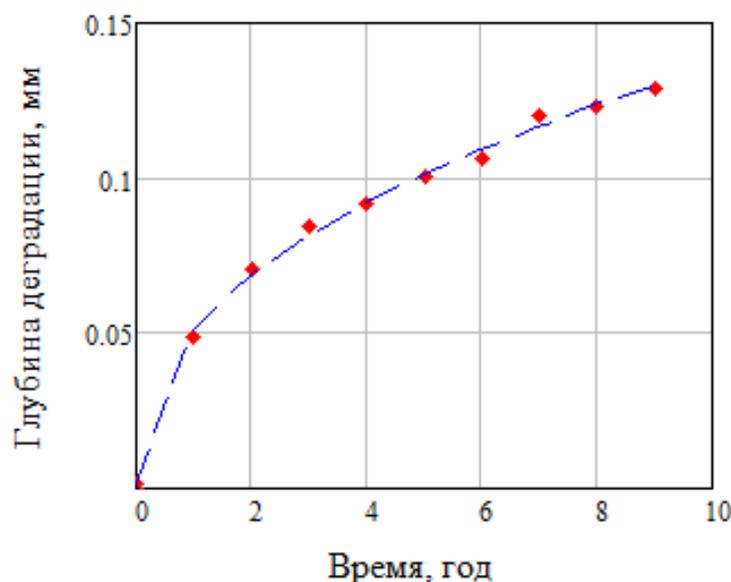


Рисунок – Динамика атмосферной коррозии сталей Ст3пс и Ст3кп:

◆◆◆ – экспериментальные точки;

— – установленная зависимость

Источник: составлено авторами.

Figure – Dynamics of atmospheric corrosion of St3ps and St3kp steels (Russian standards):

◆◆◆ – experimental points;

— – established dependence

Source: compiled by the authors.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследуемый объект – металлическая каркасная структура эскалатора метрополитена, находящаяся в среде с индивидуальными характеристиками – является примером плохо организованной системы, в которой трудно выделить и зафиксировать многие факторы и предсказать их взаимодействия⁷. Это обусловлено тем, что связи между различными факторами и их влияние на целостность и работоспособность конструкции в целом до конца не исследованы [1, 9]. Анализ результатов комплексного обследования эскалаторов на базе ГУП «Петербургский метрополитен» в количестве 218 шт., проводимого в период с 2005 по 2019 г.⁸, конструкторской документации, изучение статистических материалов позволили воспользоваться методом матема-

тического моделирования, а также сформулировать принцип рационализации периодов проведения диагностических обследований элементов металлоконструкций эскалаторов метрополитена.

Данный принцип предполагает, что общий срок службы объекта, а в случае исследовательских работ – период экспозиции образцов, делится на несколько пропорциональных временных интервалов, начинающихся от момента запуска объекта в эксплуатацию, или начала экспозиции. Подобное разделение позволяет эффективно управлять обработкой потоков данных и сокращать количество диагностических обследований через применение точных прогностических моделей, которые предоставляют итоговые результаты с высокой степенью достоверности.

⁷ Schweitzer, P. A. Fundamentals of Metallic Corrosion: Atmospheric and Media Corrosion of Metals. BocaRaton, CRC Press, 2006, 752 p.

⁸ ГУП «Петербургский метрополитен». Технические характеристики метрополитена [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.metro.spb.ru/metro.html?v=1> (дата обращения: 25.07.2024).

Таблица 1
Глубинный показатель коррозии малоуглеродистых сталей
Источник: составлено авторами.

Table 1
Deep corrosion index of low-carbon steels
Source: compiled by the authors.

Марка стали	Глубинный показатель коррозии, мм/год		
	1-й год	2-й год	3-й год
СтЗпс	0,057	0,039	0,032
СтЗкп	0,049	0,036	0,030

Заложенный в основу принципа рационализации подход предполагает, что приращение глубинного показателя коррозии s в низкоуглеродистых сталях происходит за пропорциональные промежутки времени на одинаковые значения [1, 5, 9]. Данную тенденцию можно проследить на рисунке, иллюстрирующем динамику изменения глубины коррозионной деградации с течением времени, которую можно условно подразделить на две характерные фазы по обе стороны от точки инфлексии: вначале происходит резкое ускорение коррозионного процесса, а затем постепенное снижение темпов коррозии. Это замедление в деградации связывается с формированием коррозионных продуктов на поверхности материала, которые со временем накапливаются и начинают выполнять уже защитные функции. Соответственно, с увеличением промежутков времени между расчётными значениями и снижением величины приращения глубинного показателя коррозии с течением времени можно сделать вывод, что заложенный в основу принципа рационализации подход верен.

Основываясь на особенностях кинетики атмосферной коррозии низкоуглеродистых сталей, процесс коррозионного износа отдельных элементов опорных металлоконструкций эскалаторов метрополитена может быть отображён через специализированную математическую модель.

Математическое моделирование коррозионных процессов в их увязке со статической и динамической составляющими при эксплуатации эскалаторов основывается на много-многозначные причинно-следственные отношения. Для более полного и точного выражения реально происходящих процессов коррозионного разрушения необходимо пред-

усматривать наличие обратной связи, которая реализуется, например, следующим образом: глубина коррозии с течением времени прогрессирует, что приводит к уменьшению сечения элемента и, следовательно, к увеличению значения напряжения, что, в свою очередь, определяет динамику увеличения глубины коррозии. Статическая составляющая, определяемая собственным весом металлоконструкции и агрегатов эскалатора, и динамическая составляющая, определяемая непрерывным движением некоторой совокупности деталей, приводит к изменению структуры материала элементов металлоконструкции, в частности, к межзёрненному разрушению, что впоследствии становится предпочтительным местом для развития коррозионных процессов.

В общем, модель [1, 5, 9] представляется совокупностью уравнений, учитывающих не только параметры окружающей среды, исходя из географического положения и сезонности, но и конструктивные особенности элементов в их взаимосвязи с воздействием множественных циклов нагружения.

В данной статье используется фрагмент математической модели (1), разработанной в рамках научного исследования, который характеризует равномерное проникновение коррозионного разрушения вглубь металла. Это даёт возможность предварительно оценить способность модели к модификации её параметров под конкретные условия эксплуатации.

$$\left\{ \begin{array}{l} s = K\tau^n \\ n = \log_{\tau} \left(\frac{v}{K} \right) + 1 \\ K = 0.063 + 7.831 \cdot v \\ v = (0.362 \cdot \ln(C + 68.066) - 1.526) \cdot k_{\varphi} \end{array} \right. , \quad (1)$$

Таблица 2

Определение конечной величины времени экспозиции согласно принципу пропорциональности
Источник: составлено авторами.

Table 2

Determination of the final exposure time according to the principle of proportionality
Source: compiled by the authors.

t , год	Величина s согласно (1), мм	Величина s согласно (3), мм	Погрешность, %
СтЗпс ($s=0,0574t^{0,47}$)			
4,8	0,120	-	-
7,7	0,150	-	-
12,4	0,187	$0,150 + (0,150 - 0,120) = 0,180$	3,9
20	0,235	$0,187 + (0,187 - 0,150) = 0,224$	4,9
СтЗкп ($s=0,0514t^{0,43}$)			
4,8	0,101	-	-
7,7	0,124	-	-
12,4	0,152	$0,124 + (0,124 - 0,101) = 0,147$	3,4
20	0,186	$0,152 + (0,152 - 0,124) = 0,180$	3,3

где K – стартовый коэффициент, соответствующий средней скорости коррозии за первый год;

n – коэффициент, учитывающий замедление процесса коррозии вследствие формирования защитной плёнки из продуктов коррозии;

t – продолжительность эксплуатации объекта (продолжительность экспозиции материала);

u – скорость коррозии;

k_{φ} – коэффициент влажности среды;

$C = C_{Cl} + 1.211C_{SO_2}$ – эквивалентный уровень концентрации коррозионно-активных веществ в окружающей атмосфере;

C_{SO_2} – концентрация двуокиси серы (сернистого ангидрида), определяемая газоанализатором по типу контролируемого вещества;

C_{Cl} – концентрация хлоридов в окружающей среде, определяемая также газоанализатором по типу контролируемого вещества.

Модель (1) позволяет уже на раннем этапе оценить воздействие отдельных компонентов среды на процесс, что значительно расширяет спектр возможностей её применения.

Справедливость использования степенной функции при описании процессов коррозии подтверждается, например, при проведении регрессионного анализа экспериментальных данных, представленных в таблице 1, при этом обычно значение n не превышает 0,5.

Изучение данных таблицы 1 позволяет сделать вывод о том, что глубина коррозионных изменений для сталей марок СтЗкп и СтЗпс примерно одинакова – различие между ними не превышает 10%. Это указывает на то, что скорость атмосферной коррозии для этих сталей не имеет прямой зависимости от их химического состава, который регламентируется ГОСТ 380–2005, а скорее обусловлена внешними факторами. В частности, именно такие параметры окружающей среды, как тем-

пература, влажность и химически активные компоненты в атмосфере, оказывают определяющее влияние на коррозионный процесс данных сталей⁹.

Рассмотрим более подробно математическую модель (1) согласно с принципом рационализации.

Применяя принцип золотого сечения при разделении продолжительности эксплуатации объекта t , под которым понимается металлическая каркасная структура эскалатора метрополитена, на пропорциональные временные интервалы, примем $\varphi = 0,618$. Значение данного коэффициента считается согласно определению принципа золотого сечения исходя из того, что при делении периода эксплуатации большая часть относится к меньшей так же, как и весь период относится к его большей части. В результате чего получаем $\tau_1 = 0,618t$, $\tau_2 = 0,618\tau_1$, ..., $\tau_i = 0,618\tau_{i-1}$. Количество значений высчитывается исходя из степени агрессивности окружающей среды и установленного нормативной документацией срока службы эскалатора метрополитена.

Определим приращение величины глубинного показателя коррозии s за эти промежутки времени. Считая, что $s_1 = K \cdot \tau_1^n$, $s_2 = K \cdot \tau_2^n$ и так далее, получаем выражение

$$s - s_1 = s_1 - s_2. \quad (2)$$

Иначе

$$s = s_1 + (s_1 - s_2). \quad (3)$$

Использование именно пропорции золотого сечения оказалось оправдано экспериментальными результатами. Иные значения φ сказываются в перспективе либо на изменении прогнозной величины глубинного показателя коррозии, либо на увеличении погрешности.

Для оценки состояния отдельных элементов металлоконструкций, подвергающихся воздействию коррозии, предположим, что общий срок службы металлоконструкции эскалатора составляет $t = 20$ лет. Для частных интервалов времени определены следующие значения: $\tau_1 = 12,4$ года, $\tau_2 = 7,7$ года, $\tau_3 = 4,8$ года. Первоначально производится расчёт с применением степенной функции математической модели (1) пропорциональных величин s , затем по определённым значениям τ_1 , τ_2 и τ_3 – вычисление s с использованием

полученного выражения (3). Далее делается сравнительный анализ двух наборов данных, при этом результаты, полученные при использовании модели (1), интерпретируются как фактические экспериментальные измерения (математическое моделирование результатов эксперимента).

Сравнение результатов позволяет проверить валидность и точность выражения (3), используемого для прогнозирования износа металлоконструкций при долгосрочной эксплуатации, а также может выявить потенциальные ошибки или дать основания для корректировки математических моделей для более точного совпадения с реальными условиями эксплуатации. Результаты регрессионного анализа данных таблицы 1 и расчётов сведены в таблицу 2.

Исходя из анализа данных, представленных в таблице 2, применение пропорции золотого сечения подтверждает свою эффективность. При n , не превышающем значение 0,5, точность подобных расчётов остаётся достаточно высокой, так как погрешность не больше 5%. Выход за значение пропорции золотого сечения в большую сторону влечёт за собой одновременно рост ожидаемой величины s и увеличение погрешности, в меньшую сторону – снижение погрешности с одновременным уменьшением прогнозируемой величины s . Таким образом, можно заключить, что использование золотого сечения как основы для принципа рационализации является оптимальным с точки зрения уравнивания точности и достоверности прогнозируемых величин.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При оценке состояния металлоконструкций эскалаторов, используемых в метрополитене, в частности отдельных лимитирующих элементов, важно определять оптимальные сроки для их диагностического обследования. В этом контексте, 20-летний эксплуатационный период разделяется на ряд пропорциональных временных отрезков (20, 12,4, 7,7 и 4,8 лет), чтобы более эффективно оценить динамику коррозионных процессов. Согласно (3) ключевыми моментами для определения конечного значения величины коррозионного эффекта (величины s) являются оценки, сделанные через 12,4 и 7,7 лет от начала эксплуатации (или экспозиции). Принцип рационализации позволяет заметно сократить время, необходимое

⁹ Розенфельд И.Л. Коррозия и защита металлов. М.: Металлургия, 1969. 448 с.

для оценки конечного значения коррозионного эффекта, сокращая общий срок на 7,6 года или 38% по сравнению с полным 20-летним циклом. Кроме того, для повышения точности прогнозирования результата можно сопоставить расчёты с использованием данных, полученных в 7,7 и 4,8 г., с фактическими данными на 12,4 г. экспозиции (эксплуатации) и внести необходимые коррективы.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предварительный анализ результатов комплексного обследования эскалаторов на базе ГУП «Петербургский метрополитен» позволил установить ряд регрессионных зависимостей между процессами развития коррозионных и усталостных повреждений металлоконструкций эскалаторов метрополитена, а также сформулировать принцип рационализации периодов проведения диагностических обследований отдельных конструктивных элементов.

Современная практика комплексного обследования опорных металлоконструкций эскалаторов метрополитена, как и длительные экспозиции образцов материалов, не включает в себя применение принципа рационального распределения временных интервалов. В большинстве случаев для оценки результатов используют равные временные промежутки, что не всегда является эффективным подходом. Отсутствие рационального распределения интервалов ведёт к усложнению обработки экспериментальных данных и невозможности своевременно делать обоснованные выводы, что фактически приводит к необходимости проводить диагностические обследования на протяжении полного запланированного срока, вплоть до его номинального значения, в то время как при соблюдении принципа рационализации при распределении временных интервалов можно достигнуть более раннего завершения того или иного комплекса работ, получив интересующий конечный результат.

Применение формулы (3) даёт возможность не только упростить вычисления степени коррозионного воздействия, но и сократить продолжительность экспериментов или количество периодических диагностических обследований за счёт точности прогноза. Принцип рационализации можно считать новым подходом к проведению ускоренных испытаний на коррозионную стойкость материалов, который одновременно служит для точной прогностической оценки коррозионного износа металлоконструкций эскалаторов метрополитена в процессе их эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дятлов В.Н. Моделирование процесса коррозии несущих металлоконструкций эскалатора метрополитена // Вестник МАДИ. 2022. №1 (68). С. 29–35.
2. Харлов М.В., Попов В.А. Методика оценки технического состояния эскалатора // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. Т.9, № 4. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/05TVN417.pdf> (дата обращения: 25.07.2024).
3. Попов В.А., Еланцев В.В. К вопросу повышения эффективности безопасности эксплуатации тоннельных эскалаторов метрополитена. Управление рисками // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. № 3(49). С. 10–22. DOI: <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2021-49-3-10-22>.
4. Еланцев В.В. К вопросу повышения эффективности и безопасности эксплуатации тоннельных эскалаторов метрополитена. Алгоритм прогнозирования технического состояния // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 2. С. 32–41.
5. Дятлов В.Н., Орлов С.В., Попов В.А. Совместное влияние циклических нагрузок и коррозии на техническое состояние металлоконструкций эскалаторов метрополитена // Мир транспорта. 2023. Т. 21, № 4 (107). С. 21–28. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-4-3>.
6. Sharav N., Szeinuk M., Shifan Y. Does your city need a metro? – A Tel Aviv case study. Case Studies on Transport Policy. 2018. no. 6 (4). pp. 537–553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2018.07.002>.
7. Kazarinov N., Smirnov A., Petrov Y., Gruzdkov A. Dynamic fracture effects observed in a one-dimensional discrete mechanical system. 2020. E3S Web of Conferences. P. 157. № 01020, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084111141&doi=10.1051%2fe3sconf%2f202015701020&partnerID=40&md5=ff349ae2159696f6435772713fca13e8> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.1051/e3sconf/202015701020.
8. Uzdin A., Prokopovich S. Some principles of generating seismic input for calculating structures (2020) E3S Web of Conferences. 2020. P. 157. № 06021. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084111517&doi=10.1051%2fe3sconf%2f202015706021&partnerID=40&md5=2c52657ac32615f175abb033915b52dc> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.1051/e3sconf/202015706021.
9. Дятлов В.Н. Уточнение модели развития коррозионных дефектов несущих металлоконструкций эскалатора метрополитена // Вестник МАДИ. 2022. № 3 (70). С. 46–50.
10. Ватулин Я.С., Попов В.А., Дятлов В.Н. Техническое диагностирование закладных элементов крановых путей грузоподъемного оборудования в машинных залах тоннельных эскалаторов // Известия МГТУ «МАМИ». 2022. Т. 16, № 3. С. 211–250. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-106323>
11. Ермилова А.В., Будрина Е.В. Инновационный вектор развития эффективной стратегии экс-

платации тоннельных эскалаторов // Экономика. Право. Инновации. 2020. № 1. С. 57–64.

12. Casals M., Gangoellis M., Forcada N., Macarulla M., Giretti A., Vaccarini M. SEAM4US: An intelligent energy management system for underground stations. *Applied energy*. 2016. vol. 166. pp. 150–164. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.01.029

REFERENCES

1. Dyatlov V.N. Modeling of the corrosion process of bearing metal structures of the subway escalator. *Vestnik MADI*. 2022; 1(68): 29–35. (In Russ.)

2. Kharlov M.V., Popov V.A. Technique for assessing the technical condition of the escalator. *Internet-zhurnal Naukovedenie*. 2017; vol. 9, no. 4. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/05TVN417.pdf> (accessed 25.07.2024). (In Russ.)

3. Popov V.A., Yelantsev V.V. Increasing the efficiency and safety of operation of underground tunnel escalators. Management of risks. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2021. no. 3 (49), pp. 10–22 (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2021-49-3-10-22>.

4. Elantsev V.V. To the question of improvement efficiency and safety operation of underground tunnel escalators. technical state forecasting algorithm. *International journal of applied and fundamental research*. 2021; 2: 32–41 (in Russ.)

5. Dyatlov V.N., Orlov S.V., Popov V.A. Combined Influence of Cyclic Loads and Corrosion on the Technical Condition of Metal Structures of Metro Escalators. *World of Transport and Transportation*. 2023; 21(4): 21–28. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-4-3>

6. Sharav N., Szeinuk M., Shifan Y. Does your city need a metro? – A Tel Aviv case study. *Case Studies on Transport Policy*. 2018; 6 (4): 537–553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2018.07.002>

7. Kazarinov N., Smirnov A., Petrov, Y., Grudkov A. Dynamic fracture effects observed in a one-dimensional discrete mechanical system. *E3S Web of Conferences*. 2020. 157. 01020. DOI: 10.1051/e3sconf/202015701020. Available at: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084111141&doi=10.1051%2fe3sconf%2f202015701020&partnerID=40&md5=ff349ae2159696f6435772713fca13e8> (assessed: 25.07.2024). DOI: 10.1051/e3sconf/202015701020.

8. Uzdin A., Prokopovich S. Some principles of generating seismic input for calculating structures. *E3S Web of Conferences*. 2020. 157. article № 06021. DOI: 10.1051/e3sconf/202015706021. Available at: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084111517&doi=10.1051%2fe3sconf%2f202015706021&partnerID=40&md5=2c52657ac32615f175abb033915b52dc> (assessed: 25.07.2024).

9. Dyatlov V.N. Clarification of the model of development of corrosion defects of bearing metal structures of metro escalators. *Vestnik MADI*. 2022; 3(70): 46–50. (In Russ.)

10. Vatulin YS, Popov VA, Dyatlov VN. Technical diagnostics of the embedded elements of crane tracks

of lifting equipment in machine halls of tunnel escalators. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2022; 16(3): 241–250. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-106323>

11. Yermilova A.V., Boudrina E.V. Innovative vector of development of effective strategy for tunnel escalator operating. *Economics. Law. Innovation*. 2020; 1: 57–64 (in Russ.)

12. Casals M., Gangoellis M., Forcada N., Macarulla M., Giretti A., Vaccarini M. SEAM4US: An intelligent energy management system for underground stations. *Applied energy*. 2016; vol. 166: 150–164. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.01.029

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Дятлов В.Н. Формирование цели научного исследования. Анализ результатов комплексного обследования эскалаторов, разработка математической модели. Анализ состояния вопроса. Получение данных для анализа и подготовка материалов для статьи.

Кононов Д.П. Руководство темой исследования. Формирование целей и задач исследования. Разработка научной концепции.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Dyatlov V.N. Substantial contribution to the design and the research purpose. Analysis of the data obtained on comprehensive examination of escalators, development of a mathematical model. State of the art analysis. Collecting data for analysis and preparing materials for the article.

Kononov D.P. Management of the research topic investigation. Drafting the research goals and objectives. Substantial contribution to the research conception.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дятлов Вячеслав Николаевич – преподаватель Великолукского филиала ПГУПС (182100, Псковская обл., г. Великие Луки, пр. Гагарина, 95), стажёр кафедры «Наземные транспортно-технологические машины» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ) (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4864-7554>, **SPIN-код:** 2978-6706, e-mail: w.dyatlov@gmail.com

Кононов Дмитрий Павлович – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС) (190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3662-550X>, **SPIN-код:** 8591-3240, e-mail: d_kononov@mail.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Vyacheslav N. Dyatlov – lecturer at the Velikiye Luki branch of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Velikiye Luki branch PGUPS)

(182100, Pskov region, Velikiye Luki, 95 Gagarin Ave.), trainee at the Department of Land Transport and Technological Machines of the St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya str., 4), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4864-7554>, **SPIN-код:** 2978-6706, e-mail: w.dyatlov@gmail.com

Dmitry P. Kononov – Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Land Transport and Technological Complexes of the Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (190031 St. Petersburg, 9 Moskovsky pr.), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3662-550X>, **SPIN-код:** 8591-3240, e-mail: d_kononov@mail.ru

Научная статья
УДК 62-182
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-672-690>
EDN: KWZIXN



ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ДВИЖЕНИЕ ЭКСКАВАТОРА-ПОГРУЗЧИКА ЧЕРЕЗ ВОДНУЮ ПРЕГРАДУ ВБРОД

Е.Р. Магдина

Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ),
г. Санкт-Петербург, Россия
elisluk97@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Гидродинамическое давление играет значительную роль в работе транспортно-технологических машин, используемых в зонах затопления для проведения восстановительных и неотложных работ. Изучение этого влияния имеет большую актуальность в связи с необходимостью повышения эффективности и безопасности операций в условиях водной среды. Гидродинамическое давление может вызывать изменения в поведении машины, влиять на ее маневренность и устойчивость. Понимание этих процессов позволяет разрабатывать более эффективные методы борьбы с негативными последствиями воздействия водной среды на работу машин, может оценить безопасные условия их применения. Целью исследования влияния гидродинамического давления на движение транспортно-технологических машин через водную преграду вброд, на примере полноприводного экскаватора-погрузчика с равновеликими колесами, является определение критических значений параметров водной преграды, при которых обеспечивается эффективное и безопасное преодоление водных препятствий данной техникой.

Материалы и методы. Для анализа использовались теоретические исследования, связанные с влиянием водного потока на движение самоходных колесных машин. Проводилось математическое моделирование прямолинейного движения экскаватора-погрузчика через водную преграду различной глубины и скорости течения. В качестве основных исследуемых параметров были приняты поперечное (лобовое) гидродинамическое сопротивление, продольное (боковое) гидродинамическое давление и нормальные реакции на колесах машины.

Результаты. Выведены математические зависимости для определения нормальных реакций на передней и задней осях экскаватора-погрузчика при воздействии поперечного гидродинамического сопротивления в стоячей воде, нормальных реакций на левом и правом бортах машины при воздействии продольного гидродинамического давления на неподвижную и движущуюся машину, приведены графические зависимости нормальных реакций на колесах от глубины водного потока.

Обсуждение и заключение. Наличие неблагоприятных факторов водной среды, влияющих на движение транспортно-технологических машин через водную преграду, дает основание для разработки методики определения предельных параметров затопления, при которых машины смогут безопасно и эффективно выполнять работы в зонах затопления. Исследование влияния гидродинамического давления на транспортно-технологические машины является важной задачей, направленной на решение этой проблемы. Полученные результаты помогут развивать технику и технологии для работы в условиях повышенного гидродинамического давления, что способствует развитию отраслей, связанных с работой наземных транспортно-технологических машин в водной среде.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наводнение, транспортно-технологические машины, экскаватор-погрузчик, гидродинамическое давление, коэффициент обтекаемости, водная преграда, скорость течения

БЛАГОДАРНОСТИ: исследование выполнено за счет средств Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» в рамках гранта СПбГАСУ в 2024 году на выполнение профессорско-преподавательских научно-исследовательских работ по научному направлению «Автомобильно-дорожный комплекс – интеллектуальные транспортные системы» № 13-НГПР-24.

© Магдина Е.Р., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Статья поступила в редакцию 30.07.2024; одобрена после рецензирования 23.09.2024; принята к публикации 17.10.2024.

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: Магина Е.Р. Оценка влияния гидродинамического давления на движение экскаватора-погрузчика через водную преграду вброд // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 5. С. 672-690. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-672-690>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-672-690>

EDN: KWZIXN

ASSESSMENT OF HYDRODYNAMIC PRESSURE EFFECT ON BACKHOE-LOADER MOVEMENT TO WADE THROUGH THE WATER OBSTACLE

Yelizaveta R. Magdina

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia
elisluk97@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Hydrodynamic pressure plays an essential role in the operation of transport and technological machines used in flooded areas for recovery and emergency actions. The study of this influence has a great relevance due to the necessity of improving the work efficiency and safety in water environment. Hydrodynamic pressure can cause changes in machine operation and influence on its maneuverability and stability. Understanding of these processes allows to develop more effective methods to prevent the negative impact consequences of the water on the machine performances, let us evaluate the safe conditions of their use. The aim of the study of hydrodynamic pressure effect on transport and technological machine movement to wade through the water impediment, using the example of an all-wheel drive excavator-loader with equal-sized wheels, is to determine the critical values of the water barrier parameters, which ensure effective and safe overcoming of water obstacles by this type of vehicle.

Materials and methods. Theoretical studies related to the influence of water flow on the movement of self-propelled wheeled machines were used for the analysis. Mathematical modelling of rectilinear movement of backhoe-loader through the water barrier of different depth and with different flow velocity was carried out. Transverse (frontal) hydrodynamic resistance, longitudinal (lateral) hydrodynamic pressure and standard reactions on the machine wheels were taken as the main parameters under study.

Results. Mathematical relationships were derived to determine the standard reactions on the front and rear axles of the excavator-loader under the influence of transverse hydrodynamic resistance in standing water, normal reactions on the left and right sides of the machine under the influence of longitudinal hydrodynamic pressure on the stationary and moving machine, graphical relations of normal reactions of the wheels depending on the depth of the water stream were deduced.

Discussion and conclusion. The presence of unfavorable factors of the water environment effecting the movement of transport and technological machines through the water obstacle provides the basis for the development of a methodology for determining the maximum flooding parameters at which machines can perform work safely and effectively in flooded areas. The study of the influence of hydrodynamic pressure on transport and technological machines is an important task aimed at solving this problem. The obtained results will help to develop machine building techniques and technologies for operation in conditions with increased hydrodynamic pressure, which contributes to the development of industries related to the operation of land transport and technological machines in the aquatic environment.

KEYWORDS: flooding, transport and technological machines, backhoe-loader, hydrodynamic pressure, streamline coefficient, water obstacle, flow velocity

© Magdina Ye.R., 2024



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

ACKNOWLEDGEMENTS: *the study was carried out at the expense of the Federal State Budgetary Higher Educational Institution "Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering" within the grant in 2024 for the performance of professorial and teaching research works in the scientific direction "Automobile and Highway Complex - Intelligent Transport Systems" №13-NPR-24.*

The article was submitted: 30.07.2024; approved after reviewing: 23.09.2024; accepted for publication: 17.10.2024.

The author has read and approved the final manuscript.

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

For citation. Magdina Ye.R. Assessment of hydrodynamic pressure effect on backhoe-loader movement to wade through the water obstacle. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2024; 21 (5): 672-690. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-672-690>

ВВЕДЕНИЕ

Экстремальные наводнения в городских условиях стали одними из основных источников угрозы для жизни и имущества людей и поэтому вызывают большую озабоченность по всему миру [1, 2, 3]. Наводнения в городах могут привести к серьезным жертвам, а также к значительным экономическим и социально-экологическим последствиям, особенно в высоко урбанизированных мегаполисах с плотным населением и социальными объектами [4, 5]. В пострадавших регионах перебои в работе транспортных сетей часто приводят к критическому дефициту предметов первой необходимости, таких как продукты питания и вода [6, 7]. Для того чтобы грамотно управлять наводнениями, необходимо определить риск неустойчивости, которому подвергаются транспортные средства в зонах, подверженных наводнениям [8, 9].

В научной работе [10] описаны экспериментальные исследования на масштабных моделях автомобилей Ford Focus, Volvo XC90 и Ford Transit по определению значений глубины и скорости водного потока, при которых появится начальная скорость движения неподвижного (припаркованного) частично затопленного автомобиля.

В исследовании [11] были проведены эксперименты с использованием трех типов физических моделей автомобилей Mini Cooper, Mitsubishi Pajero, BMW X5 в масштабе, причем для каждого типа автомобиля было испытано по два масштаба 1:43 и 1:18. На основе указанных экспериментов определена формула для моделирования начальной скорости припаркованных затопленных автомобилей, исходя из массы и размеров автомобиля, сил плавучести и сопротивления.

В работах [12, 13] на основе исследования [11] была применена численная модель для изучения влияния транспортных средств на распространение потоков паводковых вод по

городским поймам и, с другой стороны, для определения влияния потоков паводковых вод на устойчивость транспортных средств.

В [14] был получен критерий устойчивости, включающий различные уклоны грунта и углы ориентации автомобиля, для частично погруженных в воду автомобилей (Honda Accord и Audi Q7). Выведена и проверена формула, основанная на механике, с применением эмпирических данных, полученных на двух типах масштабных моделей транспортных средств.

Основное внимание в исследованиях [15, 16] уделяется описанию зарождающегося движения неподвижных автомобилей во время наводнения с использованием трехмерной численной модели для оценки вклада сил сопротивления и подъемной силы. Также были определены рекомендуемые критерии безопасности для легковых автомобилей и автомобилей экстренных служб.

В [17] разработан коэффициент устойчивости для автомобилей, подверженных затоплению. Эффекты трения и плавучести были проанализированы путем проведения экспериментов с 12 различными физическими моделями автомобилей в трех масштабах (1:14, 1:18 и 1:24). Результаты позволили определить стабильную область в части глубины и скорости потока для припаркованных автомобилей в паводковых водах.

Изучение начального плавучего состояния частично погруженных автомобилей с учетом скорости потока и глубины воды в работе [18], а также различных ориентаций автомобиля относительно паводковой воды позволило разработать зависимость между глубиной стоячей воды и скоростью движения транспортных средств.

Обзор научных экспериментов выявил значительный объем работ, связанных с влиянием затоплений различного генезиса на транспорт и транспортную инфраструктуру. Однако данные исследования, как правило, связаны с конкретными событиями и обстоятельствами

или географическими районами с ограниченными возможностями обобщения.

Экспериментальные исследования в данной научной области связаны больше с изучением устойчивости неподвижных (припаркованных) легковых автомобилей при различных глубинах затопления и скорости водного потока. А также используется подробное трехмерное моделирование движения паводковых вод вокруг транспортных средств и оцениваются силы, включая гидродинамическое сопротивление, действующее на транспортное средство. Подробные модели позволяют лучше изучить гидродинамические силы, однако ни одно исследование не включало изучение влияния гидродинамического давления на транспортно-технологические машины в движении.

Актуальность исследования влияния продольного и поперечного гидродинамического давления на движение транспортно-технологической машины (ТТМ) вброд обусловлена необходимостью обеспечения безопасности и эффективности перемещения техники через водные преграды. В условиях глобального изменения климата и увеличения частоты экстремальных гидрологических явлений, таких как наводнения, паводки и половодья, возрастает потребность в повышении мобильности и функциональности ТТМ, способных самостоятельно преодолевать водные препятствия при аварийно-спасательных работах в зонах затопления [19, 20]. Изучение гидродинамического давления позволит определить, как водная преграда влияет на тягово-сцепные свойства машин, а также оценить риски, связанные с возможной потерей проходимости и устойчивости.

В условиях стихийных бедствий, таких как наводнения, ТТМ играют критически важную роль в ликвидации их последствий и обеспечении безопасности населения. Эти машины, включая бульдозеры, экскаваторы, погрузчики и амфибийные транспортные средства, должны быть способны эффективно работать в условиях затопленных территорий, выполняя широкий спектр задач: расчистка путей для эвакуации населения и доставки гуманитарной помощи, удаление завалов, снос разрушенных конструкций, восстановление проезжих дорог, добыча и перемещение грунта для создания дамб и перемычек, предотвращающих распространение воды в неповрежденные районы, строительство временных

водоотводных каналов, укрепления береговых линий и прочее.

В методических рекомендациях по созданию и применению нештатных аварийно-спасательных формирований (НАСФ) приведен состав применяемой техники, из которого можно выделить пять основных видов машин, а именно: бульдозеры, экскаваторы, погрузчики, автокраны и грузовые автомобили [20].

Анализ продаж дорожно-строительных машин (ДСМ) в период с 2013 по 2023 г. позволил определить их виды, наиболее востребованные отраслью. При этом по данным Ассоциации европейского бизнеса (рисунок 1) количество проданных в РФ экскаваторов-погрузчиков достигло 32 340 ед., что составляет 25% от всех проданных ДСМ за указанный период¹.

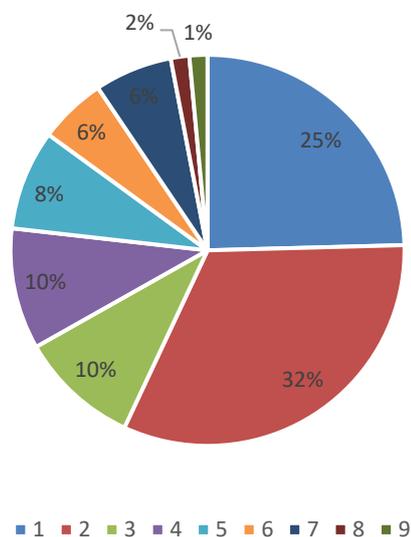


Рисунок 1 – Доли проданных в России ДСМ в период с 2013 по 2023 г.:

- 1 – экскаваторы-погрузчики;
 2 – гусеничные экскаваторы;
 3 – погрузчики с бортовым поворотом;
 4 – колесные погрузчики; 5 – гусеничные тракторы;
 6 – колесные экскаваторы;
 7 – самоходные грейдеры; 8 – сочлененные самосвалы;
 9 – самосвалы с жесткой рамой
 Источник: составлено автором.

Figure 1 – Shares of road construction machines sold in Russia in the period from 2013 to 2023:

- 1 – backhoe loaders; 2 – crawler excavators;
 3 – skid steer loaders; 4 – wheel loaders;
 5 – crawler tractors;
 6 – wheel excavators; 7 – self-propelled graders;
 8 – articulated dump trucks; 9 – rigid frame dump trucks
 Source: compiled by the author.

¹ Пресс-релизы Ассоциации европейского бизнеса по продажам новой строительной техники в период с 2013 по 2023 г.: [aebrus.ru]. 2016. URL: https://aebrus.ru/ru/media/press-releases/?SECTION_ID=1342 (дата обращения: 15.07.2024).

Учитывая такую динамику насыщения парков ДСМ экскаваторами-погрузчиками, можно предполагать, что они будут оставаться одним из основных видов техники в составе НАСФ.

Таким образом, данное исследование направлено на определение критических значений параметров водной преграды, которые обеспечивают эффективное и безопасное преодоление водных препятствий полноприводным экскаватором-погрузчиком с равновеликими колесами, с учетом влияния гидродинамического давления на его движение.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта для создания математической модели движения ТТМ через водную преграду вброд предлагается выбрать полноприводный экскаватор-погрузчик с равновеликими колесами.

В основу построения расчетных схем движения экскаватора-погрузчика по дну водной преграды положена модель его прямолинейного движения по недеформируемому (слабodeформируемому) основанию – заиленной твердой опорной поверхности. При этом

учитываются выталкивающее воздействие водной среды, поперечное и продольное гидродинамические сопротивления (рисунок 2).

Условные обозначения, принятые на рисунке 2: \mathcal{L}_6 – геометрический центр продольной (боковой) проекции, погруженной в воду части автомобиля; \mathcal{L}_T , \mathcal{L}_B – центры тяжести и водоизмещения соответственно; h_{6p} – глубина водной преграды (брода), м; L – база автомобиля, м; $l_{\text{цт}}$ – расстояние от вертикальной плоскости задней оси автомобиля до его центра тяжести и центра водоизмещения, м; $h_{\text{от}}$ – высота транспортного положения отвала, м; B_k – ширина колеи экскаватора-погрузчика, м; $q_{\text{лоб}}$ – распределенная сила лобового сопротивления, Н/м; P_T – сила тяги, Н; N – нормальная реакция на осях, Н; M_k – крутящий момент, подводимый к колесу, Н·м; P_f – сила сопротивления качению колеса, Н; P_v – выталкивающая сила воды, Н; $P_{\text{бок}}$ – сила бокового давления водного потока на борт автомобиля, Н; $P_{\text{лоб}}$ – сила лобового гидродинамического сопротивления, Н; S – сила сопротивления боковому скольжению, Н, $q_{\text{лоб}}$, $q_{\text{бок}}$ – лобовая и боковая распределенные силы гидродинамического давления, Н/м.

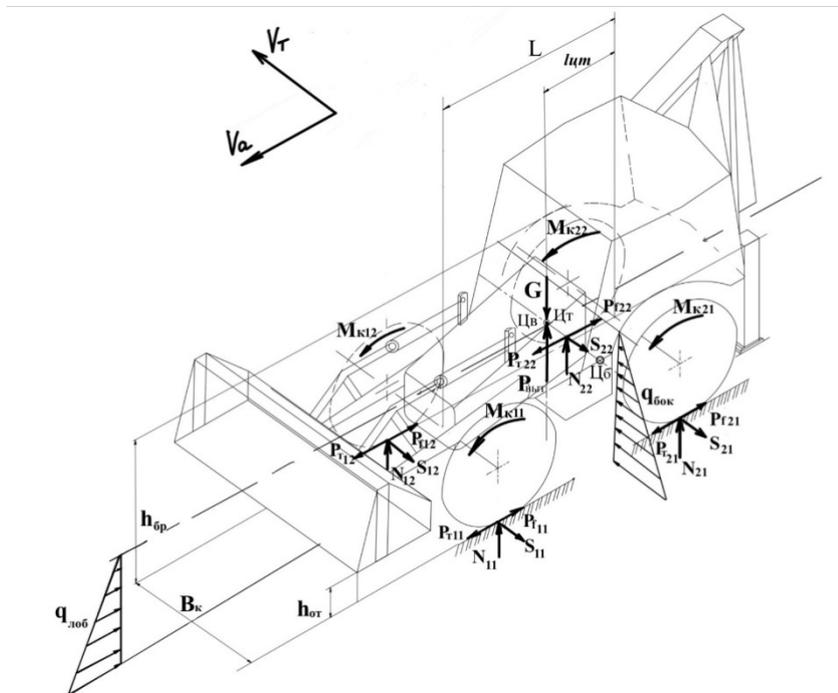


Рисунок 2 – Пространственная расчетная схема для моделирования движения экскаватора-погрузчика вброд по слабodeформируемому основанию
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Spatial design scheme for modelling backhoe-loader wading through a weakly deformable base
Source: compiled by the author.

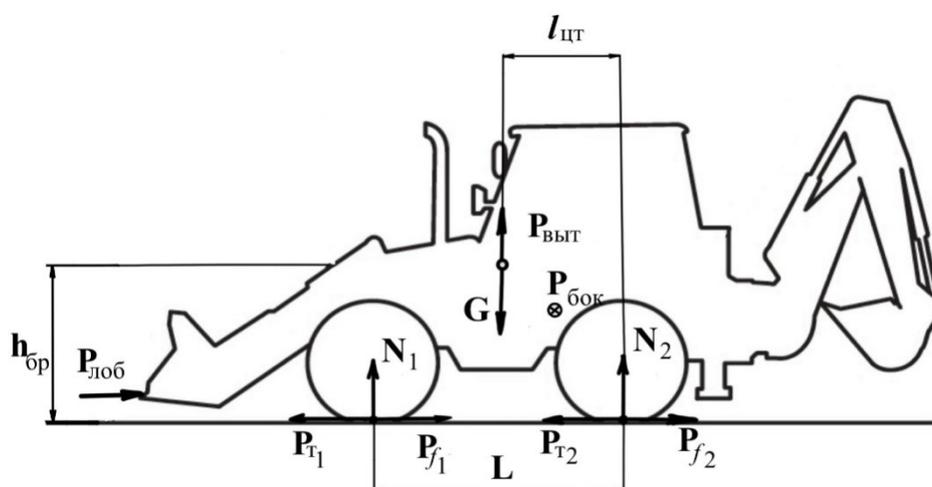


Рисунок 3 – Плоскостная расчетная схема движения экскаватора-погрузчика вброд
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Flat design diagram of backhoe-loader wading movement
Source: compiled by the author.

Распределённую силу лобового и бокового гидродинамических сопротивлений $q_{\text{лоб}}$, $q_{\text{бок}}$ для упрощения расчетов приведем к сосредоточенным силам лобового и бокового сопротивлений $P_{\text{лоб}}$, $P_{\text{бок}}$:

$$P_{\text{лоб}} = q_{\text{лобmax}} \cdot h_{\text{бp}}, \quad (1)$$

$$P_{\text{бок}} = q_{\text{бокmax}} \cdot h_{\text{бp}}, \quad (2)$$

которые приложены на расстоянии 1/3 глубины затопления от донной опорной поверхности, где $q=q_{\text{max}}$.

Сила бокового давления водного потока действует на левый борт машины.

Распределение нормальных реакций по осям экскаватора-погрузчика определялось по плоскостной расчетной схеме рисунка 3.

В соответствии с расчетной схемой зависимости для определения нормальных реакций на осях имеют вид:

$$N_1 = \frac{G \cdot l_{\text{цт}} - P_{\text{выт}} \cdot l_{\text{цт}} - P_{\text{лоб}} \cdot \frac{h_{\text{бp}}}{3}}{L}, \quad (3)$$

$$N_2 = \frac{G \cdot (L - l_{\text{цт}}) - P_{\text{выт}} \cdot (L - l_{\text{цт}}) + P_{\text{лоб}} \cdot \frac{h_{\text{бp}}}{3}}{L}, \quad (4)$$

где N_1 , N_2 – суммарные нормальные реакции на колесах соответственно первой и второй осей, Н.

Распределение нормальных реакций по бортам экскаватора-погрузчика определялось по плоскостным расчетным схемам рисунков 4 и 5.

Нагрузки на переднюю и заднюю оси машины G_1 и G_2 численно равны N_1 и N_2 .

В соответствии с расчетными схемами рисунков 4 и 5 нормальные реакции на колесах передней оси для каждого борта определяются выражениями:

$$N_{11} = \frac{G_1 \cdot \frac{B}{2} + P_{\text{бок}} \cdot \frac{h_{\text{бp}}}{3}}{B}, \quad (5)$$

$$N_{12} = \frac{G_1 \cdot \frac{B}{2} - P_{\text{бок}} \cdot \frac{h_{\text{бp}}}{3}}{B}. \quad (6)$$

Нормальные реакции на колесах задней оси для каждого борта:

$$N_{21} = \frac{G_2 \cdot \frac{B}{2} + P_{\text{бок}} \cdot \frac{h_{\text{бp}}}{3}}{B}, \quad (7)$$

$$N_{22} = \frac{G_2 \cdot \frac{B}{2} - P_{\text{бок}} \cdot \frac{h_{\text{бp}}}{3}}{B}. \quad (8)$$

Суммарная выталкивающая сила, действующая на смоченную поверхность машины, согласно закону Архимеда, равна весу объема вытесняемой машиной воды, т.е.

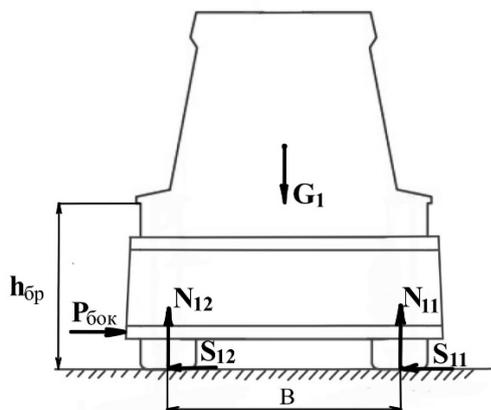


Рисунок 4 – Плоскостная расчетная схема движения экскаватора-погрузчика вброд (вид спереди)
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Flat design diagram of backhoe-loader wading movement (front view)
Source: compiled by the author.

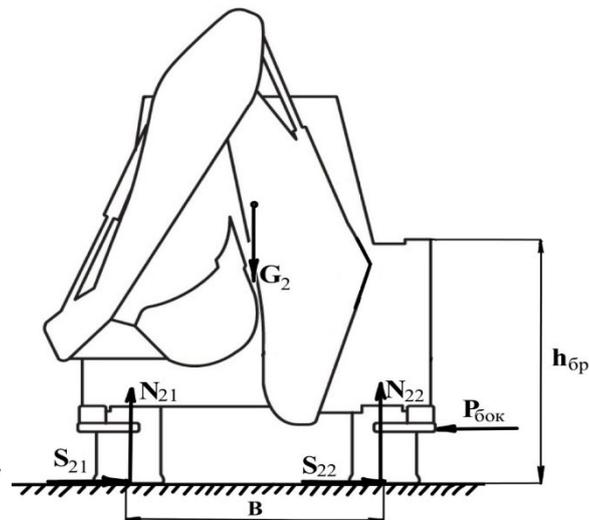


Рисунок 5 – Плоскостная расчетная схема движения экскаватора-погрузчика вброд (вид сзади)
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Flat design diagram of backhoe-loader wading movement (rear view)
Source: compiled by the author.

$$P_B = \rho_B \cdot V_{\Pi} \cdot g, \quad (9)$$

где ρ_B – плотность воды, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, 9,8 м/с².

Внешняя поверхность корпуса экскаватора-погрузчика представляет собой сложную поверхность, изменяющуюся по всем трем измерениям (длине, высоте и ширине). Для ясного и точного представления об обводах экскаватора-погрузчика была создана его 3D-модель в масштабе 1:100 на основе прототипа модели JCB 4CX полной массы 8,66 т и разработана расчетная схема сечения тела машины тремя плоскостями. За основные плоскости проекций сечения приняты три взаимно-перпендикулярные плоскости (рисунок 6)²:

- диаметральная (продольная);
- модель-шпангоута (поперечная);
- плоскость грузовой ватерлинии (горизонтальная).

Определение подводного объема экскаватора-погрузчика проводилось на различных глубинах погружения методом имитационного моделирования с помощью перемещения плоскостей в позиции, соответствующие каждой из пяти заданных контрольных глубин погружения. Значения подводного объема и выталкивающей силы для контрольных параметров глубины затопления приведены в таблице 1.

Сила поперечного (лобового) гидродинамического сопротивления определялась по формуле³

$$P_{\text{лоб}} = 0,5 \cdot K_L \cdot \rho_B \cdot F_L \cdot V_a^2, \quad (10)$$

где K_L – коэффициент лобового гидродинамического сопротивления;

F_L – площадь поперечной (лобовой) проекции погруженной в воду части машины, м²;

V_a – скорость движения экскаватора-погрузчика, м/с.

² Редькин М.Г. Плавающие колесные и гусеничные машины. М.: Воениздат, 1966. 200 с.

³ Степанов А.П. Конструирование и расчет плавающих машин. М.: Машиностроение, 1983. 197 с., ил.

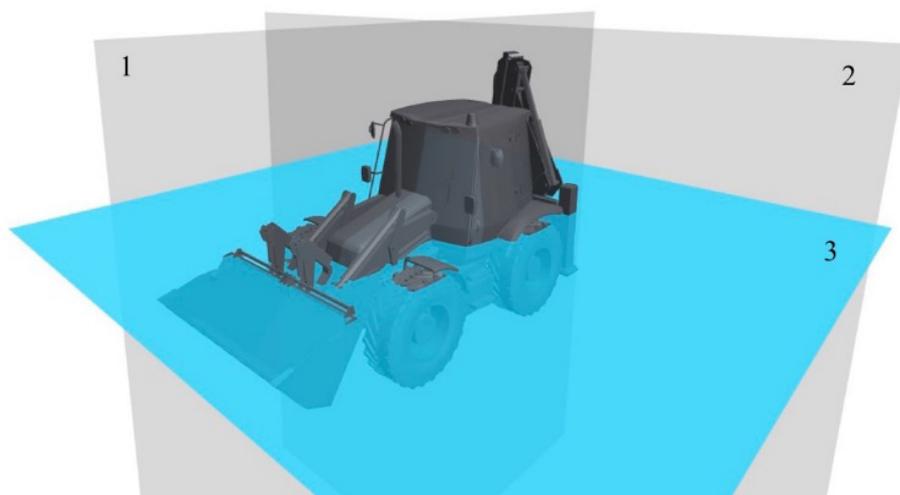


Рисунок 6 – Основные плоскости проекций расчетной схемы
 Источник: составлено автором.

Figure 6 – Main projection planes of the design scheme
 Source: compiled by the author.

Результаты определение подводного объема экскаватора-погрузчика методом имитационного моделирования
 Источник: составлено автором.

Table 1
 Results of determining the underwater volume of the backhoe- loader by simulation modelling method
 Source: compiled by the author.

Уровень затопления, м	0,55	0,645	1,2	1,5	1,8
Изображение					
Объем затопленной части машины, м³	1,82	3,06	8,50	10,50	11,84
Выталкивающая сила, Р _в , Н	17800,3	29928,0	83133,4	102596,4	115819,5

Для определения лобового гидродинамического сопротивления необходимо установить скорости движения экскаватора-погрузчика при преодолении водных преград. Поскольку водные преграды вброд рекомендовано преодолевать на низких скоростях, для расчетов

принято движение на 1-й и 2-й передачах. Для подбора значений скоростей были отобраны 11 моделей экскаваторов-погрузчиков с равновеликими колесами. Значения их скоростей на 1-й и 2-й передачах приведены в таблице 2.

Таблица 2
Скорости движения экскаваторов-погрузчиков на низших передачах
Источник: составлено автором.

Table 2
Movement speeds of backhoe-loaders in low gears
Source: compiled by the author.

Модель экскаватора-погрузчика	Скорость	
	1-я передача, м/с	2-я передача, м/с
Shamnon 388H NEW	1,38	2,78
ATLET	1,67	3,33
Liu Gong CLG 777 A-S	1,83	3
MST M544	1,7	2,8
JCB 4CX	1,38	2,58
Komatsu WV97S-5E0	1,8	3,05
XGMA XG 765H-4TX	1,67	3,33
CAT 434	1,67	2,78
New Holland B115B	1,72	3,22
Terex 970 Elite	1,72	3,22
Case 695 SV	1,67	2,28
Среднее значение	1,655	2,942

Все указанные модели экскаваторов-погрузчиков обладают 4-ступенчатой коробкой передач с близким диапазоном скоростей. Средние значения скоростей движения V_a , использованные для дальнейшего расчета, составили: для 1-й передачи $V_1=1,655$ м/с, для 2-й передачи $V_2=2,942$ м/с.

Коэффициент поперечного (лобового) гидродинамического сопротивления K_l для теоретического расчета был взят равным 1,0 на основании данных⁴, как среднее значение для двухосного автомобиля типа 4x4 грузоподъемностью 4,0 т при скорости движения 1,65 м/с для уровней брода 1, 1,5 и 2 м. Для скорости движения 2,9 м/с для уровней брода 1, 1,5 и 2 м и 1,2 среднее значение для такого автомобиля составляет 1,2.

Площадь поперечной (лобовой) проекции погруженной в воду части машины F_l определялась на основе 3D-модели экскаватора-погрузчика в программе Sharp3D. При заданных глубинах погружения она составила соответственно (таблица 3).

Сила давления течения водной преграды на продольную (боковую) поверхность экскаватора-погрузчика определялась по формуле

$$P_{бок} = 0,5 \cdot K_6 \cdot \rho_B \cdot F_6 \cdot V_B^2, \quad (11)$$

где K_6 – коэффициент продольного (бокового) гидродинамического сопротивления;

F_6 – площадь продольной (боковой) проекции погруженной в воду части автомобиля, м²;

V_B – скорость течения водного потока, м/с.

Площадь продольной (боковой) проекции погруженной в воду части автомобиля определялась на основе 3D-модели экскаватора-погрузчика в программе Sharp3D и составила для каждой из контрольных глубин (таблица 4).

Коэффициенты продольного (бокового) гидродинамического сопротивления для теоретического расчета были взяты как среднее значение для двухосного автомобиля при глубине водной преграды 1, 1,5 и 2 м для скоростей водного потока, представленных в таблице 5⁴.

Влияние бокового течения на движение машины требует учета проекций теоретической скорости на оси, параллельную и перпендикулярную направлению потока, представленные на рисунке 7. Это обусловлено тем, что фактическая скорость движения машины в продольном направлении будет меньше теоретической, особенно при соизмеримости скорости потока и теоретической скорости машины.

⁴ Добромиров В.Н. Автомобили двойного назначения. Основы теории специальных свойств. М.: Изд. ООО «МП Глобал-Концепт», 2000. 225 с.

Таблица 3
Площадь поперечной (лобовой) проекции погруженной в воду части машины для пяти заданных глубин водной преграды
 Источник: составлено автором.

Table 3
Area of the transverse (frontal) projection of the submerged part of the machine for five given water depths
 Source: compiled by the author.

Уровень затопления, м	0,55	0,645	1,2	1,5	1,8
$F_{л}, м^2$	0,81	0,96	2,87	3,18	4,83

Таблица 4
Площадь продольной (боковой) проекции погруженной в воду части автомобиля для пяти заданных глубин водной преграды
 Источник: составлено автором.

Table 4
Area of the longitudinal (lateral) projection of the machine part submerged in water for five given depths of the water obstacle
 Source: compiled by the author.

Уровень затопления, м	0,55	0,645	1,2	1,5	1,8
$F_{б}, м^2$	1,65	1,89	4,83	7,24	7,88

Таблица 5
Коэффициенты продольного (бокового) гидродинамического сопротивления для различных скоростей водного потока
 Источник: составлено автором.

Table 5
Longitudinal (lateral) hydrodynamic drag coefficients for different water flow velocities
 Source: compiled by the author.

Скорость водного потока, м/с	0,5	1	1,5	2	2,5
Коэффициент продольного (бокового) гидродинамического сопротивления	1,6	1,56	1,54	1,6	1,73

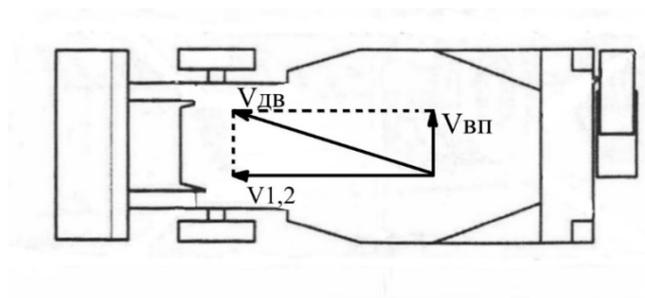


Рисунок 7 – Схема векторов скоростей движения экскаватора-погрузчика
 Источник: составлено автором.

Figure 7 – Scheme of vectors of the backhoe-loader motion speeds
 Source: compiled by the author.

Таблица 6
Значения абсолютной скорости движения с учетом пяти скоростей водного потока для движения на 1-й и 2-й передачах
Источник: составлено автором.

Table 6
Values of absolute motion speed taking into account five water flow velocities for driving in 1st and 2nd gears
Source: compiled by the author.

	$V_{вп1}, \text{ м/с}$	$V_{вп2}, \text{ м/с}$	$V_{вп3}, \text{ м/с}$	$V_{вп4}, \text{ м/с}$	$V_{вп5}, \text{ м/с}$
$V_1, \text{ м/с}$	1,729	1,934	2,234	2,596	2,998
$V_2, \text{ м/с}$	2,984	3,107	3,302	3,557	3,861

Таблица 7
Сила продольного (бокового) гидродинамического сопротивления для пяти контрольных параметров уровня водной преграды
Источник: составлено автором.

Table 7
Longitudinal (lateral) hydrodynamic drag force for five water obstacle level reference parameters
Source: compiled by the author.

	$P_{бок}, \text{ Н}$				
При $V_{вп1} = 0,5 \text{ м/с}$	330,11	377,02	965,03	1446,6	1574,4
При $V_{вп2} = 1 \text{ м/с}$	1287,4	1470,4	3763,6	5641,6	6140,3
При $V_{вп3} = 1,5 \text{ м/с}$	2859,6	3266	8359,6	12531	13638
При $V_{вп4} = 2 \text{ м/с}$	5281,8	6032,4	15441	23145	25191
При $V_{вп5} = 2,5 \text{ м/с}$	8923,3	10191	26086	39102	42559

Таблица 8
Сила продольного (бокового) гидродинамического сопротивления для пяти контрольных параметров уровня водной преграды для движения на 1-й и 2-й передачах
Источник: составлено автором.

Table 8
Longitudinal (lateral) hydrodynamic drag force for five water obstacle level reference parameters for driving in 1st and 2nd gears
Source: compiled by the author.

	$P_{лоб}, \text{ Н}$				
$V_1, \text{ м/с}$	1447,630241	1718,1651	5141,953949	5690,190154	8653,5
$V_2, \text{ м/с}$	5031,837005	5972,192682	17872,9854	19778,60684	30079

Если вектор относительных скоростей \vec{V}_1 и \vec{V}_2 экскаватора-погрузчика на 1-й и 2-й передачах соответственно, $\vec{V}_{вп}$ вектор переносной скорости водного потока, то абсолютная скорость $\vec{V}_{дв}$:

$$\vec{V}_{дв} = \vec{V}_{1,2} + \vec{V}_{вп}$$

Тогда модуль абсолютной скорости движения машины в водном потоке определяется по зависимости

$$V_{дв} = \sqrt{V_{1,2}^2 + V_{вп}^2}$$

Значения абсолютной скорости движения, полученные с учетом такой корректировки, приведены в таблице 6.

В соответствии с контрольными параметрами скорости потока была рассчитана сила бокового гидродинамического сопротивления для пяти контрольных параметров уровня водной преграды (таблица 7).

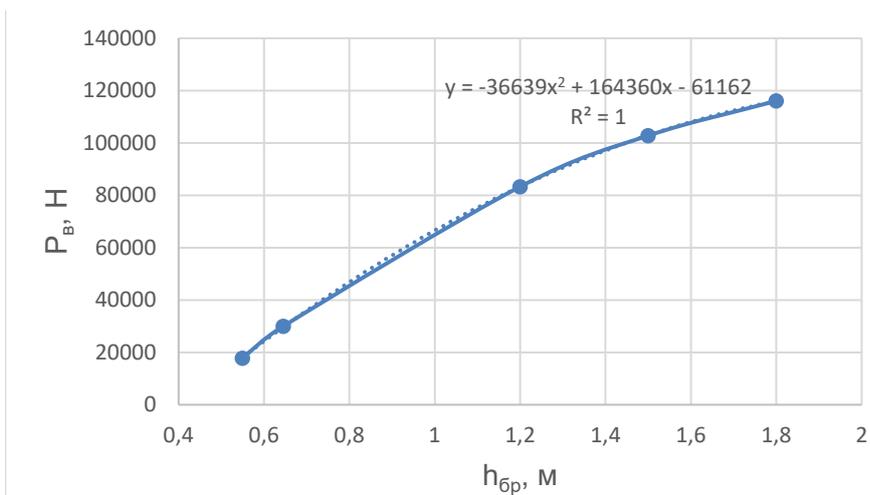


Рисунок 8 – Зависимость выталкивающей силы от уровня затопления машины
Источник: составлено автором.

Figure 8 – Dependence of the ejection force on the machine submerging level
Source: compiled by the author.

Поперечное (лобовое) гидродинамическое сопротивление при указанных значениях течения водного потока следующее (таблица 8).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Графическая и аналитическая зависимости выталкивающей силы воды от уровня затопления машины представлены на рисунке 8.

Полагаясь на достаточную корректность использования для расчетов принятых значений была определена сила поперечного (лобового) гидродинамического сопротивления для пяти заданных глубин брода для движения на 1-й и 2-й передачах со скоростями 1,65 и 2,9 м/с соответственно. Зависимость значения этой силы от глубины брода представлена на рисунке 9.

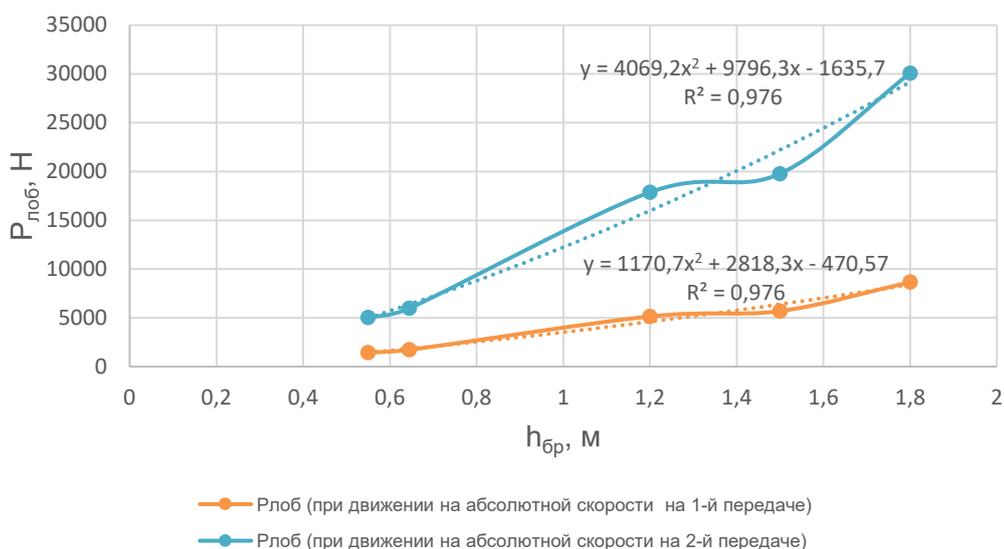


Рисунок 9 – Зависимость поперечного (лобового) гидродинамического сопротивления от уровня затопления машины
Источник: составлено автором.

Figure 9 – Dependence of transverse (frontal) hydrodynamic resistance on the machine submerging level
Source: compiled by the author.

Математическая обработка графиков, образованных расчетными значениями, показала возможность их аппроксимации для поперченного (лобового) гидродинамического сопротивления полиномиальными зависимостями второй степени с коэффициентом детерминации 0,976.

На основе рассчитанного лобового сопротивления и выталкивающей силы по зависимостям (4) и (5) были определены нормальные реакции на передней и задней осях и построена их графическая зависимость от глубины затопления машины при движении на 1-й и 2-й передачах (рисунок 10).

Из графика на рисунке 10 видно, что при глубине водного потока 1 м машина теряет управляемость в связи с отрывом передних колес от опорной поверхности, при глубине более 1,2 м нормальные реакции колес на передней и задней осях становятся отрицательными, что говорит о том, что машина под действием выталкивающей силы и лобового гидродинамического сопротивления теряет сцепление с донной опорной поверхностью. Начинается этот процесс при движении на 1-й и 2-й передачах с передней оси на глубине 1,2 м, что может привести к потере управляемости и подвижности экскаватора-погрузчика даже в стоячей воде.

В соответствии с контрольными параметрами скорости потока (см. таблицу 3) была рассчитана сила продольного (бокового) гидродинамического сопротивления для пяти контрольных уровней брода. Графическая зависимость этой силы от глубины затопления машины представлена на рисунке 11.

Математическая обработка графиков, образованных расчетными значениями, показала возможность их аппроксимации линейными зависимостями с коэффициентом детерминации 0,9846.

Резкое увеличение гидродинамического давления на глубине 1,3 м вызвано появлением дополнительных погруженных в воду боковых поверхностей (переднего отвала и ковша), что скачкообразно увеличивает площадь продольной плоскости, на которую оказывает давление водный поток.

По полученным данным была построена зависимость распределения нормальных реакций по колесам передней и задней осей для левого и правого бортов от силы бокового давления с учетом одновременного воздействия силы лобового сопротивления на двух скоростях движения для пяти скоростей водного потока $V_{вп.}$ (рисунок 12).

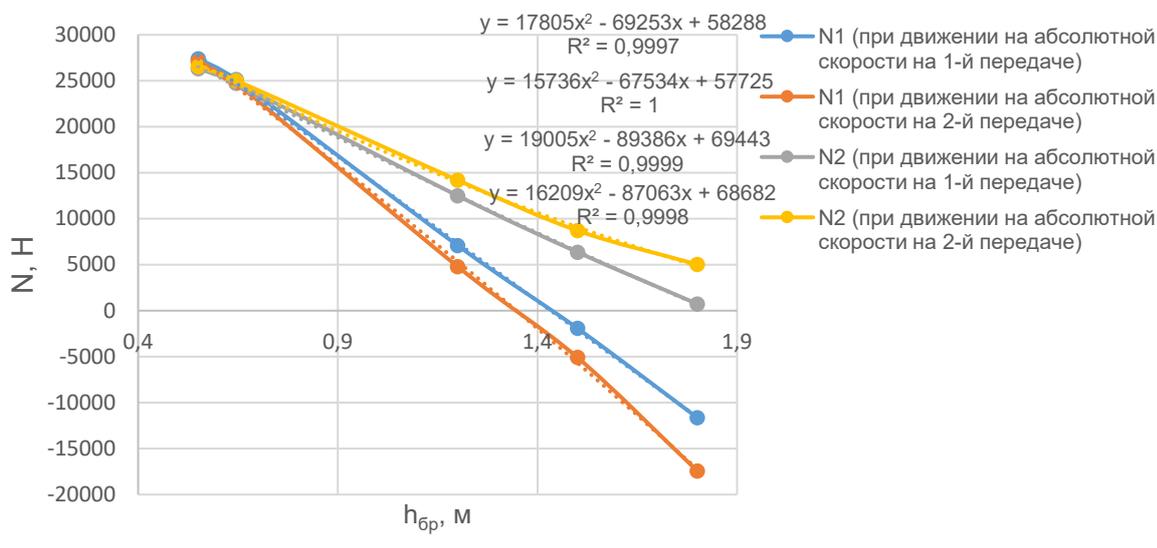


Рисунок 10 – Зависимость нормальных реакций на передней и задней осях экскаватора-погрузчика от глубины погружения при движении на 1-й и 2-й передачах при наличии бокового течения водного потока
Источник: составлено автором.

Figure 10 – Dependence of normal reactions on the front and rear axles of the backhoe-loader on the depth of immersion moving in 1st and 2nd gears in the presence of lateral flow of the water stream
Source: compiled by the author.

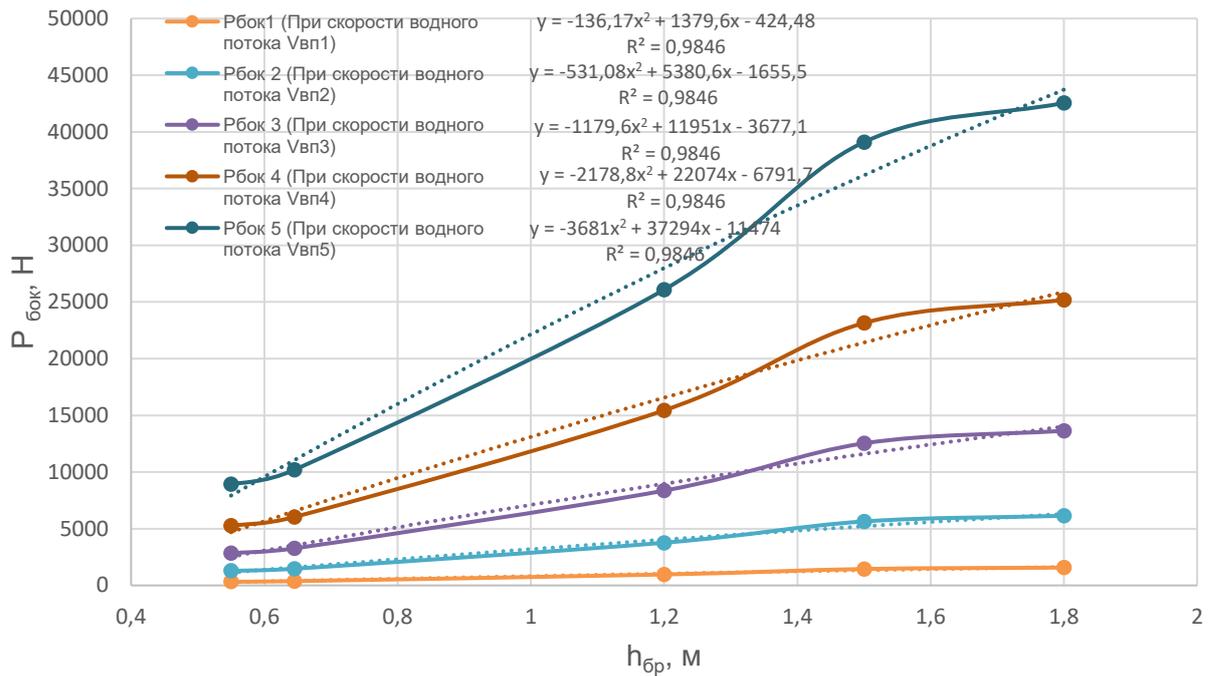


Рисунок 11 – Зависимость продольного (бокового) гидродинамического давления от уровня затопления машины
Источник: составлено автором.

Figure 11 – Dependence of longitudinal (lateral) hydrodynamic pressure on the machine submerging level
Source: compiled by the author.

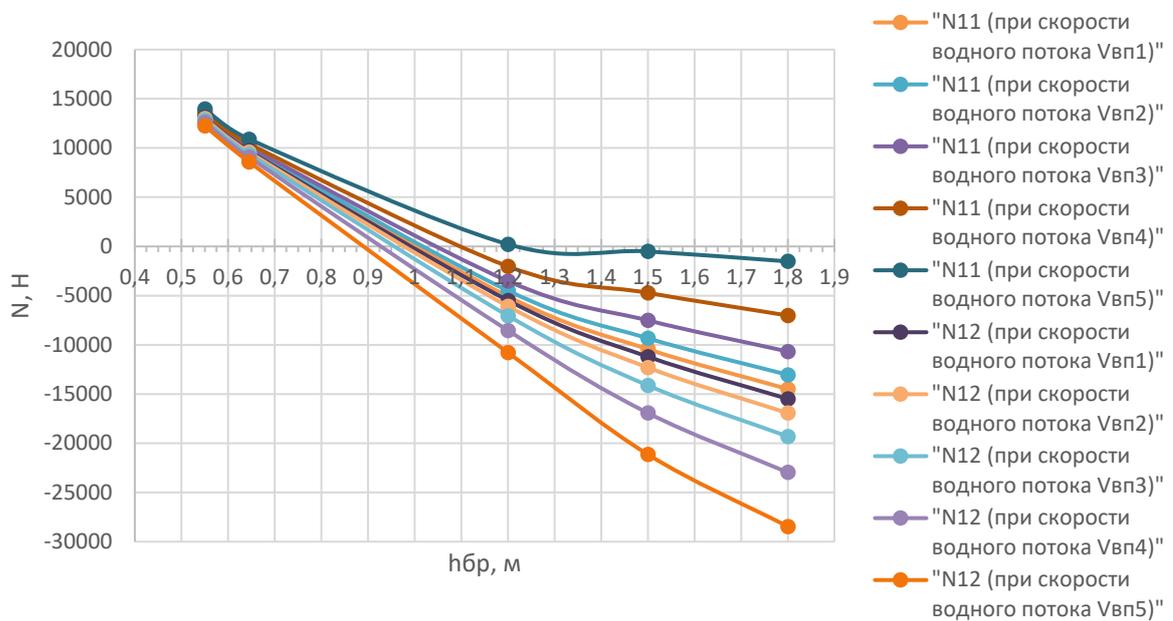


Рисунок 12 – Зависимость распределения нормальных реакций передней оси для левого и правого бортов от глубины погружения при движении экскаватора-погрузчика на 1-й передаче
Источник: составлено автором.

Figure 12 – Dependence of the distribution of normal front axle reactions for the left and right sides on the depth of immersion when the backhoe-loader is moving in 1st gear
Source: compiled by the author.

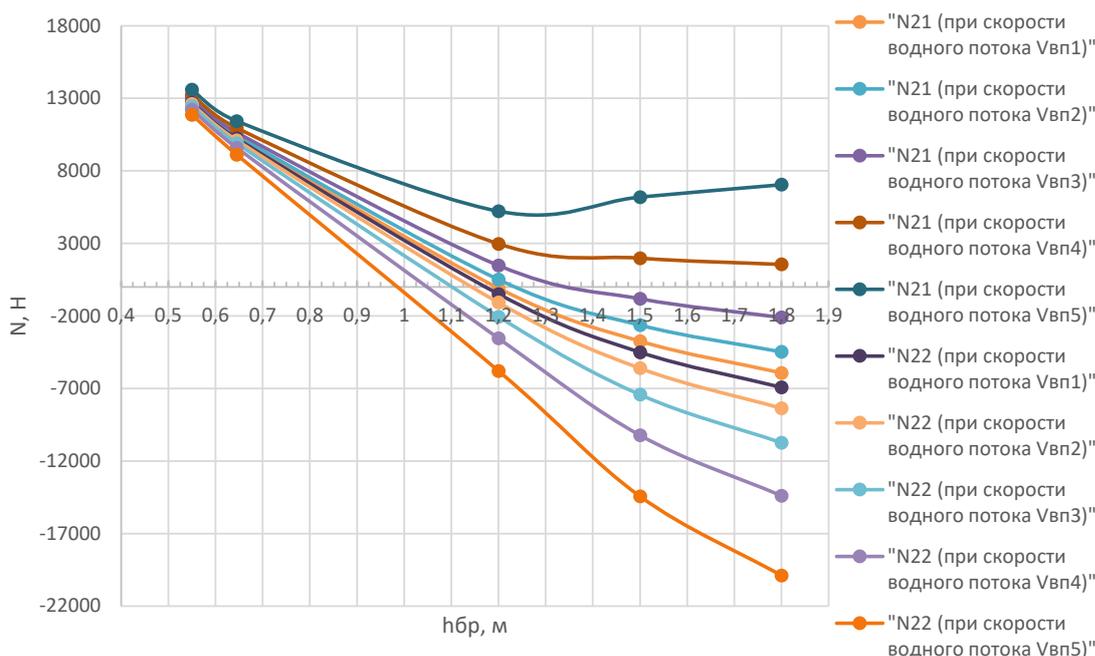


Рисунок 13 – Зависимость распределения нормальных реакций задней оси для левого и правого бортов от глубины погружения при движении экскаватора-погрузчика на 1-й передаче
 Источник: составлено автором.

Figure 13 – Dependence of distribution of normal rear axle reactions for the left and right sides on the depth of immersion when the backhoe-loader is moving in 1st gear
 Source: compiled by the author.

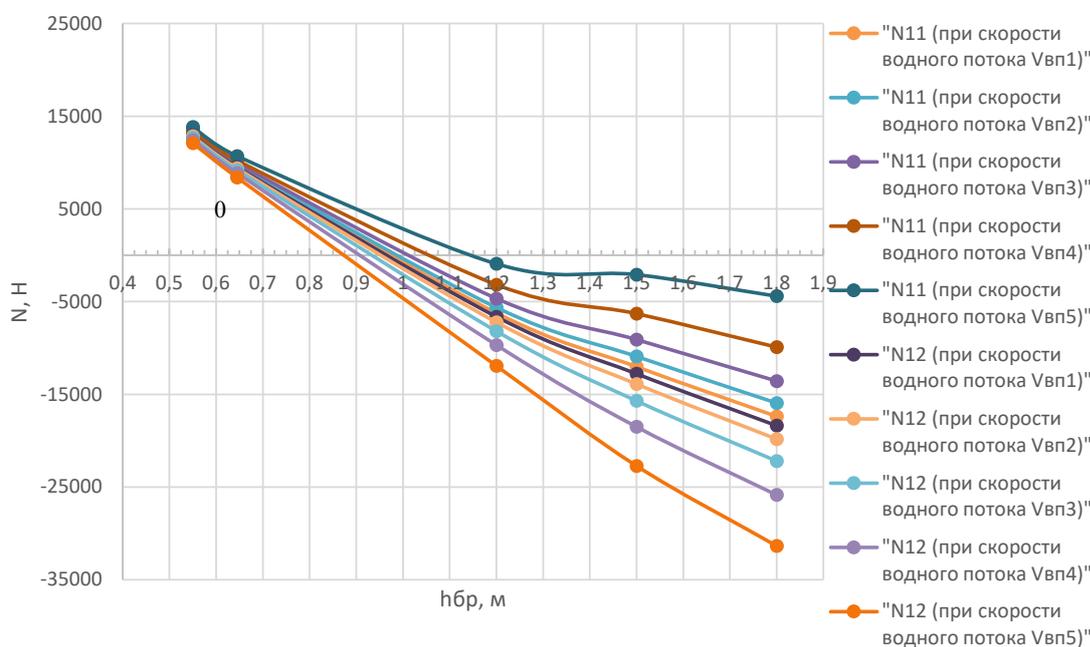


Рисунок 14 – Зависимость распределения нормальных реакций передней оси для левого и правого бортов от глубины погружения при движении экскаватора-погрузчика на 2-й передаче
 Источник: составлено автором.

Figure 14 – Dependence of the distribution of normal front axle reactions for the left and right sides on the depth of immersion when the backhoe-loader is moving in 2nd gear
 Source: compiled by the author.

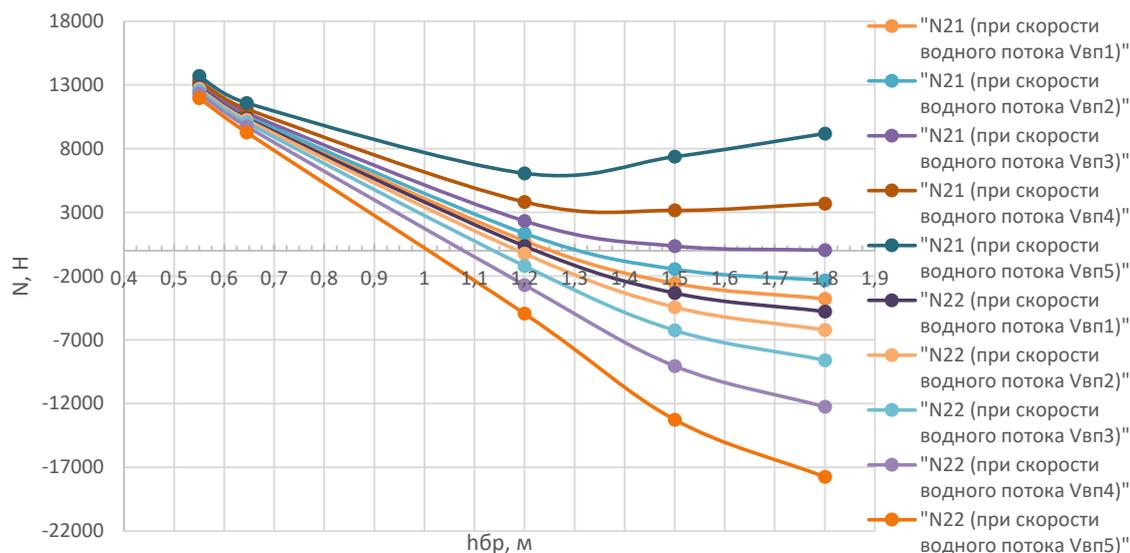


Рисунок 15 – Зависимость распределения нормальных реакций задней оси для левого и правого бортов от глубины погружения при движении экскаватора-погрузчика на 2-й передаче
Источник: составлено автором.

Figure 15 – Dependence of distribution of normal rear axle reactions for the left and right sides on the depth of immersion when the backhoe-loader is moving in 2nd gear
Source: compiled by the author.

Таблица 9

Глубины потери сцепления колес передней и задней осей экскаватора-погрузчика при движении на 1-й передаче
Источник: составлено автором.

Table 9

Depths of wheel adhesion loss of the front and rear axles of backhoe-loader when driving in 1st gear
Source: compiled by the author.

Номер оси	Скорость водного потока, м/с				
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
	Глубина погружения, м				
1-я ось, правое колесо, N11	1	1,025	1,075	1,1	1,2
1-я ось, левое колесо, N12	0,985	0,975	0,95	0,925	0,885
2-я ось, правое колесо, N21	1,2	1,2375	1,3375	-	-
2-я ось, левое колесо, N22	1,175	1,1375	1,1	1,05	0,97625

Из рисунков 12,13,14 и 15 видно, что при преодолении экскаватором-погрузчиком водной преграды глубиной от 0,55 до 0,645 м нагрузка между левым и правым бортами распределяется практически равномерно при движении на 1-й и 2-й передачах и всех скоростях водного потока. Это объясняется незначительным водоизмещением ходовой части, погруженной в воду на глубину примерно дорожного просвета и малыми площадями ее поперечного и продольного сечений. При увеличении глубины водного потока до 1,2 м возникает резкое перераспределение нагруз-

ки между бортами автомобиля, при этом большая нагрузка приходится на правый борт, что в свою очередь может приводить к сносу экскаватора-погрузчика от прямолинейного движения и даже к опрокидыванию.

В таблицах 9 и 10 приведены значения глубин для пяти скоростей течения водного потока и двух скоростей движения экскаватора-погрузчика, при которых на колесах передней и задней осей нормальные реакция становятся нулевыми. Обозначение (-) показывает, что нормальная реакция не достигает нулевого значения.

Таблица 10
Глубины потери сцепления колес передней и задней осей экскаватора-погрузчика при движении на 2-й передаче
Источник: составлено автором.

Table 10
Depths of wheel adhesion loss of the front and rear axles of backhoe-loader when driving in 2nd gear
Source: compiled by the author.

Номер оси	Скорость водного потока, м/с				
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
	Глубина погружения, м				
1-я ось, правое колесо, N11	0,975	0,975	1,025	1,05	1,15
1-я ось, левое колесо, N12	0,9625	0,95	0,925	0,9	0,875
2-я ось, правое колесо, N21	1,25	1,3	1,65	-	-
2-я ось, левое колесо, N22	1,225	1,185	1,1375	1,075	1,025

Максимальная глубина, при которой происходит потеря управляемости (отрыв левого колеса передней оси) составляет 0,985 м при движении экскаватора-погрузчика на 1-й передаче при скорости водного потока равной 0,5 м/с, минимальная глубина – 0,885 м при скорости водного потока 2,5 м/с.

Опрокидывание машины возникает на глубине 1,05 м для скорости водного потока 2 м/с и 0,976 м для скорости водного потока 2,5 м/с, поскольку происходит полный отрыв всех колес левого борта и переднего правого колеса, при этом нормальные реакции на заднем правом колесе остаются положительными.

Максимальная глубина, при которой происходит потеря управляемости (отрыв левого колеса передней оси), составляет 0,9625 м при движении экскаватора-погрузчика на 2-й передаче при скорости водного потока равной 0,5 м/с, минимальная глубина – 0,875 м при скорости водного потока 2,5 м/с.

Опрокидывание машины возникает на глубине 1,025 м для скорости водного потока 2,5 м/с, поскольку происходит полный отрыв всех колес левого борта и переднего правого колеса, при этом нормальные реакции на заднем правом колесе остаются положительными.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют оценить влияние поперечного (лобового) и продольного (бокового) гидродинамического давления на устойчивость прямолинейного движения экскаватора-погрузчика через водную преграду вброд и определить безопасные условия применения машины в зоне затопления в зависимости от глубины и скорости течения водной преграды.

Из полученных расчетных и графических данных следует, что движение экскаватора-погрузчика возможно при глубине водного потока до 1,2 м, поскольку при большей глубине машина теряет подвижность в связи с отрывом колес передней и задней осей от опорной поверхности под воздействием выталкивающей силы воды и сил лобового и бокового гидродинамического давления.

Для уточнения полученных расчетных данных необходимо провести экспериментальное исследование, например на масштабной физической модели, по уточнению коэффициентов обтекаемости экскаватора-погрузчика, оказывающих влияние на расчет поперечного и продольного гидродинамических сопротивлений. Уточненные результаты необходимы для создания корректной методики определения предельных параметров затопления экскаваторов-погрузчиков для обеспечения безопасного и эффективного выполнения работ в зонах наводнений, а также для последующего совершенствования их конструкции с позиции обеспечения работоспособности в водной среде при уровне погружения, превышающем определенный в настоящее время заводом-изготовителем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Dong B., Xia J., Li Q., & Zhou M. Risk assessment for people and vehicles in an extreme urban flood: Case study of the "7.20" flood event in Zhengzhou, China // International journal of disaster risk reduction. 2022. Т. 80. P. 103205. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103205>
- Zhang M., Wang J. Global flood disaster research graph analysis based on literature mining // Applied Sciences. 2022. Т. 12. №. 6. <https://doi.org/10.3390/app12063066>

3. Lazzarin T., Viero D.P., Molinari D., Ballio F., & Defina A. Flood damage functions based on a single physics-and data-based impact parameter that jointly accounts for water depth and velocity // *Journal of Hydrology*. 2022. T. 607. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127485>
4. Borowska-Stefańska M., Bartnik A., Dulebenets M. A., Kowalski M., Sahebgharani A., Tomalski P., & Wiśniewski S. Changes in intra-city transport accessibility accompanying the occurrence of an urban flood // *Transportation research part D: transport and environment*. 2024. T. 126. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.104040>
5. He H., Li R., Pei J., Bilodeau, J.P., & Huang G. Current overview of impact analysis and risk assessment of urban pluvial flood on road traffic // *Sustainable Cities and Society*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104993>
6. Gangwal U., Siders A.R., Horney J., Michael H.A., & Dong S. Critical facility accessibility and road criticality assessment considering flood-induced partial failure // *Sustainable and Resilient Infrastructure*. 2023. T. 8. №. sup1. P. 337-355. <https://doi.org/10.1080/23789689.2022.2149184>
7. Toathom T., Champrasert P. Vehicle Route Planning for Relief Item Distribution under Flood Uncertainty // *Applied Sciences*. 2024. T. 14. №. 11. P. 4482. <https://doi.org/10.3390/app14114482>
8. Bocanegra R.A., Francés F. Assessing the risk of vehicle instability due to flooding // *Journal of flood risk management*. 2021. T. 14. №. 4. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12738>
9. Hu X., Li J., Wang W., & Fang X. Experimental testing to determine stability thresholds for partially submerged vehicles at different flow orientations // *Journal of Hydrology*. 2023. T. 620. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129525>
10. Shu C., Xia J., Falconer R.A., & Lin, B. Incipient velocity for partially submerged vehicles in floodwaters // *Journal of hydraulic research*. 2011. T. 49. №. 6. P. 709-717. <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.616318>
11. Xia J., Teo F.Y., Lin B., & Falconer R.A. Formula of incipient velocity for flooded vehicles // *Natural Hazards*. 2011. T. 58. P. 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9639-x>
12. Teo F.Y., Xia J., Falconer R.A., & Lin B. Experimental studies on the interaction between vehicles and floodplain flows // *International journal of river basin management*. 2012. T. 10. №. 2. P. 149-160. <https://doi.org/10.1080/15715124.2012.674040>
13. Teo F.Y., Liew Y.S., Falconer R.A., & Lin, B. Estimation of flood hazard risk relating to vehicles // *IAHR World Congress, Chengdu (China)*. 2013.
14. Xia J., Falconer R.A., Xiao X., & Wang Y. Criterion of vehicle stability in floodwaters based on theoretical and experimental studies // *Natural hazards*. 2014. T. 70. P. 1619-1630. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0889-2>
15. Arrighi C., Alcèrrec-Huerta J. C., Oumeraci H., & Castelli F. Drag and lift contribution to the incipient motion of partly submerged flooded vehicles // *Journal of Fluids and Structures*. 2015. T. 57. P. 170-184. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2015.06.010>
16. Kramer M., Terheiden K., Wieprecht S. Safety criteria for the trafficability of inundated roads in urban floodings // *International journal of disaster risk reduction*. 2016. T. 17. P. 77-84. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2016.04.003>
17. Martinez-Gomariz E., Gomez M., Russo B., & Djordjević S. A new experiments-based methodology to define the stability threshold for any vehicle exposed to flooding // *Urban Water Journal*. 2017. T. 14. №. 9. P. 930-939. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2017.1301501>
18. Pregolato M., Ford A., Wilkinson S.M., & Dawson R.J. The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function // *Transportation research part D: transport and environment*. 2017. T. 55. P. 67-81. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.020>
19. Добромиров В.Н. Методика оценки проходимости автотранспортных средств при преодолении водных преград вброд // *Вестник гражданских инженеров*. 2012. №. 1. С. 188–191.
20. Магдина Е.Р., Добромиров В.Н. Проблемные вопросы применения дорожно-строительных машин в зонах затопления // *Русский инженер*. 2023. № 3(80). С. 40–43.

REFERENCES

1. Don, B., Xia J., Li Q., & Zhou M. Risk assessment for people and vehicles in an extreme urban flood: Case study of the “7.20” flood event in Zhengzhou, China. *International journal of disaster risk reduction*. 2022; T. 80: 103205. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103205>
2. Zhang M., Wang J. Global flood disaster research graph analysis based on literature mining. *Applied Sciences*. 2022; T. 12. №. 6. <https://doi.org/10.3390/app12063066>
3. Lazzarin T., Viero D. P., Molinari D., Ballio F., & Defina A. Flood damage functions based on a single physics-and data-based impact parameter that jointly accounts for water depth and velocity. *Journal of Hydrology*. 2022; T. 607. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127485>
4. Borowska-Stefańska M., Bartnik A., Dulebenets M. A., Kowalski M., Sahebgharani A., Tomalski P., & Wiśniewski S. Changes in intra-city transport accessibility accompanying the occurrence of an urban flood. *Transportation research part D: transport and environment*. 2024; T. 126. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.104040>
5. He H., Li R., Pei J., Bilodeau J. P., & Huang G. Current overview of impact analysis and risk assessment of urban pluvial flood on road traffic. *Sustainable Cities and Society*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104993>
6. Gangwal U., Siders A. R., Horney J., Michael H.A., & Dong S. Critical facility accessibility and road criticality assessment considering flood-induced partial failure. *Sustainable and Resilient Infrastructure*. 2023; T. 8. №. sup1: 337-355. <https://doi.org/10.1080/23789689.2022.2149184>

7. Toathom T., Champrasert P. Vehicle Route Planning for Relief Item Distribution under Flood Uncertainty. *Applied Sciences*. 2024; T. 14. №. 11: 4482. <https://doi.org/10.3390/app14114482>
8. Bocanegra R.A., Francés F. Assessing the risk of vehicle instability due to flooding. *Journal of flood risk management*. 2021. T. 14. №. 4. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12738>
9. Hu X., Li J., Wang W., & Fang X. Experimental testing to determine stability thresholds for partially submerged vehicles at different flow orientations. *Journal of Hydrology*. 2023; T. 620. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129525>
10. Shu C., Xia J., Falconer R.A., & Lin B. Incipient velocity for partially submerged vehicles in floodwaters. *Journal of hydraulic research*. 2011; T. 49. №. 6: 709-717. <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.616318>
11. Xia J., Teo F.Y., Lin B., & Falconer R.A. Formula of incipient velocity for flooded vehicles. *Natural Hazards*. 2011; T. 58: 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9639-x>
12. Teo F.Y., Xia J., Falconer R.A., & Lin B. Experimental studies on the interaction between vehicles and floodplain flows. *International journal of river basin management*. 2012; T. 10. №. 2: 149-160. <https://doi.org/10.1080/15715124.2012.674040>
13. Teo F.Y., Liew Y.S., Falconer R.A., & Lin B. Estimation of flood hazard risk relating to vehicles. *IAHR World Congress, Chengdu (China)*. 2013.
14. Xia J., Falconer R.A., Xiao X., & Wang Y. Criterion of vehicle stability in floodwaters based on theoretical and experimental studies. *Natural hazards*. 2014; T. 70: 1619-1630. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0889-2>
15. Arrighi C., Alcérreca-Huerta J. C., Oumeraci H., & Castelli F. Drag and lift contribution to the incipient motion of partly submerged flooded vehicles. *Journal of Fluids and Structures*. 2015; T. 57: 170-184. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2015.06.010>
16. Kramer M., Terheiden K., Wieprecht S. Safety criteria for the trafficability of inundated roads in urban floodings. *International journal of disaster risk reduction*. 2016; T. 17: 77-84. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2016.04.003>
17. Martinez-Gomariz E., Gomez M., Russo B., & Djordjević S. A new experiments-based methodology to define the stability threshold for any vehicle exposed to flooding. *Urban Water Journal*. 2017; T. 14. №. 9: 930-939. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2017.1301501>
18. Pregolato M., Ford A., Wilkinson S.M., & Dawson R.J. The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function. *Transportation research part D: transport and environment*. 2017; T. 55: 67-81. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.020>
19. Dobromirov V.N. Methodology of evaluating motor vehicles' cross-country capability at overcoming water obstacles fording. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2012; 1: 188-191. (in Russ.)
20. Magdina E.R., Dobromirov V.N. Problematic issues of the use of road construction machines in flood zones. *Russian Engineer*. 2023; 3(80). 3: 40-43. (in Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Магдина Елизавета Ростиславовна – ассистент кафедры судебных экспертиз, аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические машины» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ) (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9784-8379>; **Scopus Author ID:** 57219855981; **Researcher ID:** AAC-6375-2022; **SPIN-код:** 1603-6470, e-mail: elisluk97@mail.ru

INFORMATION ABOUT AUTHOR

Magdina Yelizaveta R. – Assistant of the Forensic Expertise Department, postgraduate student of the Department of Land Transport and Technological Machines, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2nd Krasnoarmeyskaya St., Saint Petersburg, Russia, 190005), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9784-8379>; **Scopus Author ID:** 57219855981; **Researcher ID:** AAC-6375-2022; **SPIN-code:** 1603-6470, e-mail: elisluk97@mail.ru

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

Научная статья
УДК 629.015
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-692-713>
EDN: FWBAXZ



ИСПЫТАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА ПОДАВЛЕНИЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ТОРМОЖЕНИИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

А.В. Климов^{1,2}

¹ООО «Инновационный центр КАМАЗ»,
г. Москва, Россия

²ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»,
г. Москва, Россия
klimmanen@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. При замедлении транспортного средства, в особенности на скользком покрытии, возможна потеря устойчивости движения системы электромеханического привода, сопровождающаяся возбуждением автоколебаний с высокими амплитудами. Зарождение автоколебаний возникает при росте скорости скольжения и снижением силы трения. При этом резко повышается динамическая нагруженность системы привода, что может привести к выходу её из строя. Вследствие этого разработка методов подавления автоколебательных явлений является актуальной задачей.

Цель исследования – проверка методами экспериментальных исследований эффективности работы алгоритма подавления автоколебаний в электромеханической системе привода колеса при торможении.

Материалы и методы. Исследование работоспособности и эффективности алгоритма выполнено с применением методов натуральных экспериментов при сопоставлении результатов заездов с последующим интенсивным торможением транспортного средства как с деактивированной, так и активированной системой подавления автоколебаний.

Результаты исследования. С помощью метода натуральных экспериментов установлена работоспособность и эффективность алгоритма подавления автоколебаний при выполнении замедления, который позволяет снизить величины максимальных амплитуд в 6 раз, усреднённых амплитуд в 3...3,5 раза, включая при этом изменения знака момента при интенсивных замедлениях транспортного средства.

Заключение. Алгоритм подавления автоколебаний можно рекомендовать для практической разработки систем управления замедлением транспортных средств.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автоколебания в электромеханическом приводе, подавление автоколебаний, интенсивное торможение транспортного средства, скольжение шины, антиблокировочная система, испытания

Статья поступила в редакцию 17.09.2024; одобрена после рецензирования 14.10.2024; принята к публикации 17.10.2024.

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: Климов А.В. Испытания эффективности алгоритма подавления автоколебаний при интенсивном торможении транспортного средства // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 5. С. 692-713. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-692-713>

© Климов А.В., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-692-713>

EDN: FWBAXZ

TESTING THE EFFECTIVENESS OF AN ALGORITHM FOR SUPPRESSING SELF-EXCITED VIBRATIONS DURING INTENSIVE BRAKING OF A VEHICLE

Alexander V. Klimov^{1,2}

¹ООО «KAMAZ Innovation Center»,
Moscow, Russia

²Moscow Polytechnic University,
Moscow, Russia

klimmanen@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. When the vehicle slows down, particularly on slippery surfaces, stability of the electromechanical drive system movement can be reduced, which is accompanied by high self-excited vibrations. These vibrations occur when the sliding speed increases and the friction force decreases. At the same time, the dynamic load on the drive system increases sharply, which can lead to its failure. Thus, the development of methods for suppressing self-excited vibrations is an urgent task.

The purpose of the study is to test the operability and effectiveness of the method for suppressing self-excited vibrations in the electromechanical wheel drive system during braking with the use of methods of field experiments. **Materials and methods.** The study of the efficiency and effectiveness of the algorithm was based on field experiments.

Results. Based on field experiment method, the efficiency and effectiveness of the algorithm for suppressing self-excited vibrations during deceleration has been determined, which allows for [HYPERLINK "https://context.reverso.net/перевод/английский-русский/sixfold+reduction+in"](https://context.reverso.net/перевод/английский-русский/sixfold+reduction+in) six-fold reduction in maximum amplitudes and 3-3,5-fold reduction in averaged amplitudes, while excluding changes in the moment sign during vehicle intense deceleration.

Conclusion. The algorithm of suppressing self-excited vibrations can be recommended for application in developing vehicle deceleration control systems.

KEYWORDS: self-excited vibrations, damping, intensive braking, impulse suppression of vibrations, sliding, testing

The article was submitted 17.09.2024; approved after reviewing 14.10.2024; accepted for publication 17.10.2024.

The author has read and approved the final manuscript.

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

For citation: Klimov A.V. Testing the effectiveness of an algorithm for suppressing self-excited vibrations during intensive braking of a vehicle. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2024; 21 (5): 692-713. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-692-713>

© Klimov A.V., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Как показывает анализ, проведённый в [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8], автоколебания в зоне взаимодействия эластичного колеса с опорным основанием при торможении возбуждаются в конечной фазе процесса замедления и могут иметь значительную интенсивность, что негативно сказывается на качестве процесса замедления и управляемости машины^{1,2,3}. Автоколебания сопровождаются увеличением в несколько раз амплитуд колебаний кинематических и силовых параметров процессов, протекающих в нелинейных системах, увеличивают их динамическую нагруженность, приводя к выходу из строя. В данном силовом взаимодействии могут возникать автоколебательные процессы, что сопровождается снижением или потерей сцепления с дорогой, позволяющей судить о снижении энергоэффективности или безопасности [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]. В [19, 20] показано, что автоколебательные процессы при их возбуждении можно эффективно подавлять, выводя из системы провоцирующую их энергию. Применительно для индивидуального электромеханического привода колёс предложено использовать демпфирующий крутящий момент пропорциональной угловой скорости колёс $M_d = -K_w \omega_k f_{relay}$, (здесь K_w – коэффициент вязкого трения или коэффициент демпфирования).

Для активного подавления автоколебаний коэффициент демпфирования должен быть $K_w \geq 2\sqrt{J_k C_m}$ [20], где – момент инерции колеса и механического привода, а угловую жесткость C_{mi} для колеса можно оценить в процессе управления как отношение приращения реа-

лизуемого приводом момента и ускорения/замедления колеса $C_{mi} = \frac{\Delta M_{ti}}{\Delta \omega_{ki}}$.

Испытаниям подвергалось транспортное средство⁴, оснащённое индивидуальным тяговым электроприводом с функцией подавления автоколебаний и без неё.

Цель исследований – проверка методами экспериментальных исследований эффективности работы алгоритма подавления автоколебаний в электромеханической системе привода колеса при торможении.

Программа испытаний по проверке эффективности системы подавления автоколебаний при торможении

Транспортное средство для испытаний должно быть в двух весовых состояниях: загружено на 100% до полной массы 18000 кг и не загружено, иметь снаряжённую массу 12200 кг.

Дорожные условия выбраны исходя из реализации повышенного проскальзывания ведущих колёс. Не должно наблюдаться сильного встречного ветра для исключения его влияния на динамику движения. Шины накачаны до давления, соответствующего технической документации, предварительно прогреты пробегом протяжённостью не менее 1 км скоростью не менее 25 км/ч.

Степень заряженности тяговой аккумуляторной батареи должна быть достаточной для обеспечения необходимой динамики движения и не оказывать влияния на тягово-скоростные характеристики привода.

В таблице приведён перечень испытаний при исследовании эффективности алгоритма подавления автоколебаний при выполнении интенсивного замедления.

¹ Светлицкий В.А. Случайные колебания механических систем. М.: Машиностроение, 1976. 216 с.

² Крюков Б.И. Вынужденные колебания существенно нелинейных систем. М.: Машиностроение, 1984. 216 с.

³ Некоркин В.И. Лекции по основам теории колебаний: учебное пособие. Нижний Новгород: Нижегородский университет. 2011. 233 с.

⁴ Электробус КАМАЗ-6282 [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. https://kamaz.ru/production/buses/pdf_062023/Электробус%20КАМАЗ-6282.pdf (дата обращения: 04.03.2024).

Таблица

Программа испытаний при выполнении интенсивного замедления

Источник: составлено автором.

Table

Test program for intensive deceleration

Source: compiled by the author.

Вид испытаний	Описание
Интенсивное торможение на горизонтальном скользком опорном основании (с 20 км/ч до остановки) с активированным и деактивированным рекуперативным торможением	Интенсивное замедление до полной остановки при полностью нажатой педали тормоза. Оба колеса на скользком опорном основании
	Интенсивное замедление до полной остановки при полностью нажатой педали тормоза. Правое колесо на скользком опорном основании, левое – на сухом
	Интенсивное замедление до полной остановки при полностью нажатой педали тормоза. Левое колесо на скользком опорном основании, правое – на сухом
Интенсивное торможение на горизонтальном меняющемся опорном основании (с 20 км/ч до остановки)	Левое колесо стартует со скользкого покрытия и переходит на сухой асфальт
	Правое колесо стартует со скользкого покрытия и переходит на сухой асфальт
	Оба колеса стартуют со скользкого покрытия и переходят на сухой асфальт

В качестве опорного основания выбран мокрый базальт (рисунок 1).



Рисунок 1 – Опорное основание (мокрый базальт)
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Testing surface (wet basalt)
Source: compiled by the author.

Оборудование, используемое при испытаниях

Системы транспортного средства оснащены датчиками для фиксации параметров процессов их работы. Тяговый электрический привод оснащён датчиками частоты вращения ротора и фазных токов, позволяющими авто-

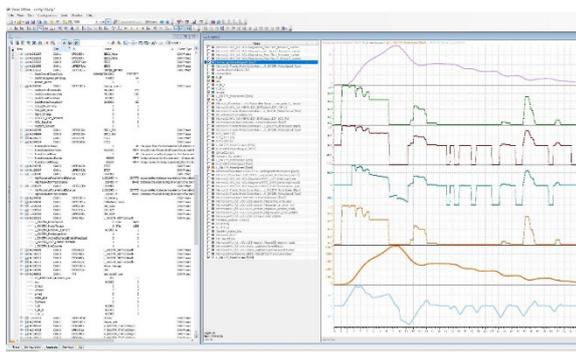
номному инвертору напряжения рассчитывать развиваемый электромагнитный момент двигателя с помощью наблюдателя электромагнитного момента [21], нагрузка на колесе определяется с помощью наблюдателя момента сопротивления в процессе управления [22]. Регистрируется также угловая скорость всех колёс. Динамика кузова транспортного средства регистрируется с помощью датчиков линейных и угловых ускорений по всем координатам.

Для фиксации данных применялся адаптер Vector VN1630A (рисунок 2) для подключения сети CAN к ЭВМ. Для анализа данных использовалось программное обеспечение Vector CANoe. Рабочее окно программы Vector CANoe показано на рисунке 3, а, MatLab Simulink на рисунке 3, б.



Рисунок 2 – Адаптер Vector VN1630A
Источник: электронный ресурс <https://www.vector.com>.
(дата обращения: 17.08.24)

Figure 2 – Vector VN1630A adapter
Source: Electronic resource <https://www.vector.com>.
(accessed: 17.08.2024)



а



б

Рисунок 3 – Окно программ для анализа данных:
а – Vector CANoe; б – MatLab Simulink
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Program window for data analysis:
a) Vector CANoe; b) MatLab Simulink
Source: compiled by the author.



Рисунок 4 – Тензометрические измерительные колёса Kistler RoaDyn
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Kistler RoaDyn tensometric measuring wheels
Source: compiled by the author.

Помимо регистрации данных с CAN шины производилась фиксация значений крутящего момента и угловых скоростей на ведущих колёсах с помощью тензометрических колёс Kistler RoaDyn. Измерительные колёса, установленные на ступицу ведущих колёс, показаны на рисунке 4. С помощью регистрирующей аппаратуры IMC-CRFX-400 (рисунок 5) осу-

ществлялась фиксация значений крутящего момента, частоты вращения ведущих колёс.

Дополнительно измеряются значения постоянного тока, потребляемого тяговыми электромеханическими приводами (рисунок 6) для определения характера воздействия возбуждающихся колебательных явлений.

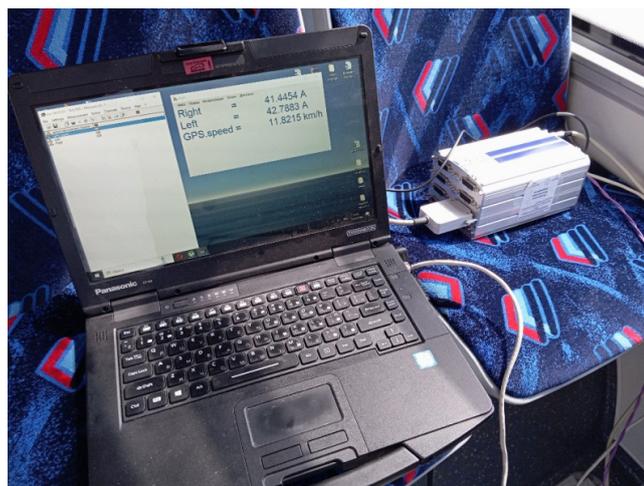


Рисунок 5 – Оборудование для сбора данных IMC-CRFX-400
Источник: составлено автором.

Figure 5 – IMC-CRFX-400 data acquisition equipment
Source: compiled by the author.



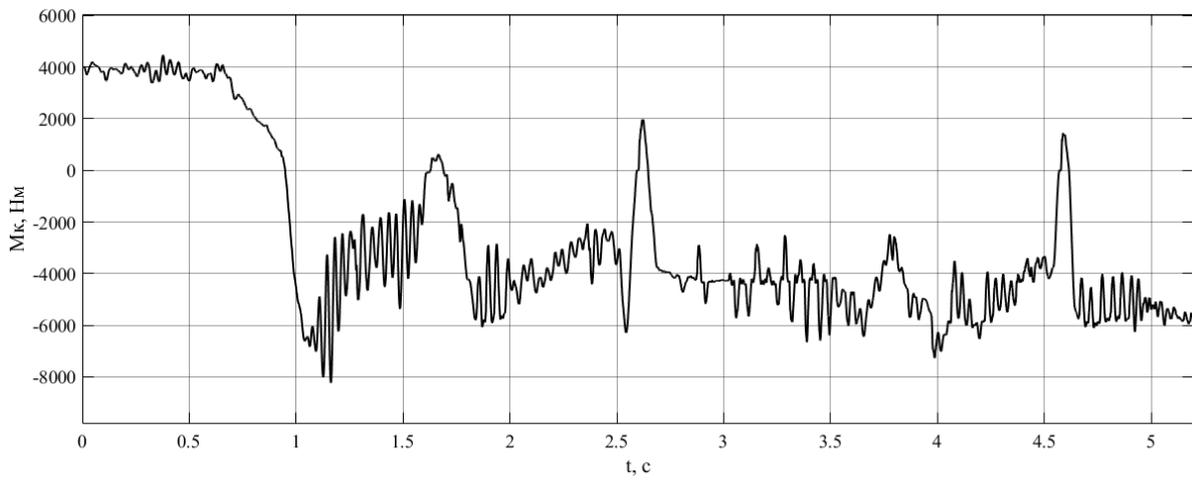
Рисунок 6 – Измерение потребляемого тока
Источник: составлено автором.

Figure 6 – Power consumption measurement
Source: compiled by the author.

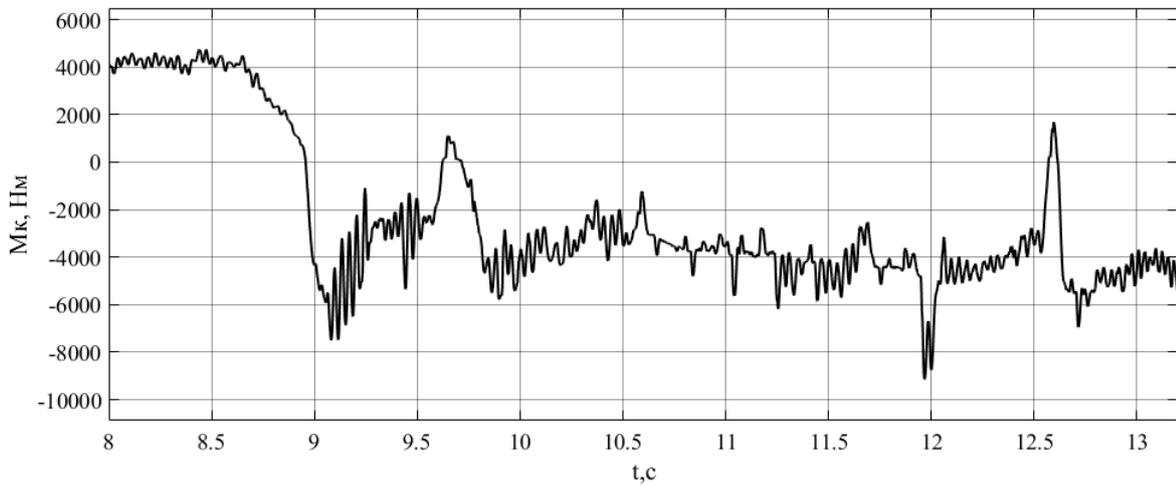
Исследования при интенсивном торможении с деактивированной системой подавления автоколебаний

Транспортное средство перед началом испытаний совершает разгон до требуемой скорости, и при въезде на опорное основание с низким коэффициентом сцепления – мокрый базальт – осуществляется интенсивное торможение, во время которого водитель нажимает на педаль тормоза с максимальной скоростью до упора.

На рисунках 7, 8, 9, 10, 11, 12 представлены реализации регистрируемых автором при выполнении испытательных заездов с интенсивным торможением на скользком опорном основании крутящих моментов на колёсах и частот вращения ротора электродвигателей для транспортного средства, оснащённого антиблокировочной системой без функции подавления автоколебаний.



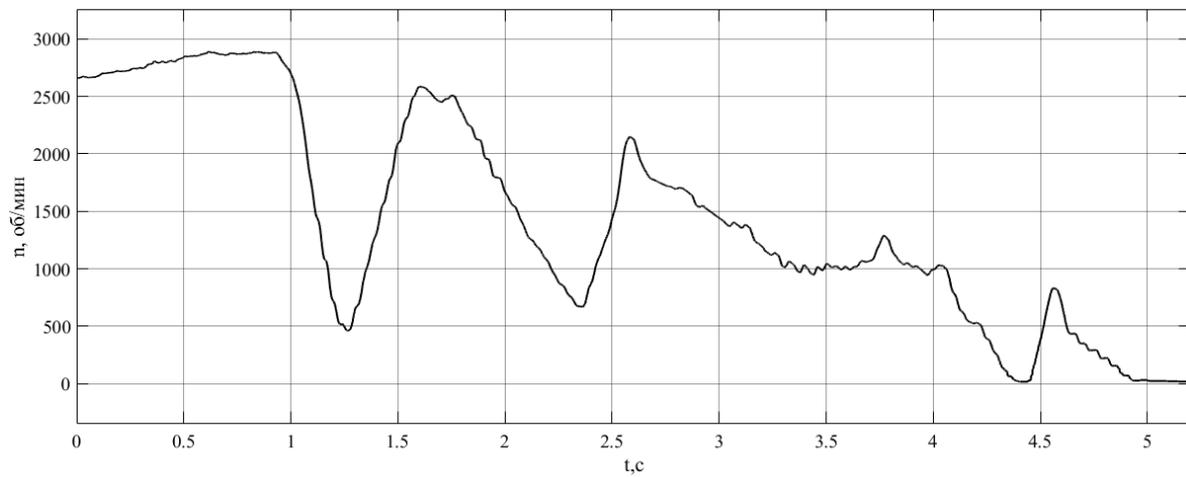
а



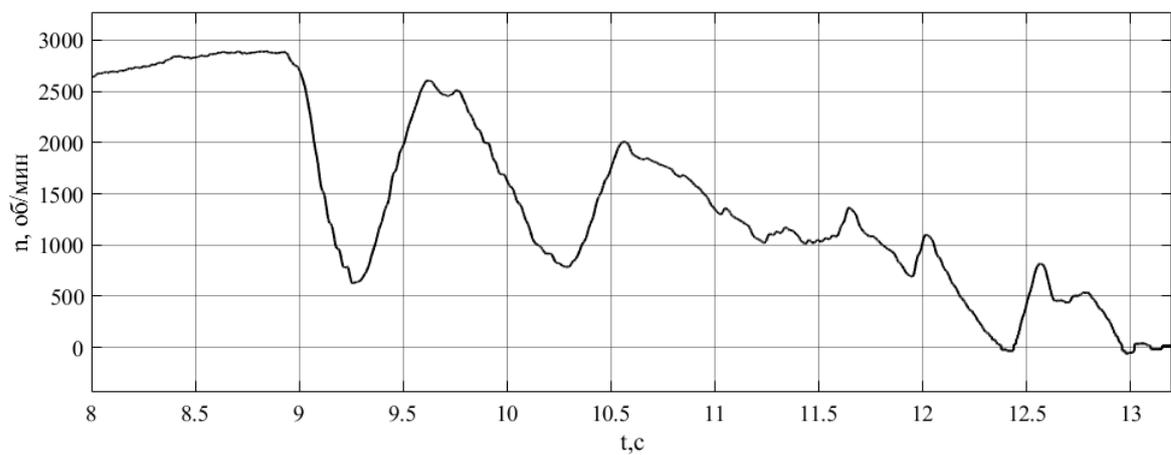
б

Рисунок 7 – Крутящий момент на колесе M_k , Нм с деактивированной системой подавления автоколебаний, заезд № 1: а – на левом; б – на правом
Источник: составлено автором.

Figure 7 – Torque at wheel M_k , Nm with deactivated system of self-excited vibration suppression, run No 1: a) left; b) right.
Source: compiled by the author.



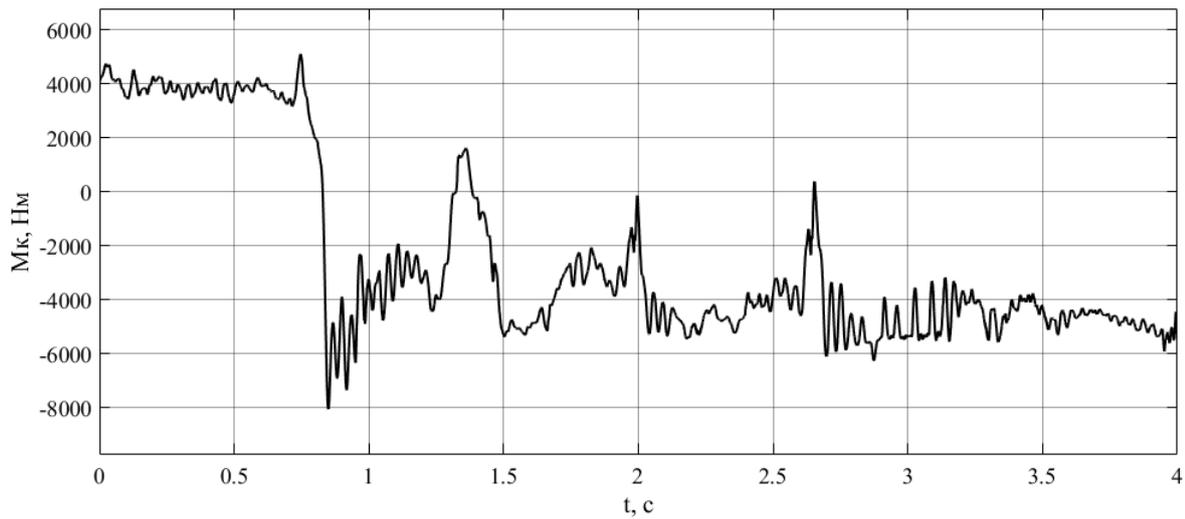
а



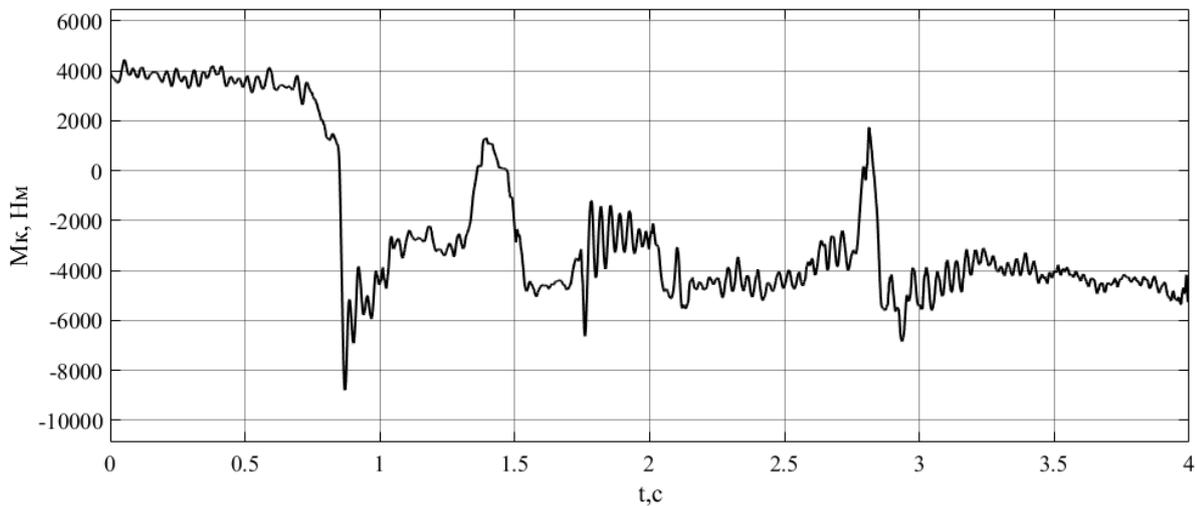
б

Рисунок 8 – Частота вращения вала тягового электродвигателя n , об/мин с деактивированной системой подавления автоколебаний, заезд № 1: а – левого; б – правого
Источник: составлено автором.

Figure 8 – Traction motor shaft speed n , Rpm, with deactivated system of self-excited vibration suppression, run No1: a) left; b) right
Source: compiled by the author.



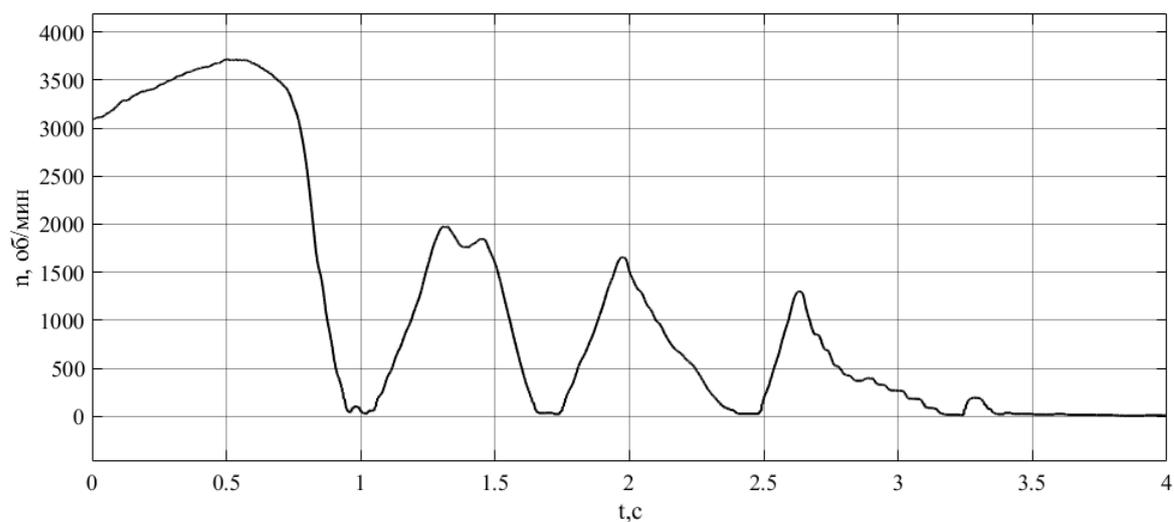
а



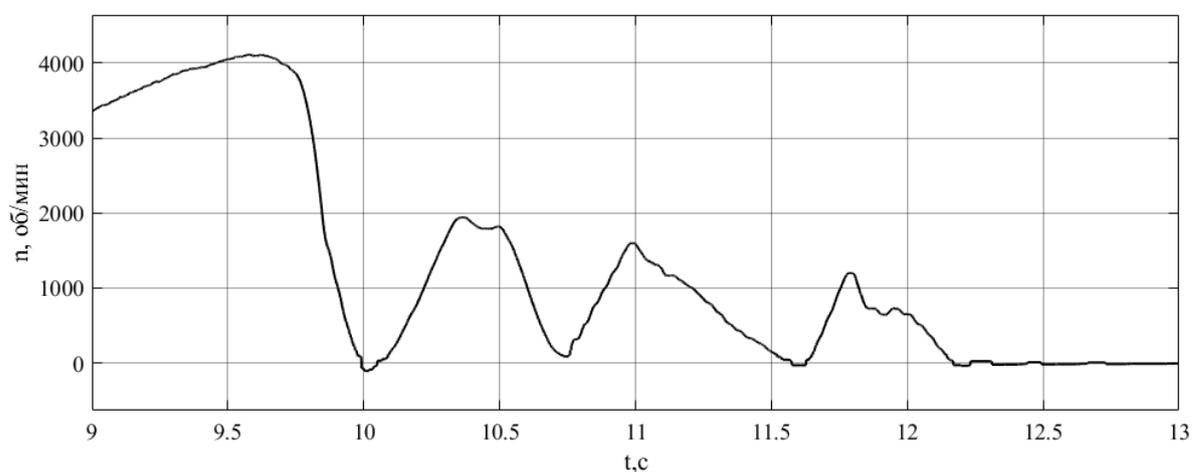
б

Рисунок 9 – Крутящий момент на колесе M_k , Нм с деактивированной системой подавления автоколебаний, заезд № 2: а – на левом; б – на правом
Источник: составлено автором.

Figure 9 – Torque at wheel M_k , Nm with deactivated system of self-excited vibration suppression, run No. 2: a) left; b) right.
Source: compiled by the author.



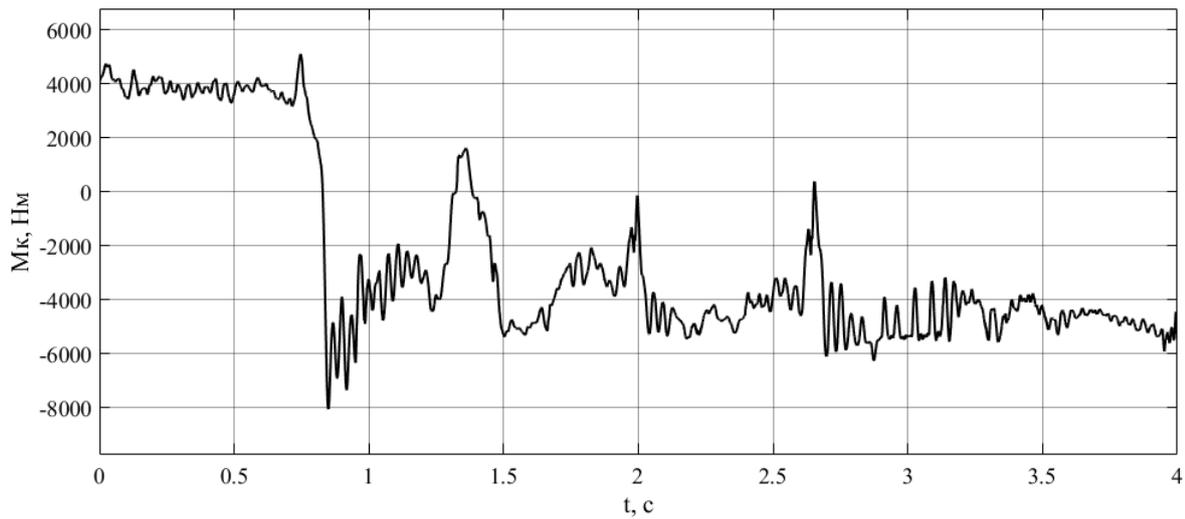
а



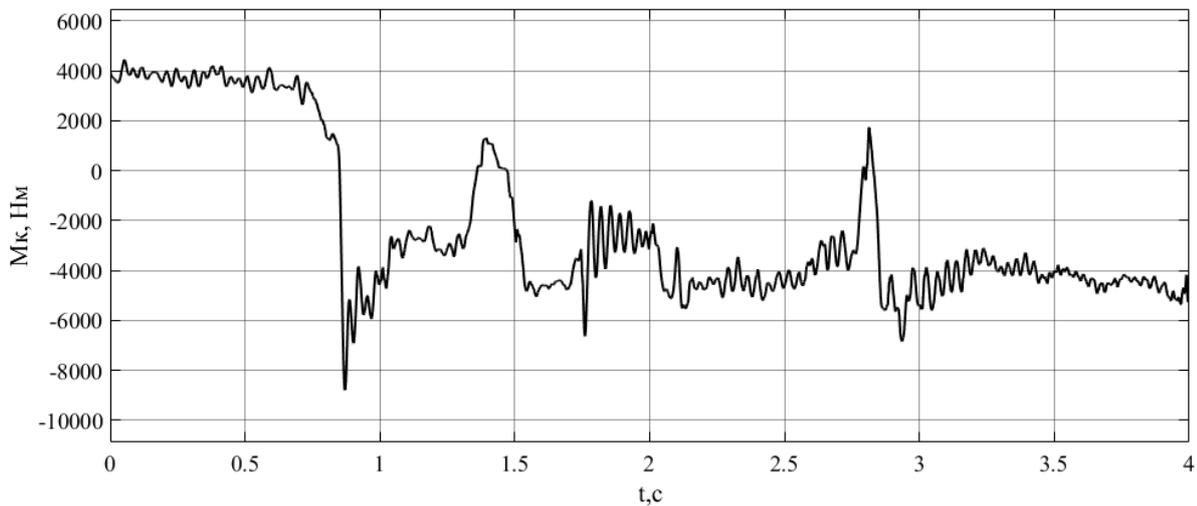
б

Рисунок 10 – Частота вращения вала тягового электродвигателя n , об/мин с деактивированной системой подавления автоколебаний, заезд № 1: а – левого; б – правого
Источник: составлено автором.

Figure 10 – Traction motor shaft speed n , rpm, with deactivated system of self-excited vibration suppression, run № 1: a) left; b) right
Source: compiled by the author.



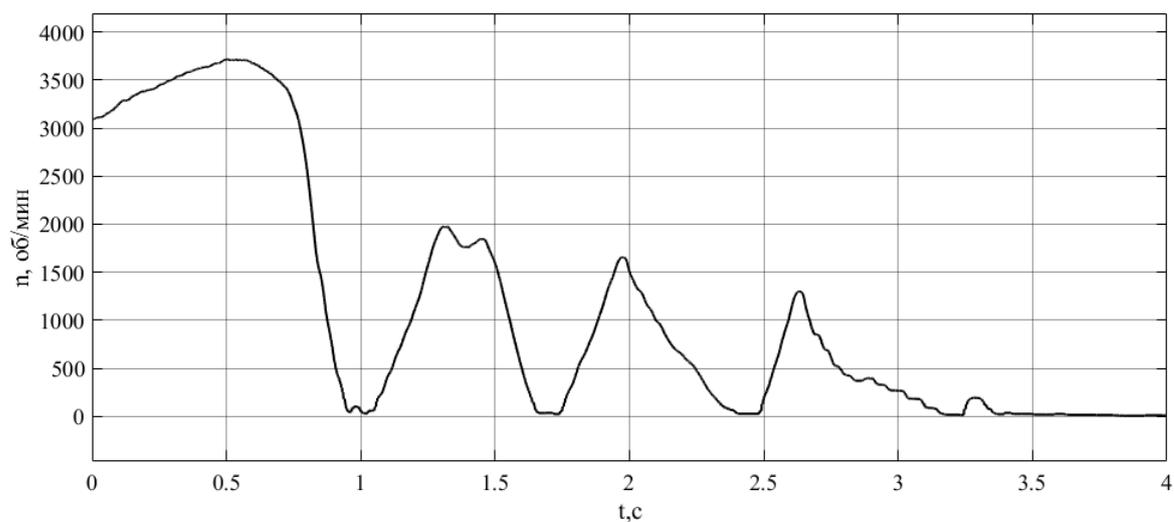
а



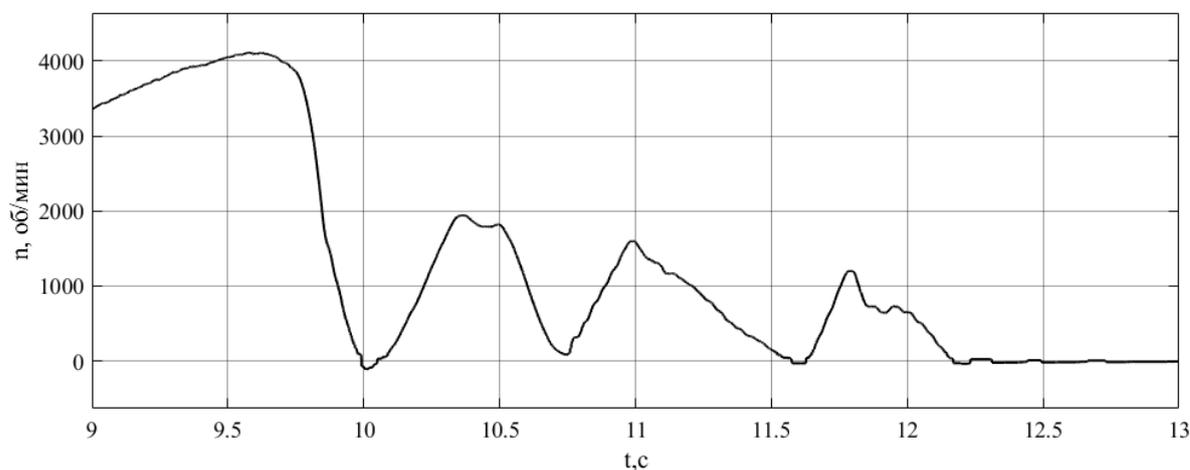
б

Рисунок 11 – Крутящий момент на колесе M_k , Нм с деактивированной системой подавления автоколебаний, заезд № 3: а – на левом; б – на правом
Источник: составлено автором.

Figure 11 – Torque at wheel M_k , Nm with deactivated system of self-excited vibration suppression, run No. 3: a) left; b) right.
Source: compiled by the author.



а



б

Рисунок 12 – Частота вращения вала тягового электродвигателя n , об/мин с деактивированной системой подавления автоколебаний, заезд № 3: а – левого; б – правого
Источник: составлено автором.

Figure 12 – Traction motor shaft speed n , rpm with deactivated system of self-excited vibration suppression, run No. 3: a) left; b) right
Source: compiled by the author.

На приведённых регистрируемых зависимостях отчётливо видны участки работы антиблокировочной системы, сопровождаемые при этом возбуждением автоколебательных явлений для крутящих моментов на колёсах. Обнаруживается изменение знака крутящего момента, приложенного к колесу, что свиде-

тельствует о наличии перекадки зубьев в зацеплении при активации антиблокировочной системы. Для реализации частот вращения колёс в данном случае существенного возбуждения автоколебательных явлений не обнаружено.

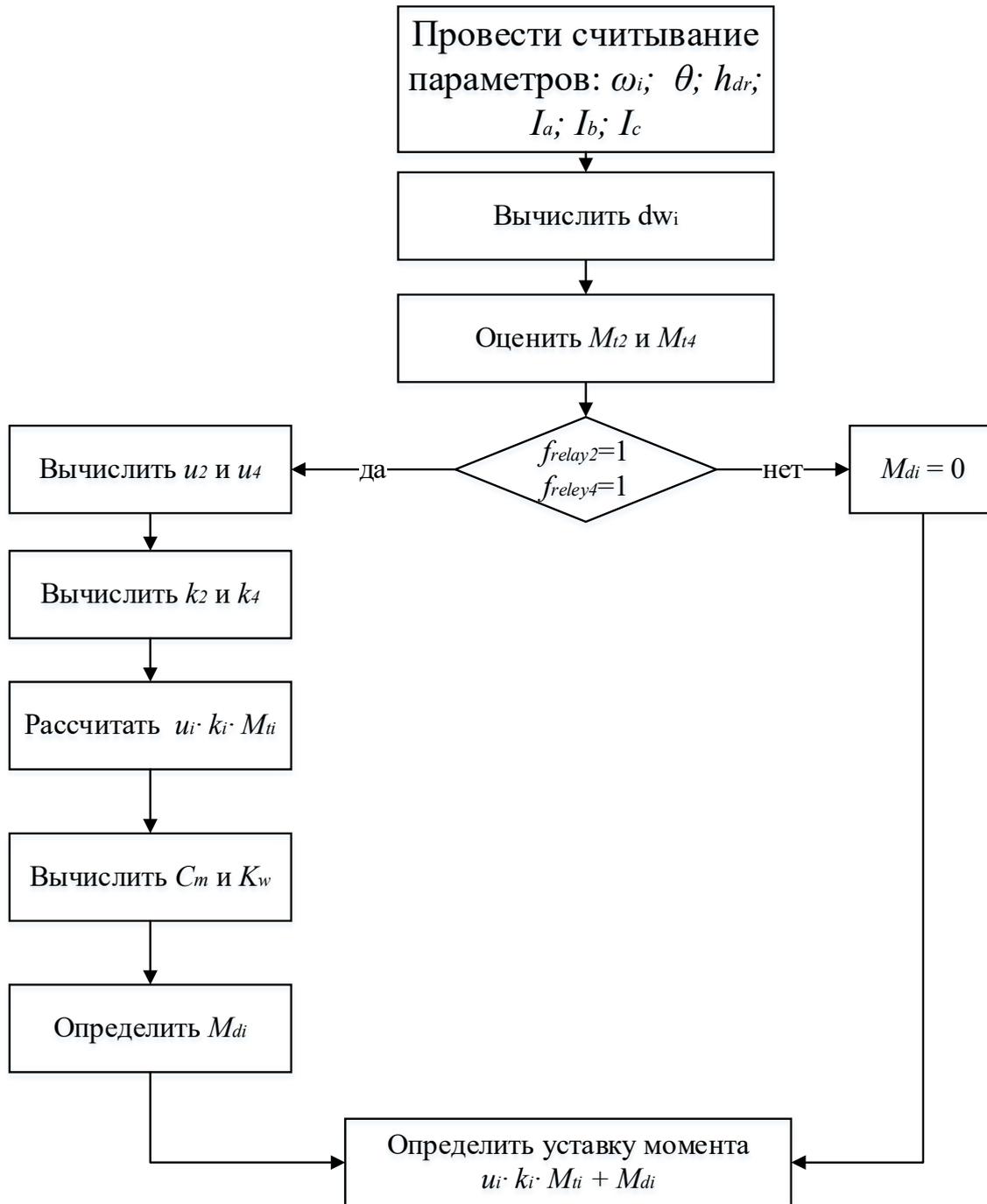


Рисунок 13 – Алгоритм управления²: dw_i – скольжение w -го колеса; k_i – коэффициент коррекции учёта криволинейности движения; u_i – управляющие сигналы
Источник: составлено автором².

Figure 13 – Control algorithm²: dw_i - slip of the w -wheel; k_i - correction factor for curvature
Source: compiled by the author².

Исследование при интенсивном торможении с активированной системой подавления автоколебаний

Исходя из вышеизложенного, можно представить алгоритм управления демпфирующим моментом следующим образом (рисунок 13)⁵.

Система управления постоянно осуществляет расчёт и мониторинг диагностических признаков буксования ведущих колёс dw_2 , dw_4 , и функций f_{relay2} и f_{relay4} .

В случае детектирования повышенного скольжения $dw_i > 0,3$ система определяет коэффициент демпфирования K_w для левого и правого колёс по отдельности $K_w \geq 2\sqrt{J_k C_m}$, где угловую жёсткость $C_{mi} = \frac{\Delta M_{ti}}{\Delta \omega_{ki}}$ для i -го ко-

леса оцениваемая в процессе управления. Производится оценка тормозного, рекуперативного момента на колёсах развиваемого тяговыми электродвигателями M_{t2} , M_{t4} , осуществляется расчёт демпфирующего момента $M_{di} = -K_{wi}\omega_{ki}f_{relayi}$ и корректировка момента развиваемого электродвигателем $M_{ti} + M_{di}$.

На рисунках 14, 15, 16, 17, 18, 19 представлены реализации регистрируемых автором при выполнении испытательных заездов с интенсивным торможением на скользком опорном основании крутящих моментов на колёсах и частот вращения ротора электродвигателей для транспортного средства, оснащённого антиблокировочной системой с функцией подавления автоколебаний.

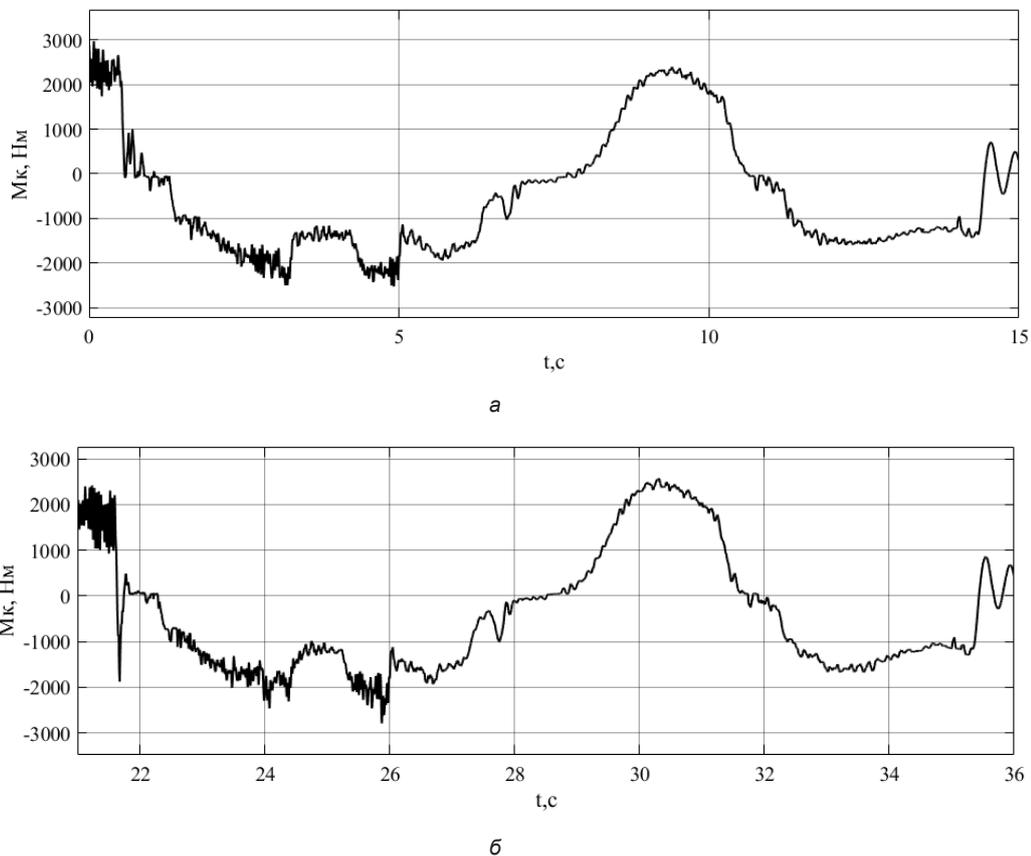
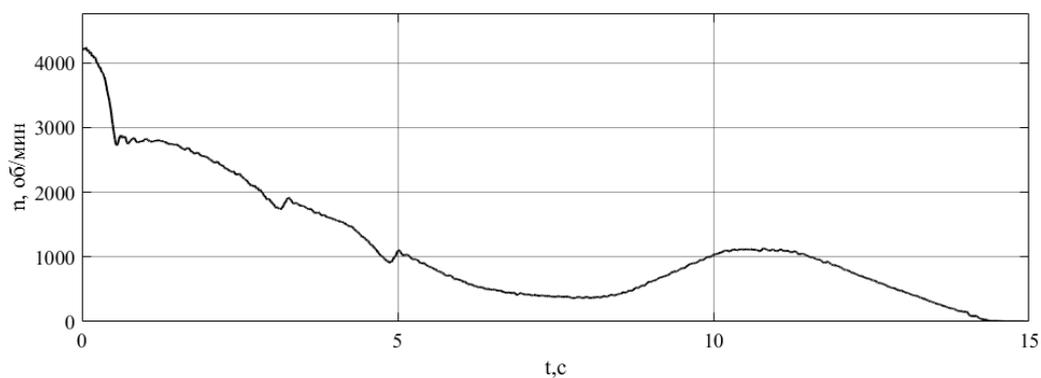


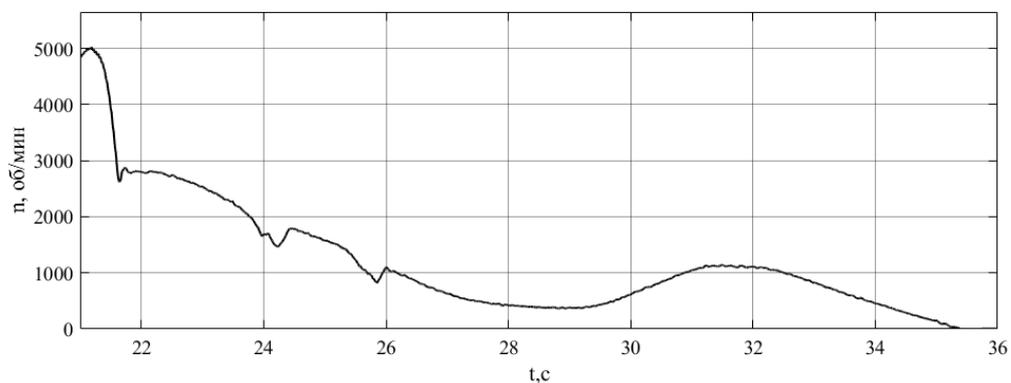
Рисунок 14 – Крутящий момент на колесе M_k , Нм с активированной системой подавления автоколебаний, заезд № 1: а – на левом; б – на правом
Источник: составлено автором.

Figure 14 – Torque at wheel M_k , Nm with activated system of self-excited vibration suppression, run №1: a) left; b) right
Source: compiled by the author.

⁵ 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.



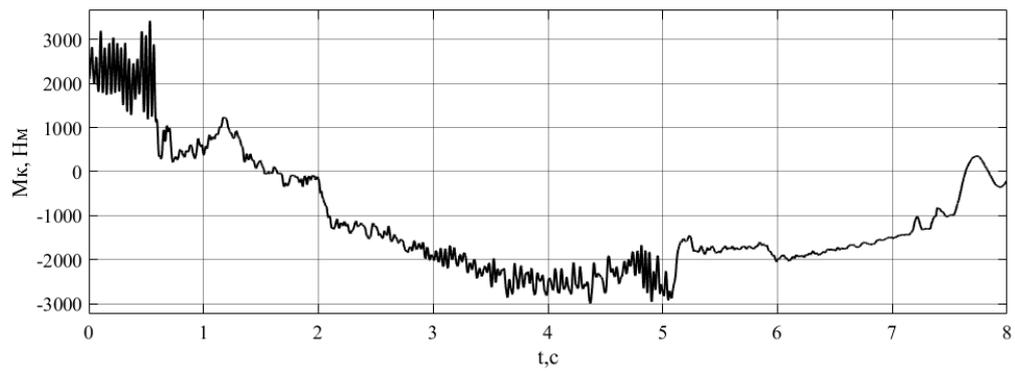
а



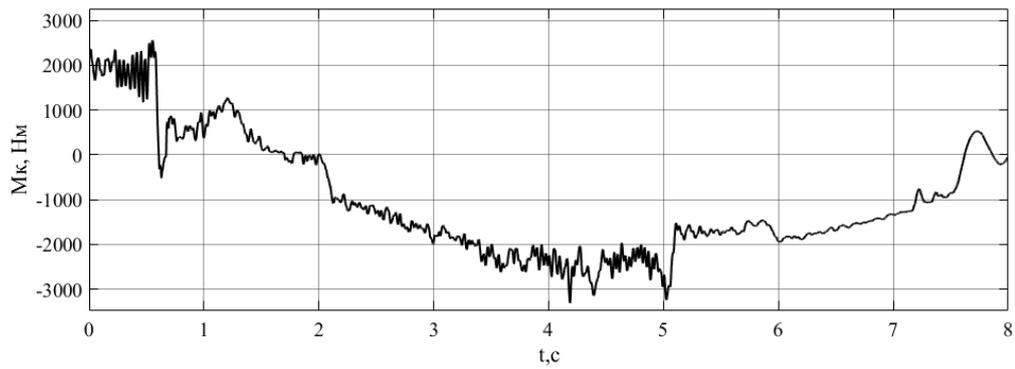
б

Рисунок 15 – Частота вращения вала тягового электродвигателя n , об/мин с активированной системой подавления автоколебаний, заезд № 1: а – левого; б – правого
Источник: составлено автором.

Figure 15 – Traction motor shaft speed n , rpm, with activated system of self-excited vibration suppression, run № 1: a) left; b) right
Source: compiled by the author.



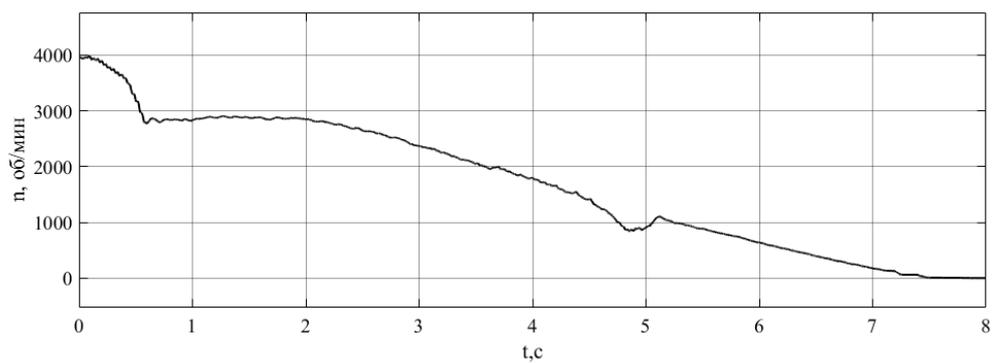
а



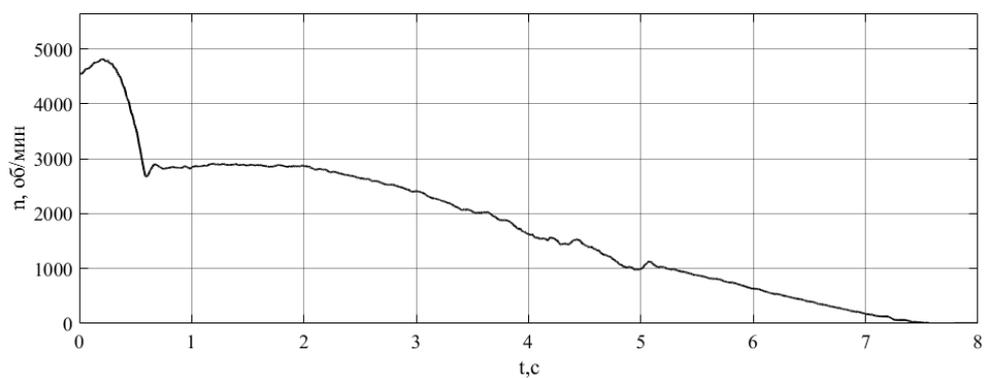
б

Рисунок 16 – Крутящий момент на колесе M_k , Нм с активированной системой подавления автоколебаний, заезд № 2: а – на левом; б – на правом
Источник: составлено автором.

Figure 16 – Torque at wheel M_k , Nm with activated system of self-excited vibration suppression, run No. 2: a) left; b) right
Source: compiled by the author.



а



б

Рисунок 17 – Частота вращения вала электродвигателя n , об/мин с активированной системой подавления автоколебаний, заезд № 2: а – левого; б – правого
 Источник: составлено автором.

Figure 17 – Motor shaft speed n , rpm, with activated system of self-excited vibration suppression, run No. 2: a) left; b) right
 Source: compiled by the author.

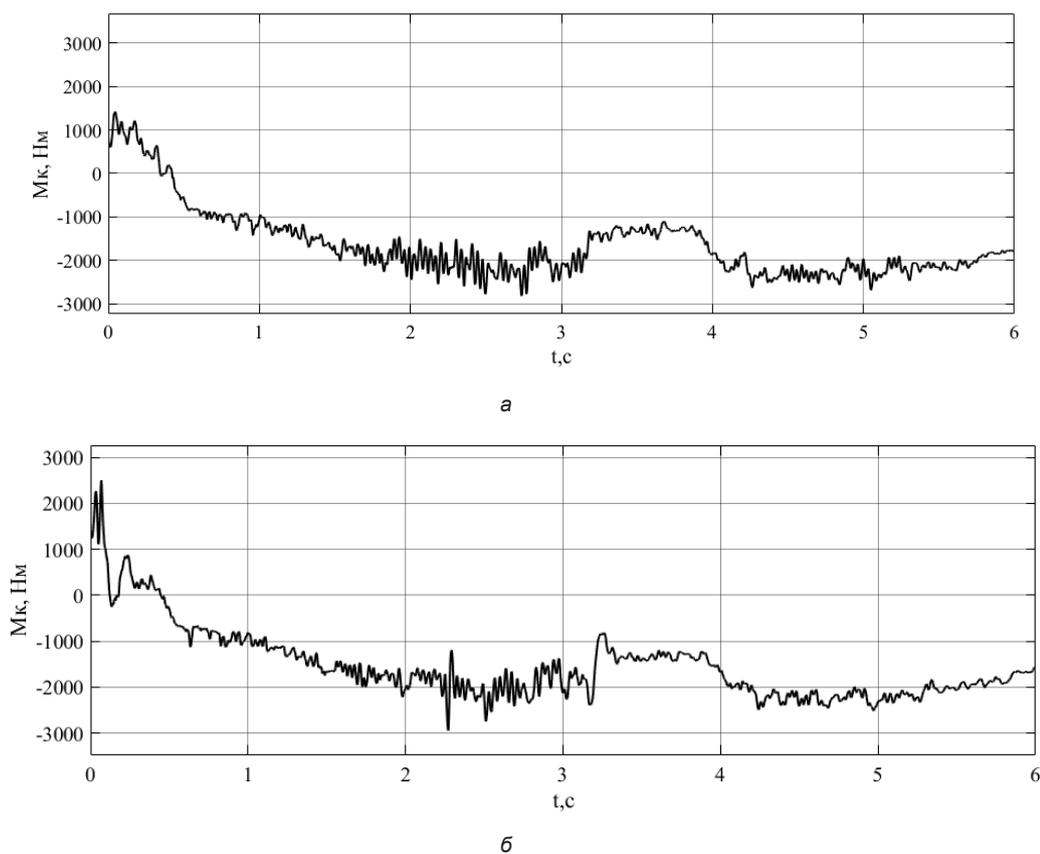
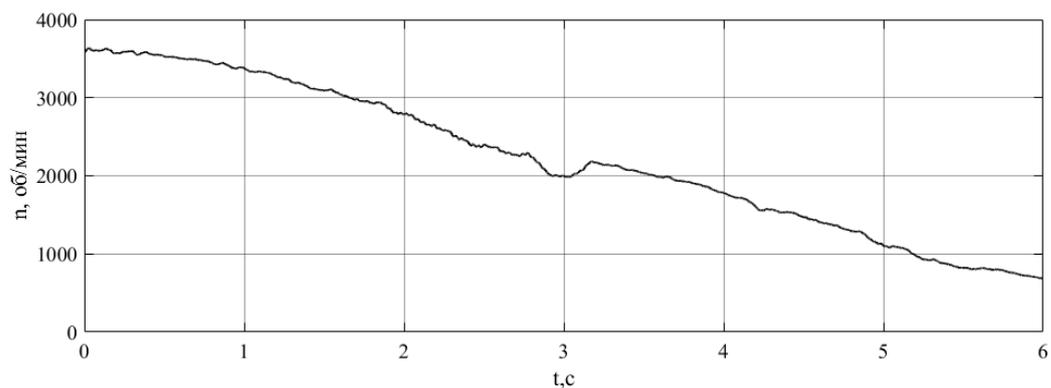
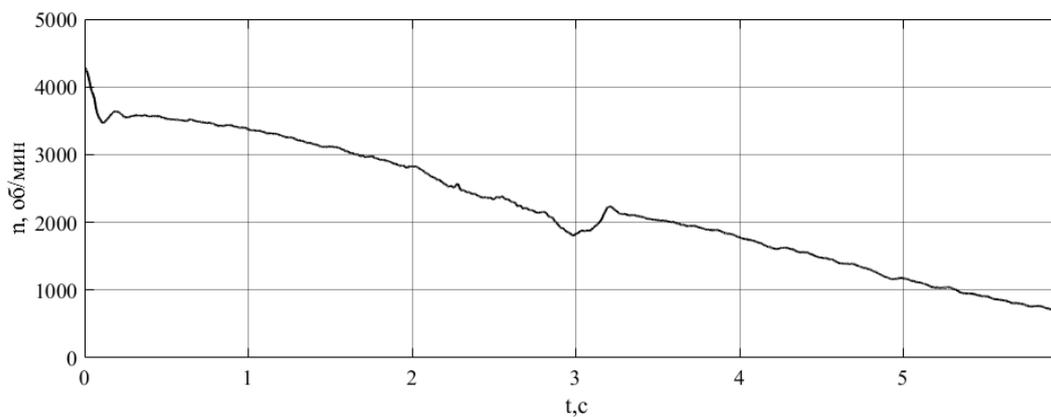


Рисунок 18 – Крутящий момент на колесе M_k , Нм с активированной системой подавления автоколебаний, заезд № 3: а – на левом; б – на правом
Источник: составлено автором.

Figure 18 – Torque at wheel M_k , Nm with activated system of self-excited vibration suppression, run № 3: a) left; b) right
Source: compiled by the author.



а



б

Рисунок 19 – Частота вращения вала тягового электродвигателя n , об/мин с активированной системой подавления автоколебаний, заезд № 3: а – левого; б – правого
Источник: составлено автором.

Figure 19 – Traction motor shaft speed n , rpm, with activated system of self-excited vibration suppression, run No. 3: a) left; b) right
Source: compiled by the author.

На приведённых регистрируемых зависимостях отчётливо видны участки работы антиблокировочной системы при повышенном скольжении колёс. Возбуждаемые при этом колебательные явления менее интенсивны, чем в предыдущем случае и характеризуются меньшим значением амплитуд, что свидетельствует об эффективности алгоритма подавления автоколебательных явлений. Для реализации частот вращения колёс в данном случае возбуждение автоколебательных явлений не обнаружено.

При интенсивных торможениях на опорном основании с низкими сцепными свойствами (лёд, лёд со снегом, мокрый асфальт и др.) для транспортного средства, не оснащенного алгоритмом подавления автоколебаний, усреднённые амплитуды колебаний крутящих моментов находятся в диапазоне 1850...2500 Нм, с максимальными значениями амплитуды в диапазоне 6000...8500 Нм.

При оснащении системы управления транспортного средства алгоритмом подавления автоколебаний, при интенсивном торможении усреднённые амплитуды колебаний крутящих моментов находятся в диапазоне 500...750 Нм, с максимальными значениями амплитуды в диапазоне 1000...1500 Нм.

Применение алгоритма подавления автоколебаний в системе управления позволяет снизить величины максимальных амплитуд в 6 раз, усредненных амплитуд в 3...3,5 раза, исключая при этом изменения знака момента.

ВЫВОДЫ

Методами экспериментальных исследований установлена работоспособность и эффективность алгоритма подавления автоколебаний в системе электромеханического привода ведущих колёс транспортного средства, что позволяет рекомендовать его использование при разработке систем управления.

Методами экспериментальных исследований выявлено, что применение алгоритма подавления автоколебаний в системе управления позволяет снизить величины максимальных амплитуд в 6 раз, усредненных амплитуд в 3...3,5 раза, исключая при этом изменения знака момента при интенсивных замедлениях транспортного средства.

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., Grehori C. Estimation of chaotic and regular (stick-slip and ship-slip) oscillations exhibited by coupled oscillations with dry friction // Nonlinear Dynamics. 2005. V. 42. № 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. 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.

7. 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.

8. Климов А.В. Исследование режимов возникновения автоколебаний в тяговом электроприводе электробуса в условиях эксплуатации // Грузовик. 2024. № 3. С. 3–8. DOI 10.36652/1684-1298-2024-3-3-8. EDN FXLUUX.

9. 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). pp. 1064–1071.

10. 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.

11. Aref M.A. Soliman, Mina M.S. Kaldas. An Investigation of Anti-lock Braking System for Automobiles. SAE International by Warwick University, Thursday, May 05, 2016.

12. Chendi Sun and Xiaofei Pei. Development of ABS ECU with Hard ware-in-the-Loop Simulation Based on Labcar System. SAE International by Warwick University, Thursday, May 05, 2016.

13. Edoardo Sabbioni, Federico Cheli and Vincenzo d'Alessandro. Politecnico di Milano Analysis of ABS/ESP Control Logics Using a HIL Test Bench. SAE International by Warwick University, Thursday, May 05, 2016.

14. Hart P.M. Review of Heavy Vehicle Braking Systems Requirements (PBS Requirements), Draft Report, 24 April 2003.

15. Kurt M. Marshek, Jerry F. Guderman II, Mark J. Jonson. Performance of Anti-Lock Braking System Equipped Passenger Vehicles Part I: Braking as a Function of Brake Pedal Application Force. SAE 2002 World Congress Detroit, Michigan March 4-7, 2002.

16. 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.

17. 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.

18. Klimov A.V., Ospanbekov B.K., Keller A.V. [et al.] Research into the Peculiarities of the Individual Traction Drive Nonlinear System Oscillatory Processes // World Electric Vehicle Journal. 2023. Vol. 14, No. 11. P. 316. DOI 10.3390/wevj14110316. EDN BIISTI.

19. 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.

20. Шамберов В.Н. Фрикционные автоколебания в механических системах // Известия вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 2. С. 24–28.

21. Климов А.В. Наблюдатель тягового электромагнитного момента на валу тягового электродвигателя // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 5. С. 423–432. DOI 10.17816/0321-4443-472138. EDN VHDJBL.

22. Климов А.В. Синтез адаптивного наблюдателя момента сопротивления на валу тягового электродвигателя // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 2. С. 99–105. DOI 10.17816/0321-4443-119856. EDN VKZKOY.

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 ship-slip) 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. 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.)

7. 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.)

8. Klimov A.V. Investigation of the modes of occurrence of self-oscillations in the electric traction drive of an electric bus under operating conditions. *Truck*. 2024; 3: 3-8. DOI 10.36652/1684-1298-2024-3-3-8. EDN FXLUUX. (in Russ.)

9. 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 ARPN. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017; 12 (4): 1064–1071.

10. 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): 11–13.

11. Aref M.A. Soliman, Mina M.S. Kaldas. An Investigation of Anti-lock Braking System for Automobiles. SAE International by Warwick University, Thursday, May 05, 2016.

12. Chendi Sun and Xiaofei Pei. Development of ABS ECU with Hard ware-in-the-Loop Simulation Based on Labcar System. SAE International by Warwick University, Thursday, May 05, 2016.

13. Edoardo Sabbioni, Federico Cheli and Vincenzo d'Alessandro. Politecnico di Milano Analysis of ABS/ESP Control Logics Using a HIL Test Bench. SAE International by Warwick University, Thursday, May 05, 2016.

14. Hart P.M. Review of Heavy Vehicle Braking Systems Requirements (PBS Requirements), Draft Report, 24 April 2003.

15. Kurt M. Marshek, Jerry F. Guderman II, Mark J. Jonson. Performance of Anti-Lock Braking System Equipped Passenger Vehicles Part I: Braking as a Function of Brake Pedal Application Force. SAE 2002 World Congress Detroit, Michigan March 4-7, 2002.

16. 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.)

17. 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.)

18. Klimov A.V., Ospanbekov B.K., Keller A.V. [et al.] Research into the Peculiarities of the Individual Traction Drive Nonlinear System Oscillatory Processes. *World Electric Vehicle Journal*. 2023; Vol. 14, No. 11: 316. DOI 10.3390/wevj14110316. EDN BIISTI.

19. 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.)

20. Shamberov V.N. Friction self-oscillations in mechanical system. *Journal of Instrument Engineering*. 2010; issue 53, No. 2: 24–28. (in Russ.)

21. Klimov AV. The observer of traction electromagnetic torque at the shaft of a traction electric motor. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023; 90(5): 423–431. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-472138>

22. Klimov, A.V. Synthesis of an adaptive observer of the resistance torque at a shaft of a traction electric motor. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023; 90(5): 99–105. DOI 10.17816/0321-4443-119856. EDN: VKZKOY.

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 Се-

меновская, 38), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-5351-3622>; **SPIN:** 7637-3104; e-mail: klimmanen@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Alexander V. Klimov – Cand. of Sci. (Engineering), 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:** <http://orcid.org/0000-0002-5351-3622>; **SPIN:** 7637-3104; e-mail: klimmanen@mail.ru

Научная статья
УДК 656.13(571.150)
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-714-725>
EDN: BCXWHL



ФАКТОРЫ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЙ АВАРИЙНОСТИ В ПРИГОРОДНОЙ ЗОНЕ

Е.В. Печатнова¹ ✉, И.А. Новиков², И.И. Кирюшин³, Н.Н. Нагорный⁴

¹Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия

³Барнаульский юридический институт МВД России,
г. Барнаул, Россия

⁴Сибирский юридический институт МВД России,
г. Красноярск, Россия

✉ ответственный автор
phukcia@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Аварийность в городах и вне населенных пунктов имеет свои особенности, которые исследуются в различных работах. Однако изменение характеристик транспортного, пешеходного потока, структуры улично-дорожной среды отмечаются не сразу после пересечения границы города. Расчеты показывают, что именно в пригородной зоне отмечается наибольшая плотность ДТП, а также высокая доля аварийно-опасных участков. Также в последнее время отмечается усиление процесса субурбанизации, что приводит к увеличению пригородных зон. В связи с этим оценка влияния различных факторов на аварийность в границах пригородных территорий является актуальной научной задачей. Цель работы – исследование влияния факторов внешней среды на аварийность в пригородной зоне на примере г. Барнаула.

Материалы и методы. Исследование проведено на примере пригородной зоны г. Барнаула, границы которой установлены согласно транспортной методике. Эмпирической основой работы выступили данные о ДТП, зафиксированные на отрезках федеральных автомобильных дорог в границах пригородной зоны в период с 2018 по 2023 г. Для каждого ДТП из выборки определен период суток и погодные условия (температура воздуха, количество осадков и скорость ветра). Для определения характера влияния выбранных факторов применена теория относительного риска.

Выводы. В результате исследования выделены особенности аварийности в пригородной зоне в сравнении с загородными и городскими дорогами. Также выявлен характер влияния группы основных внешних факторов: периоды суток и погодные условия. Среди периодов суток представлены день, гражданские, навигационные, астрономические сумерки и ночь. В рамках погодных условий проанализированы температура воздуха, количество осадков и скорость ветра.

Рамки исследования/возможность последующего использования результатов научной работы. Результаты исследования могут применяться при дальнейшем комплексном исследовании аварийности в пригородных зонах крупных городов.

Практическое значение. Выявленные особенности аварийности и зависимости относительного риска возникновения ДТП в пригородной зоне от внешних факторов могут использоваться при проведении превентивных мероприятий на улично-дорожной сети, а также при развитии интеллектуальных транспортных систем.

Оригинальность. Впервые определены зависимости относительного риска возникновения ДТП в пригородной зоне в результате действия группы основных факторов внешней среды (периода суток и погодных условий).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пригородная зона, безопасность дорожного движения (БДД), дорожно-транспортные происшествия (ДТП), относительный риск, риск возникновения ДТП, федеральные автомобильные дороги

© Печатнова Е.В., Новиков И.А., Кирюшин И.И., Нагорный Н.Н., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

Статья поступила в редакцию 09.08.2024; одобрена после рецензирования 16.09.2024; принята к публикации 17.10.2024.

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: Печатнова Е.В., Новиков И.А., Кирюшин И.И., Нагорный Н.Н. Факторы дорожно-транспортной аварийности в пригородной зоне // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 5. С. 714-725. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-714-725>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-714-725>

EDN: BCXWHL

FACTORS CONTRIBUTING TO ROAD TRAFFIC ACCIDENTS IN SUBURBAN AREAS

Elena V. Pechatnova¹ ✉, Ivan A. Novikov², Ivan I. Kiryushin³, Nikolay N. Nagorny⁴

¹Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia

²Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
Belgorod, Russia

³Barnaul Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia Federation,
Barnaul, Russia

⁴Siberian Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,
Krasnoyarsk, Russia

✉ corresponding author
phukcia@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Accidents in cities and outside populated areas have their own characteristics, which have been studied in various works. However, changes in the characteristics of traffic, pedestrian flows, and those of the street and road environment structure usually are not observed on crossing the city boundaries. Calculations show that it is in the suburban zone that the highest accident density is estimated, as well as a high proportion of accident-hazardous areas. Besides, there has been an increase in the suburbanization process, which leads to the growth of suburban areas. In this regard, assessing the impact of various factors on accidents within the suburban boundaries is an urgent research task. The aim of the study is to investigate the influence of environmental factors on accidents in suburban areas (the city of Barnaul is observed as an example).

Materials and methods. In this study the suburban zone of Barnaul was considered as an example, the boundaries of the zone being defined according to the transport methodology. The empirical basis of the work was data on accidents that were recorded for the sections of federal highways within the boundaries of the suburban zone in the period from 2018 to 2023. For each accident from the sample, the period of day and weather conditions (air temperature, precipitation rate and wind speed) were determined. The relative risk theory was used to assess the influence of the factors selected.

Conclusions. The study identified the distinctive features of accidents in suburban areas in comparison with those of suburban and urban road conditions. The influence of the group of key external factors was also assessed: periods of the day and weather conditions. Among the former, day, civil, navigational, astronomical twilight and night periods were distinguished. As for the latter, air temperature, precipitation rate and wind speed were analyzed. Limitations of the study /implications for future research. The results of the study can be used in further comprehensive research of accidents in suburban areas of large cities.

Practical implications. The identified features of accidents and the dependence of the relative risk of accidents in the suburban area on external factors can be used for preventive measures development, as well as in the development of intelligent transport systems.

© Pechatnova E.V., Novikov I.A., Kiryushin I.I., Nagorny N.N., 2024



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

Originality. For the first time, the dependences of the relative risk of accidents in the suburban area as a result of a group of key environmental factors (period of the day and weather conditions) were determined.

KEYWORDS: suburban area, road safety, road traffic accidents, relative risk, risk of road accidents, federal roads

ACKNOWLEDGMENTS: the authors would like to express their gratitude to the editorial staff of the Russian Automobile and Highway Industry Journal and to the reviewers of the manuscript.

The article was submitted 09.08.2024; approved after reviewing 16.09.2024; accepted for publication 17.10.2024.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

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

For citation: Pechatnova E.V., Novikov I.A., Kiryushin I.I., Nagorny N.N. Factors contributing to road traffic accidents in suburban areas. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (5): 714-725. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-714-725>

ВВЕДЕНИЕ

Характеристики транспортного потока, условий движения, придорожной среды, плотность застройки являются группой факторов, влияющей на безопасность дорожного движения [1, 2]. Структура ДТП, факторы и причины аварийности на дорогах вне городов и населенных пунктов существенно отличаются от соответствующего распределения в региональных центрах, что связано с различными условиями дорожного движения. В связи с этим, при исследовании процессов аварийности, выделяют загородный и городской режимы движения. Очевидно, что такое изменение в условиях безопасности движения происходит на некотором расстоянии от регионального центра, и поэтому дорожное движение в пригородных зонах имеет свои особенности [3].

Исследование процессов формирования аварийности в пригородной зоне имеет большое значение в связи с большой плотностью ДТП на единицу протяженности дороги. Так расчеты, проведенные на примере Алтайского края, показали следующее. Риск возникновения ДТП на 1 км дороги в пригородной зоне г. Барнаула составляет 0,75 ДТП/год; в самом г. Барнауле – 0,55 ДТП/год, вне населенных пунктов на автомобильных дорогах федерального значения – 0,28 ДТП/год. Приведенные значения свидетельствуют о том, что участки УДС в пригородной зоне потенциально являются местами концентрации ДТП, что подтверждено в предыдущих исследованиях [4]. Высокие значения плотности ДТП обуславливаются негативным сочетанием параметров движения: присущие городу пересечения транспортных, пешеходных потоков, наличие большого числа объектов притяжения, движение пешеходов вдоль проезжей части сочетаются со свойственной загородным участкам

высокой скоростью движения. Это приводит к тому, что водители не всегда имеют достаточное количество времени для реагирования на опасные ситуации.

Кроме того, актуальность исследования аварийности в пригородной зоне подтверждается усиливающимся процессом субурбанизации [5, 6, 7]. В настоящее время для большинства крупных городов России характерно развитие пригородов и переселения части населения в них [8, 9, 10].

Несмотря на актуальность проблемы, исследование характеристик аварийности в основном проводится на примере городских участков или за пределами населенных пунктов, без выделения пригородных зон. Только отдельные исследования посвящены данной теме. Так, в работе [11] дан анализ факторов аварийности в городской и пригородной зоне, в частности приведено сравнение нарушений ПДД: невнимательность и несоблюдение очередности проезда были ведущими причинами ДТП как в городском, так и пригородном режиме, однако в пригородных зонах значительную долю составили несоблюдение дистанции и поворот в запрещенном месте. В исследовании [12] отмечена проблема аварийности с участием мотоциклов в пригороде г. Бангкока, проведен ее анализ. Исследовано влияние факторов, связанных с водителем-виновником, дорожными характеристиками и окружающей средой на тяжесть последствий ДТП на пригородных дорогах провинции Керман в работе [13]; указывается, что дорожный фактор имеет наибольшее значение. Похожая цель поставлена в работе [14], отмечено, что превышение допустимой скорости, дождливая погода и возраст водителя в интервале от 30 до 50 лет являются основными причинами, увеличивающими тяжесть последствий ДТП.

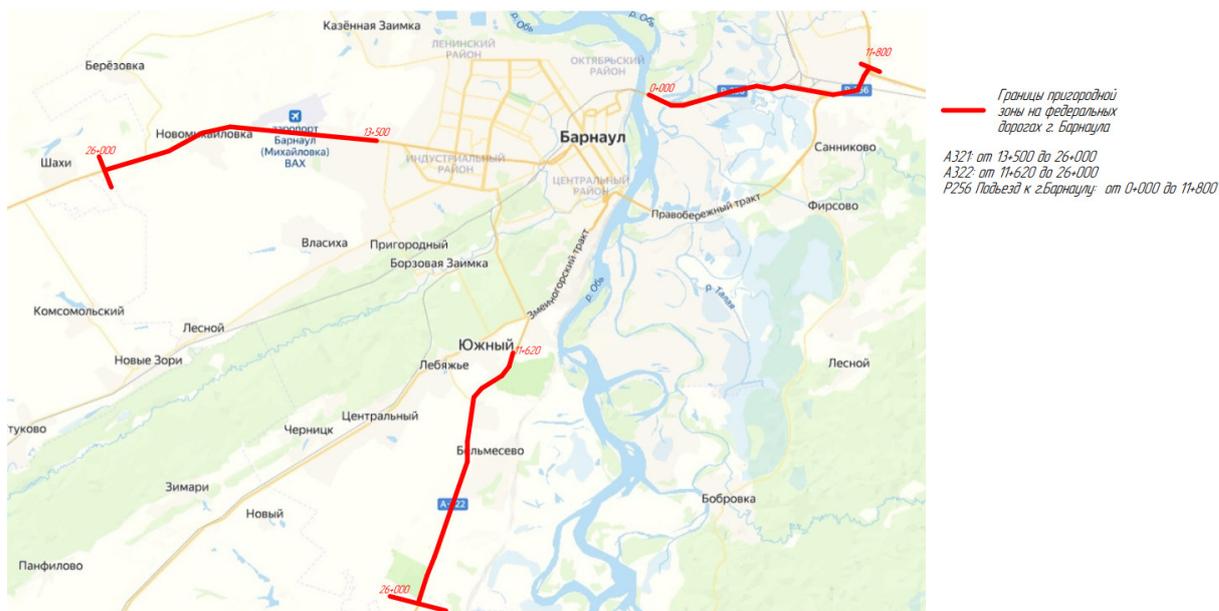


Рисунок 1 – Границы пригородной зоны г. Барнаула на автомобильных дорогах федерального значения
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Boundaries of Barnaul suburban area on federal roads
 Source: compiled by the authors.

В перечисленных и других работах [15, 16, 17] отмечается, что характер влияния основных факторов на аварийность в пригородной зоне имеет свои значимые особенности. Выполненный краткий аналитический обзор позволил подтвердить актуальность исследования условий аварийности в пригородной зоне.

Цель работы – исследование влияния факторов внешней среды на аварийность в пригородной зоне на примере г. Барнаула.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения работы первой задачей являлось определение границ пригородной зоны. Для решения данной задачи выбрана транспортная методика – по конечным остановкам транспорта, осуществляющего перевозку пассажиров, по регулярным маршрутам выявлена пригородная зона [18].

Исследование проведено на примере участков автомобильных дорог федерального значения (ФАД) в пригородной зоне г. Барнаула, выбрано три направления: в сторону с. Павловск (дорога А-321), в сторону г. Алейска, г. Рубцовска (дорога А-322), в сторону г. Новоалтайска (дорога Р-256, подъезд к

г. Барнаулу). Границы пригородной зоны г. Барнаула в соответствии с выбранным подходом представлены на рисунке 1.

Исходные данные о ДТП получены с помощью электронного сервиса stat.gibdd.ru. При обработке информации с сайта составлялась исходная таблица данных, в которой содержались следующие сведения: дата, время, вид ДТП, место (широта, долгота и адрес), км, метр, наименование дороги, число погибших, раненых. Временной период исследования 2018–2023 гг. Общая выборка составила 545 ДТП, из них с пострадавшими 173 ДТП.

В качестве причин аварийности выбрана группа основных факторов внешней среды: период суток и погодные условия.

Сведения о периоде суток в момент каждого ДТП получены с помощью слоя «Карта дня и ночи» на Яндекс. Картах. Периоды суток разделены согласно астрономическому принципу: ночь, астрономические, навигационные и гражданские сумерки, день. Такой подход выбран в связи с тем, что в период сумерек происходит значительное изменение освещенности, что оказывает значительное влияние на видимость.

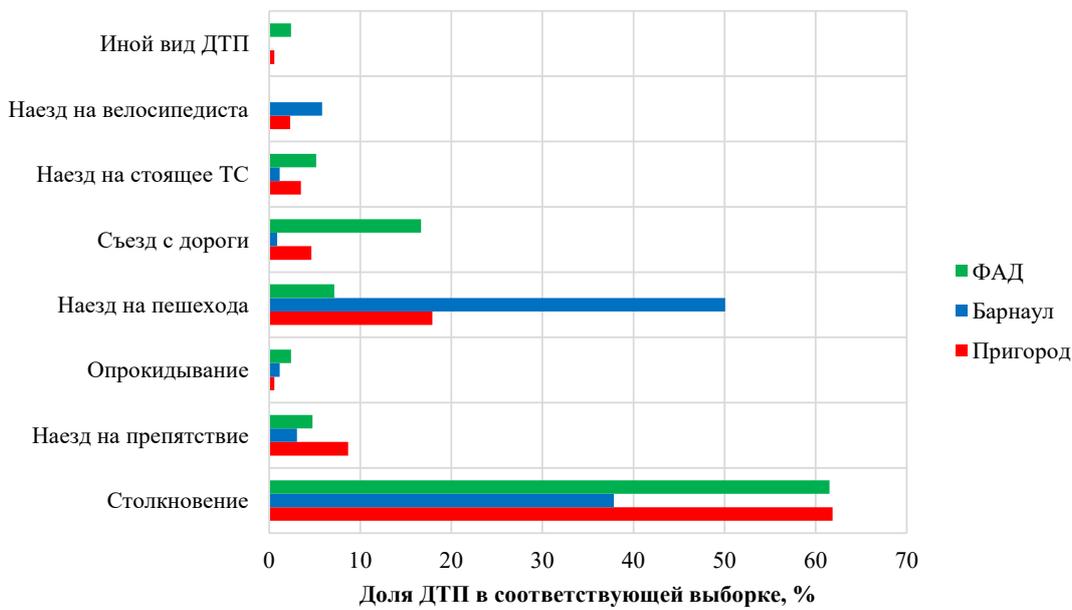


Рисунок 2 – Сравнение распределения ДТП по видам и режимам движения
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Comparison of distribution of road accidents by type and mode of travel
 Source: compiled by the authors.

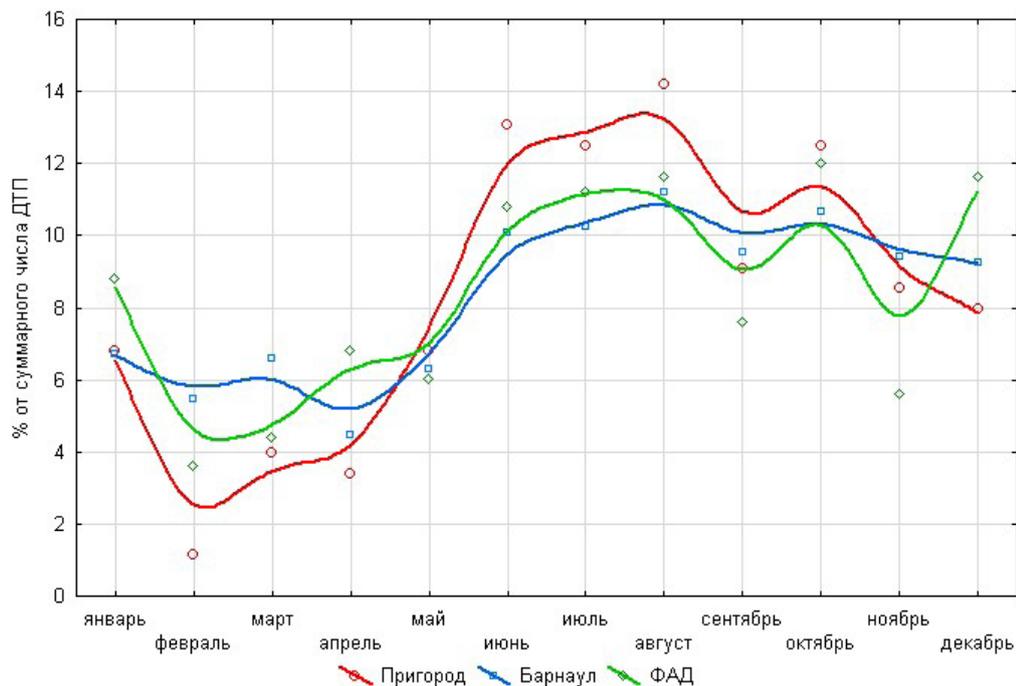


Рисунок 3 – Сравнение распределения ДТП по месяцам и режимам движения
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Comparison of distribution of road accidents by month and mode of travel
 Source: compiled by the authors.

Погодные условия в момент каждого ДТП получены с использованием архивной погодной информации. Данные получены с метеостанции Барнаул (Научный городок). Архивные данные представляли собой таблицу с набором наблюдений о температуре воздуха, 2 м над поверхностью земли; скорости ветра на высоте 10–12 м, количестве осадков, мм. Показатели измеряются на метеостанции каждые 3 ч. Для получения данных использовались сведения о дате и времени, определялось ближайшее время наблюдения и показания переносились в таблицу исходных данных.

Таким образом, набор исходных данных представлял собой таблицу данных Excel, используемый для статистической обработки.

Для анализа влияния периода суток и погодных условий применялась теория относительного риска. Основная идея использования этого подхода заключается в расчете отношения частот (частостей) исходов в группе, на которые оказывал влияние изучаемый фактор (выборка ДТП по периодам суток или выборка ДТП по погодным условиям), к частоте исходов в группе, не подвергавшихся влиянию этого фактора (среднее распределение продолжительности периодов суток согласно географическому положению или среднее распределение погодных условий согласно архивным погодным данным) [19]. Величина относительного риска является безразмерной величиной и отражает, во сколько раз изменяется риск возникновения ДТП в результате действия выбранного фактора (увеличивается, если риск более 1, уменьшается, если риск менее 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе проведено сравнение показателей аварийности в трех выборках ДТП: пригородная зона, г. Барнаул, ФАД.

Проанализированы ДТП с пострадавшими по видам ДТП. Результат представлен на рисунке 2.

Анализ показал, что в пригородной зоне доля столкновений равна аналогичной доле на ФАД (62%), однако наезды на пешеходов в пригороде занимают большую часть: 18 против 7% на ФАД, однако меньшую чем в Барнауле (50%). Полученное распределение доказывает значимое различие показателей аварийности в зависимости от режима движения.

Расчет тяжести последствий ДТП показал, что наиболее высокими значениями отличаются ДТП на ФАД: 12,6 погибших на 100 жертв

ДТП (суммарное число погибших и раненых), в пригороде эта величина составляет 9,2, в г. Барнауле – 2,7. При этом в пригороде и в г. Барнауле наибольшее число погибших отмечается при наездах на пешеходов (44 и 52% соответственно – от общего числа погибших), на ФАД – при столкновениях (68% от общего числа погибших).

Осуществлено сравнение распределений ДТП по месяцам, которое показано на рисунке 3. Проведено масштабирование данных: определен вклад каждого месяца (доля, %) в соответствующую аварийность (количество ДТП) в пригородной зоне, г. Барнауле, на ФАД. При построении графика применен метод наименьших квадратов.

Определено, что пригородная зона отличается наибольшим размахом вариации (13 против 7% в г. Барнауле и 8% на ФАД), это говорит о том, что аварийность в рассматриваемой зоне отличается выраженной сезонностью: большая часть ДТП происходит в летнее и осеннее время – период дачных работ и отпусков.

На следующем этапе проведено исследование влияния периода суток и погодных условий на риск возникновения ДТП в пригородной зоне.

Определено количество ДТП с материальным ущербом и с пострадавшими по периодам суток, вычислено процентное соотношение – частость (%). Результаты представлены в таблице.

Проверка согласованности частот с использованием критерия χ^2 показала, что в выборках ДТП с пострадавшими и ДТП с материальным ущербом нет значимых отличий. Это говорит о том, что в пригородной зоне тяжесть последствий ДТП не зависит от периода суток и при расчете относительного риска можно использовать среднее значение частоты. С помощью вычисления отношения среднего значения частоты в выборке ДТП к соответствующей частоте периода суток по географическому расположению определен относительный риск, представленный формулой.

$$R_t = \begin{cases} 1,30, t = Д, \\ 1,59, t = ГС, \\ 1,30, t = НС, \\ 0,86, t = АС, \\ 0,30, t = Н. \end{cases} \quad (10)$$

Таким образом, наибольший риск достигается в дневной период и при гражданских и навигационных сумерках. В ночное время риск снижен.

Таблица
**Распределение ДТП в пригородной зоне по периодам суток
 и географическое распределение периодов суток в г. Барнауле**
 Источник: составлено авторами.

Table
**Distribution of road accidents in the suburban area by periods
 of the day/night-time and geographical distribution of daytime and night-time in Barnaul**
 Source: compiled by the authors.

	ДТП в пригородной зоне (частость, %)		Соотношение средней продолжительности согласно географическому расположению (частость, %)
	ДТП с пострадавшими (частость, %)	ДТП с материальным ущербом (частость, %)	
День (Д)	65,34	68,11	51,13
Гражданские сумерки (ГС)	7,95	9,46	5,47
Навигационные сумерки (НС)	9,09	8,92	6,91
Астрономические сумерки (АС)	8,52	5,41	8,12
Ночь (Н)	9,09	8,11	28,36

Сравнение с результатами оценки влияния периода суток на ФАД за пределами населенных пунктов¹ показало значимые различия: в последнем случае ночью и в сумерки относительный риск возникновения ДТП был повышен, в дневное время – снижен (обратная ситуация). Такие результаты могут быть объяснены тем, что основная причина аварийности в пригородной зоне – это пересечение пешеходных потоков с транспортными потоками, автомобили в которых движутся с высокой скоростью. Такая ситуация характерна для светлого времени суток в теплое время года.

Далее проведено аналогичное исследование влияния погодных условий на риск возникновения ДТП в пригородной зоне. Выделены 3 параметра: температура воздуха, количество осадков и скорость ветра. Для вычисления частостей числовая ось метеорологического параметра разбита на интервалы по правилу Стерджесса. В выборке ДТП и в выборке архивной погодной информации определены частоты в каждом интервале, а далее соответствующие частости (%). Затем определен относительный риск с помощью вычисления отношений частостей в выборке ДТП к частостям в выборке архивной погодной информации. Результаты расчета относительного риска представлены графически в виде набора точек с координатами (x; y), где x – середина

интервала, y – значение относительного риска. На соответствующих рисунках указаны аппроксимирующие функции.

На рисунке 4 показаны результаты расчета относительного риска ДТП в зависимости от температуры воздуха.

На графике красными маркерами выделены экстремумы (максимумы) функции в области отрицательных и положительных значений температуры воздуха. Первый локальный максимум наблюдается в области слабо отрицательных значений (переходная температура около 0 °С), что соответствует гололедным явлениям. В области положительных значений риск увеличивается после 15 °С (относительный риск более 1) и достигает максимума при температуре около 25 °С. При сравнении полученных результатов с ранее проведенными исследованиями на примере ФАД за пределами населенных пунктов [20] можно сделать вывод о том, что характер влияния температуры в пригороде и за пределами населенных пунктов похож, но имеет свои особенности. Наиболее значимой особенностью является отсутствие роста относительного риска при экстремально высоких значениях температуры. Это связано с уменьшением интенсивности пешеходного потока.

На рисунке 5 представлены результаты аналогичных расчетов по параметру – количество накопленных осадков.

¹ Печатнова Е. В. Методика обеспечения безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах федерального значения: специальность 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Печатнова Елена Владимировна. Омск, 2021. 171 с.

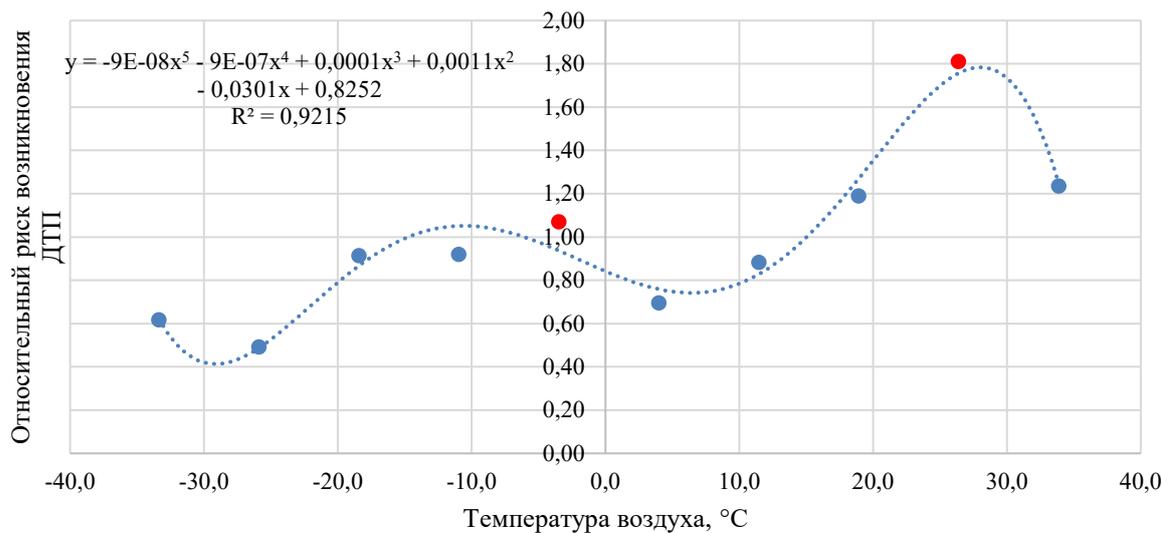


Рисунок 4 – Относительный риск возникновения ДТП в зависимости от температуры воздуха
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Relative risk of road accidents depending on air temperature
Source: compiled by the authors.

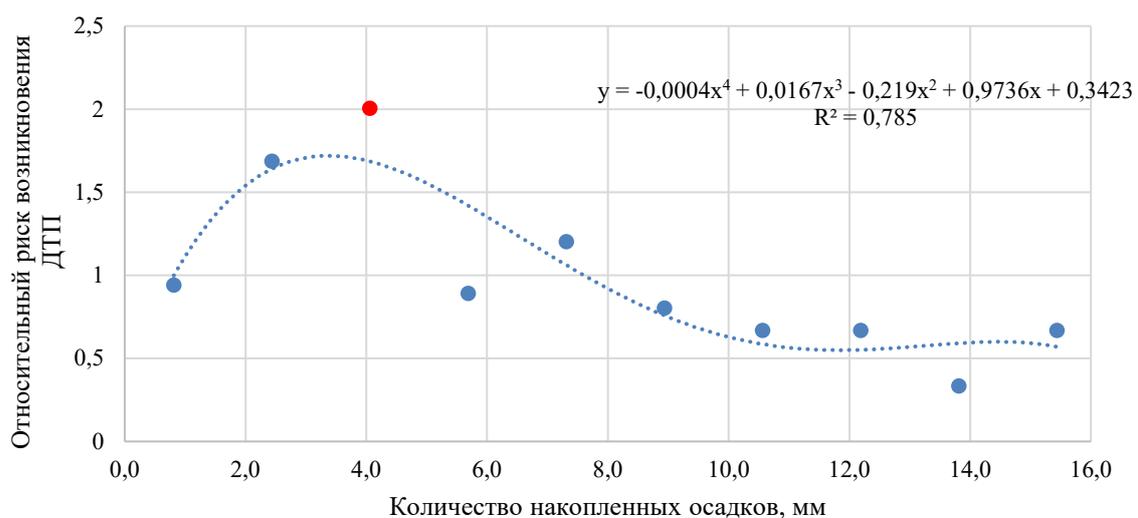


Рисунок 5 – Относительный риск возникновения ДТП в зависимости от количества осадков
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Relative risk of road accidents depending on the amount of precipitation
Source: compiled by the authors.

В данном случае наблюдается один максимум (выделен красным цветом) – около 4 мм, далее отмечается снижение величины относительного риска, при количестве осадков менее 8 мм риск снижается. Сравнение с ранее проведенными исследованиями [20] также показало сходство влияния количества осадков на относительный риск возникновения ДТП, однако в пригородной зоне отсутствует рост его

значений в период экстремальных осадков, что также может быть объяснено снижением транспортной и пешеходной интенсивности движения и соответствующим кратным снижением числа конфликтных ситуаций.

На рисунке 6 даны результаты расчета относительного риска возникновения ДТП в пригородной зоне в зависимости от скорости ветра.

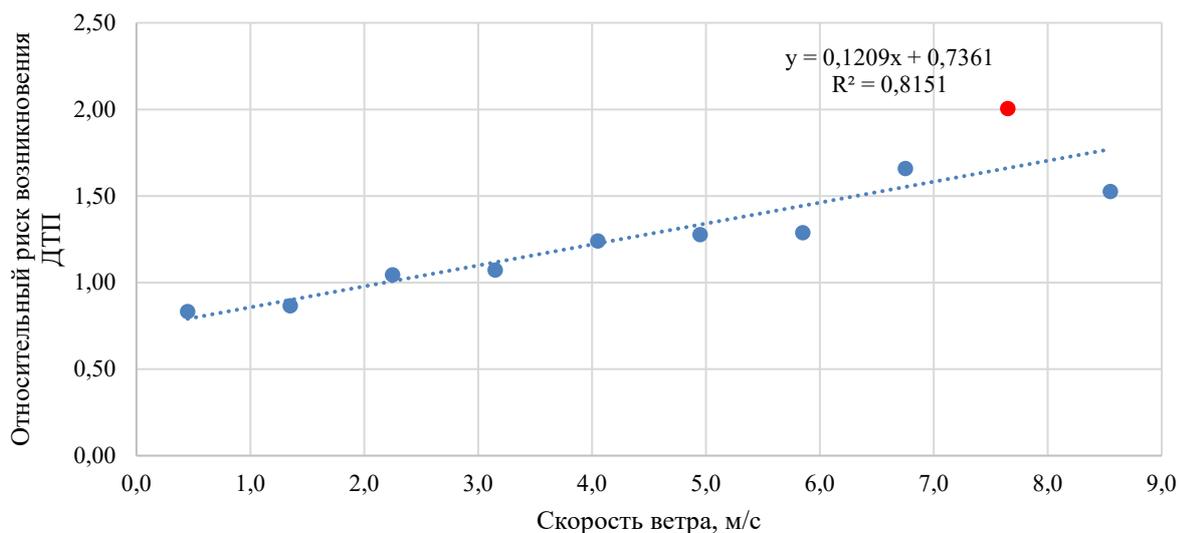


Рисунок 6 – Относительный риск возникновения ДТП в зависимости от скорости ветра
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Relative risk of road accidents depending on wind speed
Source: compiled by the authors.

Анализ влияния скорости ветра показал, что на выделенной части оси рассматриваемого метеорологического параметра полученные точки можно аппроксимировать прямой, это свидетельствует о том, что относительный риск растет с увеличением скорости ветра. При этом рост риска ДТП отмечается при скорости ветра более 2 м/с. Сравнивая полученные результаты с результатами на ФАД вне населенных пунктов [20], можно сделать выводы, аналогичные предыдущим – характер влияния в целом похож, однако при экстремально высоких значениях скорости ветра ДТП в пригородной зоне не характерны.

Обобщая результаты исследования влияния погодных условий на риск возникновения ДТП в пригородной зоне, можно отметить, что наиболее опасными являются период переходной температуры, связанный с гололедными явлениями, после выпадения осадков и в ветреную погоду, а также период, характеризующийся положительной температурой около 25 °С, дождем с количеством осадков до 8 мм и скоростью ветра более 2 м/с. В период нетипично высоких значений температуры воздуха, осадков и ветра увеличение относительного риска не наблюдается.

В связи с тем, что относительный риск является безразмерной независимой величиной, можно учитывать совокупное влияние рассматриваемых факторов, используя произведе-

ние соответствующих значений относительного риска.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило выделить ряд особенностей формирования аварийности в пригородной зоне. Среди них выраженная сезонность, структура аварийности, представленная большим числом столкновений и наездов на пешеходов, достаточно высокая тяжесть последствий ДТП. Исследование влияния группы основных факторов внешней среды позволило выделить основные критические периоды, при которых риск возникновения ДТП повышается: это дневное время, гражданские или навигационные сумерки при переходной температуре воздуха (около 0 °С), гололедных явлениях, ветреной погоде или при температуре воздуха около 25 °С, дождливой, ветреной погоде. В отличие от участков за пределами населенных пунктов не выявлено влияния экстремальных погодных условий на увеличение риска возникновения ДТП в пригородной зоне.

Представленные результаты доказывают, что пригородная зона отличается определенными особенностями, которые должны учитываться при планировании мероприятий по снижению аварийности. Проведение превентивных мероприятий на небольших по протяженности пригородных участках позволит зна-

чительно сократить аварийность [21]. Помимо традиционных методов, включающих превентивные мероприятия, проводимые сотрудниками Госавтоинспекции, в пригородной зоне следует уделить особое внимание методам косвенного управления транспортными потоками, в частности, применению динамических информационных табло и знакам переменной информации. Эти средства могут использоваться целенаправленно, в период увеличивающегося риска возникновения ДТП.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Xu Cheng, Zhang Zuoming, Fu Fengjie, Yao Wenbin, Su Hongyang, Hu Youwei, Donglei Rong, Jin Sheng. Analysis of Spatiotemporal Factors Affecting Traffic Safety Based on Multisource Data Fusion. *Journal of Transportation Engineering Part A Systems*. 2023; 149 (10). <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.TEENG-7990>.
2. Asadi Mehrnaz, Ulak Mehmet, Geurs Karst, Weijermars Wendy, Schepers, Paul. A comprehensive analysis of the relationships between the built environment and traffic safety in the Dutch urban areas. *Accident Analysis & Prevention*. 2022; 172. 106683. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106683>.
3. Zargari Shahriar, Abdolahi Saeid, Mirzahosseini Hamid. Prediction of Traffic Flow Based on Calendar Data on Suburban Roads (Case Study: Chalus Road). *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2024. 48. <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01393-x>.
4. Печатнова Е.В., Нечаев К.С. Факторы формирования аварийно-опасных участков на автомобильных дорогах федерального значения // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2023. Т. 20, № 1(89). С. 92–101. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-92-101>.
5. Zhuang Zhixi. Suburban Migration: Interrogating the Intersections of Global Migration and Suburban Transformation. In: Triandafyllidou, A., Moghadam, A., Kelly, M., Şahin-Mencütek, Z. (eds) *Migration and Cities*. IMISCOE Research Series. Springer, Cham. 2024 https://doi.org/10.1007/978-3-031-55680-7_12.
6. Liu C. Y., Jeong J. Are minority-owned businesses moving to suburbs? Intrametropolitanspatial shifts and their causes. *Journal of Small Business & Entrepreneurship*. 2022; 36(4): 574–598. <https://doi.org/10.1080/08276331.2022.2040332>.
7. Fernández Herman, Rubio L., Peñarrocha Vicent, Reig, J. Dual-Slope Path Loss Model for Integrating Vehicular Sensing Applications in Urban and Suburban Environments. *Sensors*. 2024; 24. 4334. <https://doi.org/10.3390/s2413433>.
8. Овчарова Д.А., Жуковский Р.С. Субурбанизация города Барнаула: ретроспективный обзор и прогноз развития // *Архитектон: известия вузов*. 2022. № 3(79). [https://doi.org/10.47055/1990-4126-2022-3\(79\)-7](https://doi.org/10.47055/1990-4126-2022-3(79)-7).
9. Серебренников Е.Н. Транспортный фактор в субурбанизационных процессах Иркутской агломерации // *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле*. 2023. Т. 43. С. 91–101. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.43.91>.
10. Григоричев К.В. Специфика смертности населения в субурбанизированной зоне (случай пригородного района Иркутской агломерации) // *Демографическое обозрение*. 2023. Т. 10, № 3. С. 82–102. <https://doi.org/10.17323/demreview.v10i3.17971>.
11. Abolvardi Meisam, Sharifi Nader, Rahmadian Karamatolah, Rahmanian Vahid. Human Risk Factors for Severity of Injuries in Urban and Suburban Traffic Accidents in Southern Iran: An Insight from Police Data. *International Journal of High Risk Behaviors and Addiction*. 2023;11. <https://doi.org/10.5812/ijhrba-129419>.
12. Klaylee Jirawan, Iamtrakul Pawinee, Sornlertlamvanich Virach. Identification of Suburban Motorcycle Traffic Accident Hotspots Using GIS-Based Spatial Analysis. // 10th International Conference on Traffic and Logistic Engineering: Macau, China. 2022; pp 35–40. <https://doi.org/10.1109/ICTLE55577.2022.9902103>.
13. Yari Samira, Abdolmanafi Seyed Ebrahim, Sarkar Alireza, Ebrahimzadeh Mohammad. Identifying the parameters affecting the severity of accidents in suburban roads using structural equation modeling (Kerman province case study) // *Conference: 19th International Conference on Transportation and Traffic Engineering At: Tehran*. 2023. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/374081400_Identifying_the_parameters_affecting_the_severity_of_accidents_in_suburban_roads_using_structural_equation_modeling_Kerman_province_case_study (дата обращения 02.06.2024).
14. Ghasedi M., Sarfjoo M., Bargegol I. Prediction and Analysis of the Severity and Number of Suburban Accidents Using Logit Model, Factor Analysis and Machine Learning: A case study in a developing country. *SN Appl. Sci*. 2021; 3(13). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04081-3>.
15. Hasani J., Khorshidi A., Erfanpoor S., Nazparvar B., Hashemi Nazari S. S. Comparison of Risk Factors for Pedestrian Fatality in Urban and Suburban Traffic Accidents. *Archives of Trauma Research*. 2018; 7(2): 39–44. https://doi.org/10.4103/atr.atr_7_18.
16. Bowman B.L., Vecellio R.L. Effect of urban and suburban median types on both vehicular and pedestrian safety. *Transportation research record*. 1994; 1445: 169–179.
17. Khorasani Gholamreza, Tatari Ashkan, Motamed Hassan, Fazelpour Shokooh. Prioritization of Suburban Road Safety Plans in Iran // *Journal of American Science*. 2013; 9(7s): 1–10.
18. Яковлева С.И., Воронежцев И.С. Пригороды тверских городов // *Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология*. 2016. № 2. С. 77–90.
19. Печатнова Е.В., Новиков И.А., Кирюшин И.И., Шаталов Е.В. Влияние периода суток

на риск возникновения наезда на пешехода // Воронежский научно-технический Вестник. 2023. Т. 3, № 3(45). С. 60–66. <https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-3-3-60-66>.

20. Pechatnova E.V., Sergeeva J.S. Assessment of Influence of Meteorological Parameters on the Risk of Accidents on Roads Outside Settlements // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. P. 022175. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/2/022175>.

21. Sayed Abbas Tabatabaee, Bahram Johari Providing a Model in Order to Transportation Safety in Accident Black Spots in Suburban Roads from Economical Optimizing Point of View. IACSIT International Journal of Engineering and Technology. 2012; 4(1): 93–96.

REFERENCES

- Xu Cheng, Zhang Zuoming, Fu Fengjie, Yao Wenbin, Su Hongyang, Hu Youwei, Donglei Rong, Jin Sheng. Analysis of Spatiotemporal Factors Affecting Traffic Safety Based on Multisource Data Fusion. *Journal of Transportation Engineering Part A Systems*. 2023; 149 (10). Doi:10.1061/JTEPBS.TEENG-7990.
- Asadi Mehrnaz, Ulak Mehmet, Geurs Karst, Weijermars Wendy, Schepers, Paul. A comprehensive analysis of the relationships between the built environment and traffic safety in the Dutch urban areas. *Accident Analysis & Prevention*. 2022; 172. 106683. Doi:10.1016/j.aap.2022.106683.
- Zargari Shahriar, Abdolahi Saeid, Mirzahosseini Hamid. Prediction of Traffic Flow Based on Calendar Data on Suburban Roads (Case Study: Chalus Road). *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2024. 48. <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01393-x>.
- Pechatnova E.V., Nechaev K.S. Factors for traffic accident-prone section formation on federal roads. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023;20(1):92-101. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-92-101>
- Zhuang Zhixi. Suburban Migration: Interrogating the Intersections of Global Migration and Suburban Transformation. In: Triandafyllidou, A., Moghadam, A., Kelly, M., Şahin-Mencütek, Z. (eds). *Migration and Cities*. IMISCOE Research Series. Springer, Cham. 2024 https://doi.org/10.1007/978-3-031-55680-7_12.
- Liu C. Y., Jeong J. Are minority-owned businesses moving to suburbs? Intrametropolitanspatial shifts and their causes. *Journal of Small Business & Entrepreneurship*. 2022; 36(4): 574–598. <https://doi.org/10.1080/08276331.2022.2040332>.
- Fernández Herman, Rubio L., Peñarrocha Vicent, Reig, J. Dual-Slope Path Loss Model for Integrating Vehicular Sensing Applications in Urban and Suburban Environments. *Sensors*. 2024; 24. 4334. (in Russ.) <https://doi.org/10.3390/s2413433>.
- Ovcharova D.A., Zhukovsky R.S. Suburbanization of barnaul city: a retrospective review and development forecast. Architecton. Proceedings of higher education. 2022; 3(79). (in Russ.) [https://doi.org/0.47055/1990-4126-2022-3\(79\)-7](https://doi.org/0.47055/1990-4126-2022-3(79)-7).
- Serebrennikov E.N. Transport Factor in the Suburbanization Processes of the Irkutsk Agglomeration. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2023, vol. 43, pp. 91-101. (in Russ.) <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.43.91> (in Russ.)
- Grigorichev G.V. Distinctive features of mortality in the suburban population (the case of the Irkutsk agglomeration). *Demographic Review*. 2023; T. 10, no 3: 82-102. (in Russ.) <https://doi.org/10.17323/demreview.v10i3.17971>.
- Abolvardi Meisam, Sharifi Nader, Rahmanian Karamatolah, Rahmanian Vahid. Human Risk Factors for Severity of Injuries in Urban and Suburban Traffic Accidents in Southern Iran: An Insight from Police Data. *International Journal of High Risk Behaviors and Addiction*. 2023;11. <https://doi.org/10.5812/ijhrba-129419>.
- Klaylee Jirawan, lamtrakul Pawinee, Sornlertlamvanich Virach. Identification of Suburban Motorcycle Traffic Accident Hotspots Using GIS-Based Spatial Analysis. *10th International Conference on Traffic and Logistic Engineering: Macau, China*. 2022; pp 35-40. <https://doi.org/10.1109/ICTLE55577.2022.9902103>.
- Yari Samira, Abdolmanafi Seyed Ebrahim, Sarkar Alireza, Ebrahimzadeh Mohammad. Identifying the parameters affecting the severity of accidents in suburban roads using structural equation modeling (Kerman province case study). *Conference: 19th International Conference on Transportation and Traffic Engineering At: Tehran*. 2023. Available at: https://www.researchgate.net/publication/374081400_Identifying_the_parameters_affecting_the_severity_of_accidents_in_suburban_roads_using_structural_equation_modeling_Kerman_province_case_study (accessed 02.06.024).
- Ghasedi M., Sarfjoo M., Bargegol I. Prediction and Analysis of the Severity and Number of Suburban Accidents Using Logit Model, Factor Analysis and Machine Learning: A case study in a developing country. *SN Appl. Sci*. 2021; 3(13). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04081-3>.
- Hasani J., Khorshidi A., Erfanpoor S., Nazparvar B., Hashemi Nazari S. S. Comparison of Risk Factors for Pedestrian Fatality in Urban and Suburban Traffic Accidents. *Archives of Trauma Research*. 2018; 7(2): 39-44. https://doi.org/10.4103/atr.atr_7_18.
- Bowman B. L., Vecellio R. L. Effect of urban and suburban median types on both vehicular and pedestrian safety. *Transportation research record*. 1994; 1445: 169–179.
- Khorasani Gholamreza, Tatari Ashkan, Motamed Hassan, Fazelpour Shokoo. *Prioritization of Suburban Road Safety Plans in Iran Journal of American Science*. 2013; 9(7s): 1-10. (in Russ.)
- Yakovleva S.I., Voronezhcev I.S. Suburban areas of the Tver region. *Herald of Tver State University. Series: geography and geocology*. 2016; 2: 77–90. (in Russ.)
- Pechatnova E.V., Novikov I.A., Kiryushin I.I., Shatalov E.V. Influence of day period on the risk of

pedestrian crashes. *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. 2023; Т. 3, no 3(45): 60-66. (in Russ.) <https://doi.org/10.34220/23111-8873-2023-3-3-60-66>. (in Russ.)

20. Pechatnova E.V., Sergeeva J.S. Assessment of Influence of Meteorological Parameters on the Risk of Accidents on Roads Outside Settlements. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. P. 022175. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/2/022175>.

21. Sayed Abbas Tabatabaee, Bahram Johari Providing a Model in Order to Transportation Safety in Accident Black Spots in Suburban Roads from Economical Optimizing Point of View. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*. 2012; 4(1): 93–96.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Печатнова Е.В. Вклад в общую работу составил 25%, что является ¼ доли при разработке следующих разделов научной статьи: аннотации, введения, материалов и методов, результатов, обсуждения и заключения.

Новиков И.А. Вклад в общую работу составил 25%, что является ¼ доли при разработке следующих разделов научной статьи: аннотации, введения, результатов, обсуждения и заключения.

Кiryushin И.И. Вклад в общую работу составил 25%, что является ¼ доли при разработке следующих разделов научной статьи: аннотации, введения, материалов и методов, результатов, обсуждения и заключения.

Нагорный Н.Н. Вклад в общую работу составил 25%, что является ¼ доли при разработке следующих разделов научной статьи: аннотации, введения, материалов и методов, результатов, обсуждения и заключения.

CO-AUTHORS' CONTRIBUTION

Pechatnova E.V. The contribution to the work is at least 25% that is ¼ share in developing the following sections of the scientific article: summaries, introductions, materials and methods, results, discussion and conclusion.

Novikov I.A. The contribution to the work is at least 25%, which is ¼ share in developing the following sections of the scientific article: annotation, introduction, results, discussion and conclusion.

Kiryushin I.I. The contribution to the work is at least 25% that is ¼ share in developing the following sections of the scientific article: summaries, introductions, materials and methods, results, discussion and conclusion.

Nagorny N.N. The contribution to the work is at least 25% that is ¼ share in developing the following sections of the scientific article: summaries, introductions, materials and methods, results, discussion and conclusion.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Печатнова Елена Владимировна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Организация и безопасность

движения» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова (656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46), Scopus Author ID: 57209793331, Researcher ID: AAD-3356-2022, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9182-2365>, SPIN-код:1548-3254, e-mail: phukcia@yandex.ru

Новиков Иван Алексеевич – д-р техн. наук, проф., директор Транспортно-технологического института Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), Scopus Author ID: 7202658080, Researcher ID: T-5540-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5322-9640>, SPIN-код: 7590-0779, e-mail: ooows@mail

Кiryushin Иван Иванович – ст. преп. кафедры «Информатика и специальная техника» Барнаульского юридического института МВД России (656038, г. Барнаул, ул. Чкалова, 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6783-4048>, SPIN-код: 7893-0653, e-mail: kii22@rambler.ru

Нагорный Николай Николаевич – канд. филос. наук, доц., доц. кафедры «Гуманитарные и социально-экономические дисциплины» Сибирского юридического института МВД России (660131, г. Красноярск, ул. Рокоссовского, д. 20), Researcher ID: AAP-2298-2020, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0878-3842>, SPIN-код: 7134-4585, e-mail: nnagornyj@yandex.ru

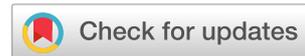
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Elena V. Pechatnova – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Organization and Road Safety Department, Polzunov Altai State Technical University (The Altai Territory, Barnaul, Lenin Avenue, 46, 656038), Scopus Author ID: 57209793331, Researcher ID: AAD-3356-2022, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9182-2365>, SPIN-код: 1548-3254, e-mail: phukcia@yandex.ru

Ivan A. Novikov – Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Director of the Transportation Technology Institute, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Belgorod, 46 Kostyukova str. 308012), Scopus Author ID: 7202658080, Researcher ID: T-5540-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5322-9640>, SPIN-код: 7590-0779, e-mail: ooows@mail

Ivan I. Kiryushin – Senior lecturer of the Department of Informatics and Special Equipment, Barnaul Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (Barnaul, Chkalova str., 49, 656038), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6783-4048>, SPIN-код: 7893-0653, e-mail: kii22@rambler.ru

Nikolay N. Nagorny – Cand. of Sci. (Philosophy), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Humanities and Socio-Economic Disciplines, Siberian Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (Krasnoyarsk, 20 Rokossovskogo St., 660131), Researcher ID: AAP-2298-2020, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0878-3842>, SPIN-код: 7134-4585, e-mail: nnagornyj@yandex.ru



ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРОТ ИНТЕРВАЛОВ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГНОЗА ИНТЕНСИВНОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

И.Н. Пугачев¹, Н.Г. Шешера² ✉, Д.Е. Григоров³

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Хабаровский федеральный исследовательский центр
Дальневосточного отделения Российской академии наук (ХФИЦ ДВО РАН),
г. Хабаровск, Россия

^{2,3}Дальневосточный юридический институт МВД России имени И.Ф. Шилова
(ДВЮИ МВД России имени И.Ф. Шилова),
г. Хабаровск, Россия

✉ ответственный автор
kolyaka239@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Сложная система взаимодействия характеристик системы Водитель-Автомобиль-Дорога-Среда (ВАДС) является предметом исследований ученых всего мира. Если объяснить закономерности явлений, присутствующих при совершении ДТП, то можно смоделировать некоторые транспортные процессы. Для этого необходимо рассмотреть большое количество признаков, разделяя их на статические и динамические. Особое внимание уделяется последним, из-за нестабильности состояния характеристик. К этой категории относятся интенсивность транспортного потока и погодные условия. Существует немало методов по повышению точности прогностических моделей, но такой применяется впервые. Главная особенность данного метода – логическая и статистическая обоснованность автоматизации подбора широт интервалов. Это необходимо не только для группировки признаков, но и для повышения их значения при совместном анализе. Например, для интенсивности транспортных потоков ширина может быть 100 авт/час (0-100, 101-200, 201-300 и т.д.), но она не будет эффективна с прогностической точки зрения для ширины интервала температуры воздуха 5°C (-25 - -20, -19 -15, -14 - 10 и т.д.). Соответственно, целью работы стало определение эффективных прогностических широт интервалов интенсивности транспортного потока (зависимый признак) и погодных условий (независимые признаки).

Материалы и методы. Данная работа является продолжением большого проекта по повышению безопасности дорожного движения, в котором уже проводились подобные исследования, для определения эффективных широт интервалов с использованием ранговой корреляции Спирмена. Установлены значения, при которых температурные режимы (воздуха, почвы и точки росы) лучше всего описывают интенсивность транспортного потока. Для комплексной характеристики потребовалось провести дополнительный анализ оставшихся независимых признаков. Созданы новые алгоритмические структуры с использованием языка программирования Python, в которых последовательно сравнивались установленные широты интервалов признаков таким образом, чтобы отработать все возможные их комбинации. Каждый результат подвергался корреляционному анализу, и рассчитывалась вероятность ошибки.

Результаты. В результате экспериментального подбора широт интервалов определены самые эффективные из них. Критерием отбора стал последующий корреляционный анализ. Принимались значения коэффициента больше 0,7 или меньше -0,7. Также рассчитывалась вероятность ошибки, принимались значения меньше 0,05. Таким образом, получено большое количество комбинаций, отвечающих необходимым условиям. Далее для каждого признака подобрана та ширина интервала, при которой она чаще встречается с другими, а в случае одинакового количества встреч является наименьшей из них.

Заключение. В результате проделанной работы определены эффективные широты интервалов, в которых анализировались исследуемые признаки. Эта работа в последующих трудах способствовала качественному обучению модели. Благодаря чему была создана программа по прогнозу интенсивности транспортного потока, зависящей от показателей погодных условий, с использованием нейронных сетей.

© Пугачев И.Н., Шешера Н.Г., Григоров Д.Е., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автомобиль, ранговая корреляция Спирмена, погодные условия, интенсивность транспортного потока, эффективные широты интервалов, вероятность ошибки

БЛАГОДАРНОСТИ: выражаем благодарность рецензентам за объективный подход к оценке нашей работы.

Статья поступила в редакцию 24.06.2024; одобрена после рецензирования 20.08.2024; принята к публикации 17.10.2024.

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: Пугачев И.Н., Шешера Н.Г., Григоров Д.Е. Исследование широт интервалов признаков для повышения эффективности прогноза интенсивности транспортного потока // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 5. С. 726-735. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-726-735>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-726-735>

EDN: LZMYE

STUDY OF THE INTERVAL WIDTH OF FEATURES FOR IMPROVING FORECASTING EFFICIENCY OF THE TRANSPORT FLOW INTENSITY

Igor N. Pugachev¹, Nikolay G. Sheshera² ✉, Denis Ye. Grigorov³

¹Federal State Budgetary Institution of Science

Khabarovsk Federal Research Center

Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

(KhFRC FEB RAS),

Khabarovsk, Russia

^{2,3}Far Eastern Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia named after I.F. Shilov

(FELI MIA of Russia named after I.F. Shilov),

Khabarovsk, Russia

✉ corresponding author

kolyaka239@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The complicated system of characteristic interaction between the Driver-Car-Road-Environment (DCRE) is the research subject for the scientists around the world. If we explain the patterns of phenomena present during road accidents, we will be able to model some transport processes. To do this, we need to consider a large number of characteristics, dividing them into static and dynamic. Particular attention is paid to the latter, due to the instability of the features. This category includes traffic flow intensity and weather conditions. There are a lot of methods for increasing the accuracy of predictive models, but this method has been used for the first time. Logical and statistical validity of the selection automation of interval ranges are the main feature of this method. This is necessary not only for grouping features, but also for increasing their value in a joint analysis. For example, for the intensity of traffic flows the index number can be 100 vehicles/hour (0-100, 101-200, 201-300, etc.), but it will not be effective from a prognostic point of view for the temperature interval index of 5°C (-25 - -20, -19 -15, -14 - 10, etc.). Accordingly, the goal of the work was to determine the effective forecasting of the interval's width of traffic flow intensity (dependent feature) and weather conditions (independent features).

Materials and methods. This work is a continuation of a large project on improving road traffic safety, in which similar studies have already been conducted to determine the effective interval coefficients using Spearman's rank correlation. The values at which temperature regimes (air, soil and dew point) best describe the intensity of the traffic flow were established. For a comprehensive characterization, additional analysis was necessary to conduct of the remaining independent features. New algorithmic structures were created using the Python programming language, in which the established feature interval ranges were sequentially compared in such a way as to process all possible combinations. Each result was subjected to correlation analysis, and the probability of error was calculated.

© Pugachev I.N., Sheshera N.G., Grigorov D.Ye., 2024



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

Results. As a result of the experimental selection of interval ranges, the most effective of them were determined. The selection criterion was the subsequent correlation analysis. The coefficient values greater than 0.7 or less than -0.7 were accepted. The probability of error was also calculated, and values less than 0.05 were accepted. Thus, a large number of combinations were obtained that meet the necessary conditions. Further, for each feature, the interval width was selected at which it is more often intersected with others, and in the case of the same number of intersections, it is the smallest of them.

Conclusion. As a result, effective interval widths were determined in which the investigated features had been analyzed. This study in subsequent works contributed to the high-quality training of the model using the deep learning method. Thanks to this research, a program to predict the intensity of the traffic flow, depending on weather conditions with using neural networks was created.

KEYWORDS: vehicle, Spearman's rank correlation, weather conditions, traffic flow intensity, effective interval width, error probability

ACKNOWLEDGEMENTS: we express our gratitude to the reviewers for their objective approach to evaluating our work.

The article was submitted: 24.06.2024; approved after reviewing: 20.08. 2024; accepted for publication: 17.10. 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. Pugachev I.N., Sheshera N.G., Grigorov D.Ye. The study of the interval width of features for improving forecasting efficiency of the transport flow intensity. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2024; 21 (5): 726-735. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-726-735>

ВВЕДЕНИЕ

Система ВАДС представляет собой взаимодействие между водителем, автомобилем, дорогой и окружающей средой в процессе функционирования улично-дорожной сети (УДС)¹ [1].

Водитель – центральный элемент системы ВАДС. Это человек, который управляет автомобилем и принимает решения на дороге. От его навыков и знаний зависит безопасность всех участников дорожного движения.

Автомобиль в системе ВАДС играет роль транспортного средства, обладающего определенными характеристиками и техническим состоянием.

Дорога – это инфраструктура, предназначенная для движения автомобилей. В рамках системы ВАДС дорога должна быть правильно размечена, освещена и обозначена, чтобы обеспечить информированность водителей и их безопасность.

Среда в системе ВАДС является важным аспектом безопасности и эффективности дорожного движения. Окружающая обстановка может создавать различные условия, которые влияют на поведение водителя, состояние автомобиля и безопасность на дороге в целом.

Одно из основных влияний среды – это погодные условия. Дождь, снег, гололед, туман

и другие атмосферные явления могут существенно ограничить видимость и усложнить управление автомобилем. Водители не всегда способны адаптировать свой стиль вождения к текущим условиям. Подверженность шуму и длительное воздействие загрязненного воздуха могут оказывать негативное влияние на здоровье [2].

Сложно организованная система факторов ВАДС определяет статические и динамические, главные и второстепенные признаки. Взаимодействие между ними может затруднить понимание и изучение причинно-следственных связей, так как эффект одного фактора может проявляться только при наличии или влиянии других. Примером может служить направление и скорость ветра. Вторым является главным признаком, без которого не может существовать первый.

В таких случаях роль статистического анализа и моделирования становится важной. С помощью этих методов можно определить силу влияния каждого фактора на итоговый результат.

Закономерности взаимодействия характеристик УДС и погодных условий сложны, и понимание их может быть непростой задачей. Дополнительные исследования и эксперименты необходимы для углубленного изучения

¹ Бабков В. Ф. Дорожные условия и безопасность движения: учебник для вузов. М.: Транспорт, 1993. 271 с.

сложных связей системы ВАДС [3, 4, 5]. Поэтому работа актуальна с научной и практической точки зрения. Главной ее особенностью является повышение качества прогностической модели на стадии подготовки данных. Цель работы – определение эффективных прогностических широт интервалов интенсивности транспортного потока (зависимый признак) и погодных условий (независимые признаки).

Забегая вперед, стоит отметить, что конечная цель была охарактеризовать и обобщить интенсивность транспортного потока с позиции погодных условий. Этого удалось добиться с использованием методов машинного обучения [6]. Благодаря качественной подготовке данных, была сформирована точная прогностическая модель. Одной из таких подготовок является анализ широт интервалов интенсивности транспортного потока и погодных условий.

Исследования подобного рода были проведены ранее [7]. Определены эффективные широты прогностических интервалов для совокупности признаков интенсивности транспортных потоков и температурных режимов (температура воздуха, почвы и точки росы). В данной работе представлена алгоритмическая концепция широт интервалов остальных показателей погодных условий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования был собран большой объем статистических данных в часовых интервалах времени с 2016 по 2021 г.

Интенсивность транспортного потока рассчитана с использованием программно-аппаратного комплекса Интегра-КДД. Исследования проводились в г. Хабаровске, на территории которого ввели в эксплуатацию 107 рубежей контроля автомобильного потока данного комплекса, с них и были получены данные. Автоматизированный подход предусматривает фиксацию каждого автомобиля, проехавшего через рубеж контроля видеокamеры по государственному регистрационному знаку, принимая его за единицу без разделения по видам транспорта. Этот недостаток нивелируется высокой точностью подсчета транспортных средств. Все учтенные автомобили с 2016 по 2021 г. были сгруппированы в часовых интервалах, что позволило сформировать базу данных более чем из 500 тыс. записей. Записи несли информацию не только

об интенсивности транспортного потока, но и о геометрических элементах дорог, в которых функционировали рубежи контроля.

Погодные условия предоставлены Департаментом Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды по Дальневосточному федеральному округу с метеорологической станции Хабаровск.

Перед обработкой данных потребовалась нормализация значений для использования их в унифицированной шкале или бинаризации [8, 9]. Методом изолированного леса проведена очистка от случайных выбросов, интерполированы значения в часовых интервалах времени, соединены данные с различных информационных ресурсов [9].

Было решено определить эффективные широты интервалов зависимого и независимых признаков методом автоматизированного подбора и аналитического сравнения признаков с использованием ранговой корреляции Спирмена [10, 11]. Суть выбранного метода заключается в определении признаков рангов в порядке возрастания для интервалов. По ним исследуемые факторы сравниваются друг с другом [12]. Для автоматизации на языке программирования Python был написан алгоритм циклического сравнения рангов [13]. В цикле определяется коэффициент корреляции (ранговая корреляция) между признаками. Каждый последующий цикл изменяет ширину одного признака, и исследование проводится повторно. Широты интервалов заранее были подготовлены в виде списка. После окончания списка одного признака начинался список другого. Таким образом, каждая ширина интервала сравнивалась со всеми другими во всех возможных комбинациях. На каждом цикле определялся не только коэффициент корреляции, но и вероятность ошибки (p) [14].

Для демонстрации эффективности исследований использована выборка из массива данных (Restruct_25.xlsx) с рубежа контроля 1311 пересечения улиц Муравьева Амурского – Дзержинского г. Хабаровска, содержащая 8115 записей об интенсивности и погодных условиях в период и в пределах работы камеры в часовых интервалах времени (рисунок 1).

Программная реализация исследования осуществлена в среде разработки PyCharm на языке программирования Python. Полный код приведен на портале GitHub².

² GitHub. https://github.com/glowfisch8lan/spearman_analysis

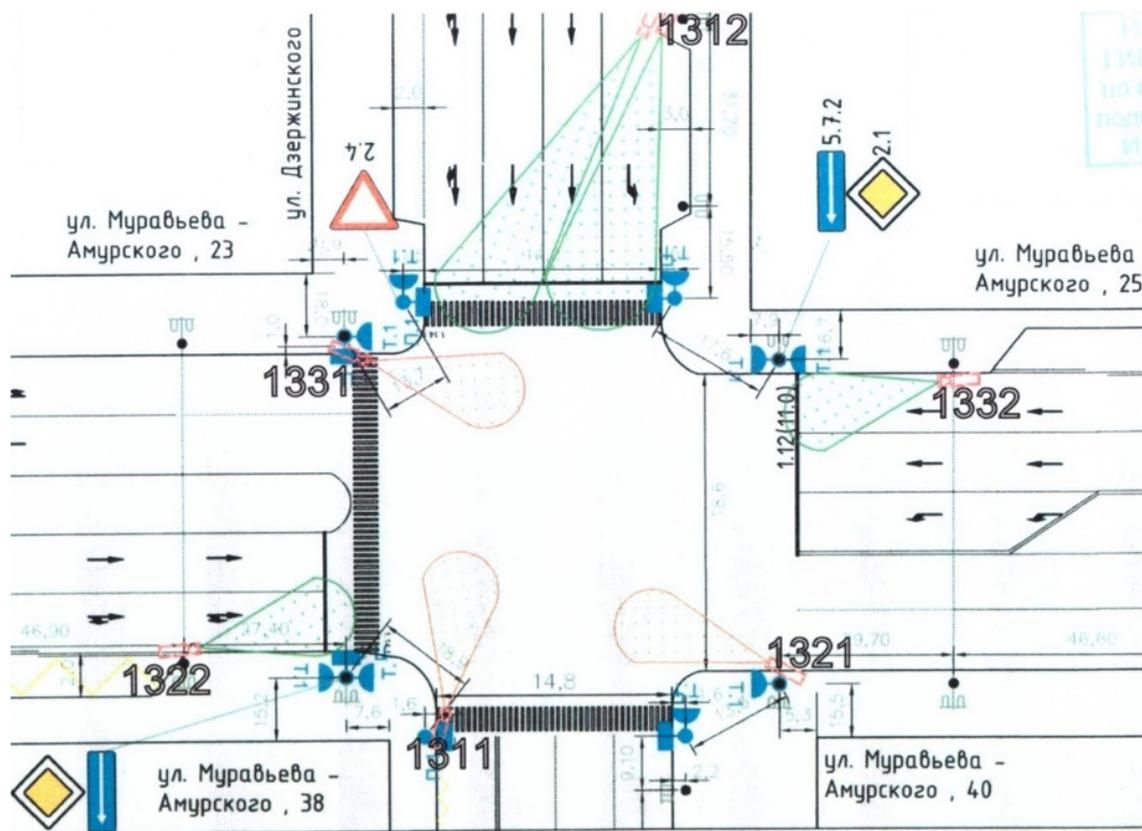


Рисунок 1 – Схема перекрестка с установленными на нем рубежами контроля полос (1311, 1321, 1331)
 Источник: Хабаровский научный производственный центр организации дорожного движения.

Figure 1 – Diagram of the road intersection with the boundaries of control lanes established on it (1311, 1321, 1331)

Source: Khabarovsk Research and Production Traffic Control Center.

Импортированы необходимые библиотеки Python (datetime, pandas, spearmang и numpy) для работы. Из директории виртуального окружения загружен файл (Restruct_25.xlsx).

На этапе предварительной обработки данных из выборки удалены колонки, ненужные в исследовании, и не информативные значения преобразованы в числовой формат.

Подготовлены итерируемые списки для всех показателей с целью подбора различных вариантов широт интервалов погодных условий и интенсивности транспортного потока:

- интенсивность транспортного потока, авт/час (100, 200, 250, 300, 400, 500, 600);
- температуры воздуха, почвы и точки росы, °C (5, 10, 15, 20, 25);
- время суток (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23);
- день недели (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7);
- парциальное давление водяного пара, гПа (5, 10, 15);

- относительная влажность воздуха, % (10, 20, 30, 50);
- дефицит насыщения, г/м³ (5, 10, 15);
- атмосферное давление на уровне станции и моря, гПа (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50);
- скорость ветра, м/с (2, 3, 4, 5);
- осадки, мм (2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15).

Для анализа влияния скорости ветра на интенсивность транспортного потока были разработаны 8 групп показателя – направление ветра, и приняты следующие широты интервалов к нему [15, 16]:

- С – 337.5...22.5 = 1;
- СВ – 22.5...67.5 = 2;
- В – 67.5...112.5 = 3;
- ЮВ – 112.5...157.5 = 4;
- Ю – 157.5...202.5 = 5;
- ЮЗ – 202.5...247.5 = 6;
- З – 247.5...292.5 = 7;
- СЗ – 292.5...337.5 = 8.

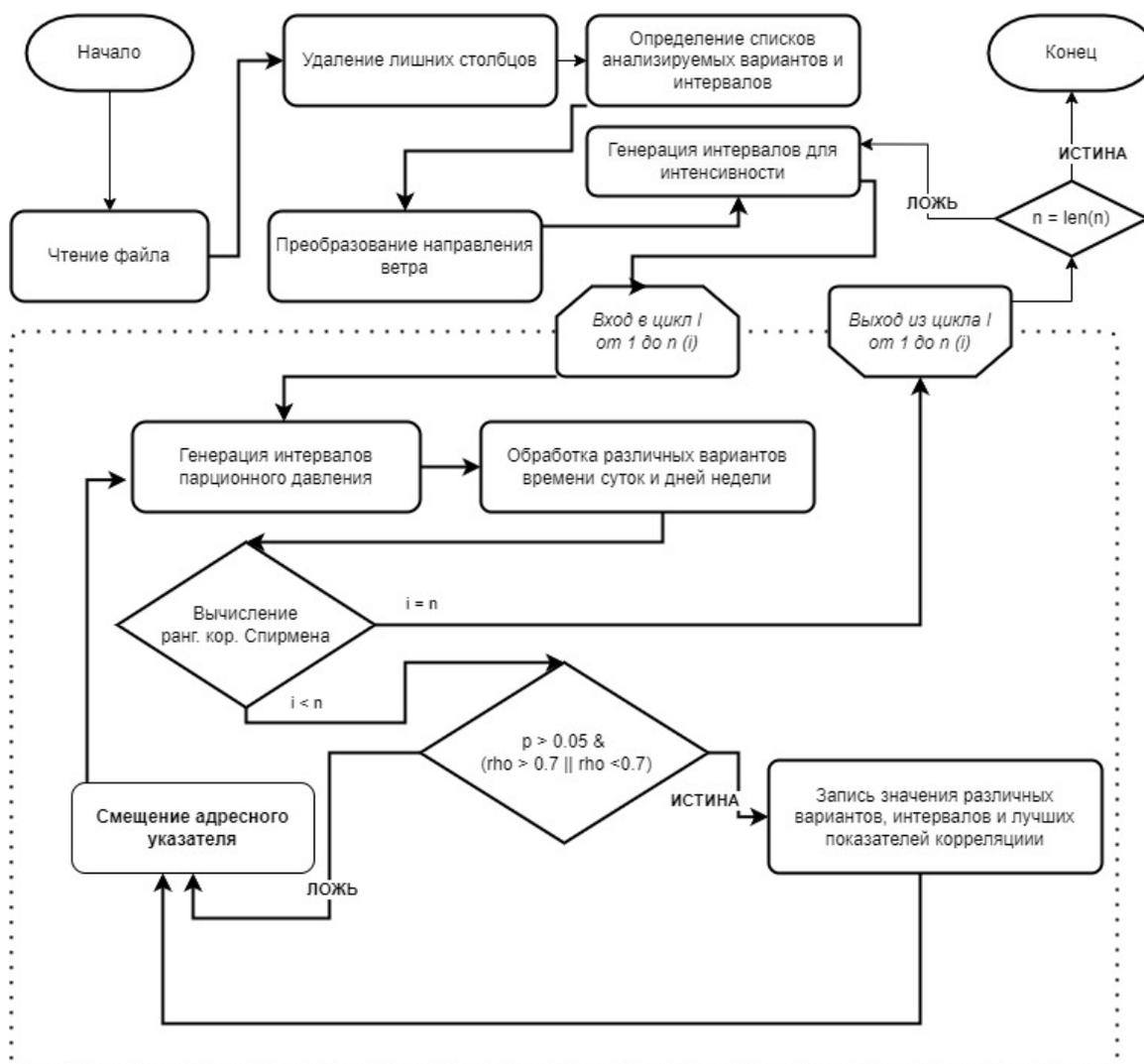


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма анализа широт интервалов с использованием ранговой корреляции Спирмена
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Flowchart of the algorithm for analyzing interval width with the use of Spearman's rank correlation
Source: compiled by the authors.

Вероятность ошибки Спирмена, также известная как уровень значимости, или p -значение, является статистической мерой, которая используется для определения значимости между двумя наборами данных. Она оценивает вероятность получения наблюдаемой или более экстремальной корреляции, если нулевая гипотеза (отсутствие корреляции) верна.

Обычно, если значение p меньше определенного уровня значимости (например, 0,05), нулевая гипотеза отвергается, корреляция считается статистически значимой.

Важно понимать, что вероятность ошибки (p -значение) не определяет силу или величину корреляции, а является статистической мерой

значимости. Более низкое значение p указывает на большую уверенность в отвержении нулевой гипотезы и наличии корреляции.

При помощи функций `for` (управляющая конструкция, которая позволяет выполнять повторяющиеся операции или действия определенное количество раз) перебираются списки широт интервалов и уникальных значений таким образом, чтобы каждая функция внутри себя запускала другую. Принцип вложенности можно объяснить аналогией – в каждом часе перебираются минуты, в каждой минуте секунды. Таким образом, мы строим дерево уникальных комбинаций.

Таблица

Значимые результаты парной ранговой корреляции Спирмена широт парционного давления водяного пара и интенсивности транспортного потока
Источник: составлено авторами.

Table

Significant results of Spearman's pairwise rank correlation of water vapor partial pressure parameter width and intensity of transport flow
Source: compiled by the authors.

Вероятность ошибки (p)	Коэффициент корреляции	Широты интервалов	
		Интенсивности транспортного потока авт/час	Парционного давления водяного пара (%)
3.07E-07	-0.72227	100	5
1.56E-09	-0.77606	100	5
3.61E-08	-0.73204	200	5
3.60E-07	-0.71204	250	5
2.77E-07	-0.72411	300	5

Главной задачей было определить лучшую статистическую взаимосвязь широт интервалов между зависимым и независимым признаком в разные показатели времени суток и дней недели. Использовался парный корреляционный анализ для погодных условий. По окончании работы циклической функции программа определяла самые эффективные широты интервалов для интенсивности транспортного потока и одного из показателей погодных условий.

Чтобы не нагружать работу лишней информацией, на рисунке 2 приведен только пример алгоритма исследования широт интервалов интенсивности транспортного потока и парционного давления водяного пара при различных показателях времени суток и дней недели.

Лучшие результаты парной ранговой корреляции Спирмена и соответствующие им эффективные широты интервалов приведены в таблице.

По таблице можно сделать вывод о том, что лучший интервал парционного давления 5%, при этом ширина интенсивности транспортного потока может быть 100, 200, 250, 300 авт/час. Дальнейшая оценка качества рассматриваемой пары признаков может проходить по величине коэффициента ранговой корреляции Спирмена или вероятности ошибки (p). Но для начала было необходимо определить широты интервалов для остальных признаков погодных условий в паре с интенсивностью [17, 18].

Структура программы уже построена, и дальнейший анализ парной ранговой корреляции Спирмена между широтами интервалов интенсивности транспортного потока и остальных погодных условий проводился путем подмены ключевой циклической функции for для каждого признака.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Цель – определение эффективных широт интервалов влияния независимых переменных на зависимую достигнута с использованием ранговой корреляции Спирмена.

Так как главный показатель – интенсивность транспортного потока, то в первую очередь необходимо рассматривать широты интервала именно этого параметра, руководствуясь вероятностью ошибки и коэффициентом корреляции.

Из рассматриваемой выборки, с учетом различных дней недели и времени суток, было получено 243 варианта. Из них:

- 60 вариантов с шириной 100 авт/час;
- 75 вариантов с шириной 200 авт/час;
- 21 вариант с шириной 250 авт/час;
- 47 вариантов с шириной 300 авт/час;
- 40 вариантов с шириной 400 авт/час.

Чаще всего встречается ширина интервала 200 авт/час, и для достоверности дальнейшего исследования было бы рационально использовать его, но при дальнейшем корреляционном анализе остальных погодных и природных характеристик она не показала себя эффективной.

Ширина интервала 250 авт/час единственная, которая является значимой при анализе всех рассматриваемых погодных условий и природных явлений, для интенсивности транспортного потока принимаем ее. Широты остальных признаков отбираются с шириной интервала интенсивности транспортного потока 250 авт/час таким образом, чтобы они чаще встречались в обозначенном ограничении и были эффективны (коэффициент корреляции больше 0,7 или меньше -0,7, и вероятность ошибки была меньше 0,05, в исключительных случаях допускался порог коэффициента корреляции от 0,6). Если есть показатели, которые

в ширине интервала интенсивности 250 авт/час встречаются одинаковое количество раз, то приоритет отдается наименьшей независимого признака. Это позволило получить более подробную детализацию при дальнейшем исследовании [19, 20].

Учитывая полученные данные корреляционного анализа и установленные правила отбора, приведенные на рисунке 2 (принимались значения коэффициента больше 0,7 или меньше -0,7 рассчитывалась вероятность ошибки, принимались значения меньше 0,05), были выбраны следующие широты интервалов для зависимого и независимых признаков:

- интенсивность транспортного потока (N) – 250 авт/час;
- температура воздуха ($t_{\text{воздуха}}$) – 5 °C;
- температура почвы ($t_{\text{почвы}}$) – 5 °C;
- температура точки росы (DP) – 5 °C;
- парциальное давление водяного пара (p_s) – 5 Па;
- относительная влажность воздуха (ϕ) – 50%;
- дефицит насыщения (d) – 5 г/м³;
- атмосферное давление на уровне станции ($P_{\text{станции}}$) – 30 г.Па;
- атмосферное давление на уровне моря ($P_{\text{моря}}$) – 45 г.Па;
- скорость ветра – 2 м/с;
- осадки – 2 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существует большое количество статистических методов обобщения для прогнозирования. Самыми эффективными из них на сегодняшний день являются методы машинного обучения, для применения которых необходимо подготовить данные [21, 22]. Кроме очистки от случайных выбросов, отсутствующих значений и т.п., требуется определить интервалы признаков, в которых будут проходить исследования. Как показала практика, независимый признак может не оказывать влияние на зависимый, пока и тот и другой не будет сгруппирован в интервалы. При этом силу влияния друг на друга можно повысить, укрупнив их. С этим надо быть осторожнее, так как чем крупнее интервал, тем меньше информативность, но точнее прогноз. И, наоборот, с уменьшением интервала повышается детализация, но из-за большого количества параметров сложнее построить достоверную модель. Соблюдая баланс между качеством (детализированной характеристикой) и точностью, необходимо руководствоваться такими параметрами, как коэффициент ранговой корреляции Спирмена и вероятностью ошибки (p). В данной работе порог был выставлен для коэффициента корреляции $>0,7$

или $<-0,7$, что характеризуется в общепринятом классификаторе как сильная связь, а для вероятности ошибки $p < 0,05$, это означает, что у отобранных признаков вероятность случайной связи менее 5%.

В результате построенной алгоритмической структуры получилось выполнить сложные математические расчеты по поиску наилучших широт интервалов. Забегая вперед, стоит отметить, что данный подход позволил качественно подготовить модель методом глубокого обучения [23, 24].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сайдуллозода С.С., Гаврилов К.В., Умирзиков А.М., Уланов А.Г. Оценка эффективности функционирования системы Водитель-Автомобиль-Дорога-Среда по энергетическим показателям // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2021. Т. 21, № 4. С. 61–70.
2. Sfyridis A., Agnolucci P. Factors affecting road traffic: identifying drivers of annual average daily traffic using least absolute shrinkage and selection operator regression // Transportation Research Record. 2023. Т. 2677. № 5. С. 1178–1192. <https://doi.org/10.1177/03611981221141435>.
3. Rudenko D., Renkas A., Tovaryansky V. Assessment of the impact of road conditions on accidents with the application of the multifactor model // Bulletin of Lviv State University of Life Safety. 2022. Т. 24. С. 33–39. DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.24.2021.04>.
4. Luo Y., Chen Ya., Lu K., Chen L., Zhang J., Physica A. Modeling and analysis of heterogeneous traffic flow considering dynamic information flow topology and driving behavioral characteristics // Statistical Mechanics and its Applications. 2024. Т. 637. С. 129521. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2024.129521>.
5. Hao W., Rong D., Zhang Zh., Byon Y.Ji., Lv N., Chen Y. Stability analysis and speed-coordinated control of mixed traffic flow in expressway merging area // Journal of Transportation Engineering Part A: Systems. 2022. Т. 148. № 11. <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000755>.
6. Зацерковный А.В., Нурминский Е.А. Нейросетевой анализ транспортных потоков городских агломераций на основе данных публичных камер видеонаблюдения // Компьютерные исследования и моделирование. 2021. Т. 13, № 2. С. 305–318.
7. Пугачев И.Н., Евтюков С.С., Шешера Н.Г., Григоров Д.Е. Прогноз интенсивности транспортного потока. Обучение с учителем. Метод случайных деревьев // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18, № 4. С. 36–47.
8. Пугачев И.Н., Шешера Н.Г., Григоров Д.Е. Определение эффективных широт интервалов влияния температурных режимов на интенсивность транспортного потока с использованием ранговой корреляции Спирмена // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18, № 3. С. 34–40.
9. Rahmanov F., Lala Neymatova L.N., Aliyeva R., Hashimova A. Management of the transport infrastructure of global logistics: cross-country analysis // Marketing and Management of Innovations. 2022. Т. 13. № 4. С. 65–75.

10. Jun-Fang S., Yan Ch. Traffic flow state prediction based on space-time correlation of vehicle trajectory using the deep hybrid model // *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. 2023. Т. 44. № 4. С. 6855-6863. <https://doi.org/10.3233/jifs-212998>.
11. Qin Ya., Luo Q., Wang H. Stability analysis and connected vehicles management for mixed traffic flow with platoons of connected automated vehicles // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2023. Т. 157. С. 104370. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104370>.
12. Purba L.I., Humaidi S., DarmawanYa. Analysis of spearman rank correlation & linear regression of atmospheric stability and cloud tops temperature of himawari-8 ir satellite images (case study of hail on may 22, 2022) // *Prisma Sains : Jurnal Pengkajian Ilmu dan Pembelajaran Matematika dan IPA IKIP Mataram*. 2023. Т. 11. № 2. С. 476. DOI: <https://doi.org/10.33394/j-ps.v11i2.7818>.
13. Rahmani F., Fattahi M.H. A multifractal cross-correlation investigation into sensitivity and dependence of meteorological and hydrological droughts on precipitation and temperature // *Natural Hazards*. 2021. DOI: [10.1007/s11069-021-04916-1](https://doi.org/10.1007/s11069-021-04916-1).
14. Xu Zh., Wang R., Pan K., Li J., Wu Q. Two-stream networks for copert correction model with time-frequency features fusion // *Atmosphere*. 2023. Т. 14. № 12. P. 1766. <https://doi.org/10.3390/atmos14121766>.
15. Wang H., Yan J., Yan X. Spearman rank correlation screening for ultrahigh-dimensional censored data // *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2023. Т. 37. № 8. P. 10104-10112. DOI: <https://doi.org/10.1609/aaai.v37i8.26204>.
16. Гасилова О.С., Бородулин И.В., Старков В.В. Анализ интенсивности движения транспортных средств в местах разделения транспортных потоков // *Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета*. 2022. № 2 (76). С. 250–254.
17. Бояршинов М.Г., Вавилин А.С. Исследование интенсивности транспортного потока с использованием индекса Хёрста // *Химия. Экология. Урбанистика*. 2022. Т. 3. С. 187–191.
18. Новикова М.Н. Влияние отдельных условий на безопасность дорожного движения начинающих водителей // *Безопасность дорожного движения*. 2021. № 4. С. 49–52.
19. Pilipets O.O. Structural peculiarities of intelligent transport systems development in the Russian federation // *Young Don Researcher*. 2023. № 2 (41). С. 55-61.
20. Бояршинов М.Г., Вавилин А.С., Васькина Е.В. Применение Вейвлет-анализа для исследования интенсивности транспортного потока // *Интеллек. Инновации. Инвестиции*. 2022. № 4. С. 88–103.
21. Бояршинов М.Г. Цифровая обработка данных системы видеофиксации нарушений правил дорожного движения // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2022. № 3. С. 5–18.
22. Бутыркин А.Я., Гелис В.А., Куликова Е.Б. Особенности применения прогрессивных методов предиктивного моделирования для решения задач на транспорте // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2021. № 4 (52). С. 68–78.
23. Кадиев Ш.К. Результаты первичного анализа данных аварий на автомобильном транспорте и их подготовка для машинного обучения // *Технологии технологической безопасности*. 2023. № 4 (102). С. 146–156.
24. Совершенствование системы безопасности дорожного движения, стремящейся к нулевой смертности на автомобильных дорогах: монография / И.Н. Пугачев, Н.Г. Шешера, Д.Е. Григоров. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2024. 183 с.: ил. ISBN 978-5-262-00966-4.

REFERENCES

- Saidullozoda S.S., Gavrillov K.V., Umirzokov A.M., Ulanov A.G. Assessing the efficiency of the Driver-Car-Road-Environment system based on energy indicators. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering*. 2021; Т. 21. No. 4: 61-70. (in Russ)
- Sfyridis A., Agnolucci P. Factors affecting road traffic: identifying drivers of annual average daily traffic using least absolute shrinkage and selection operator regression. *Research Record*. 2023; Т. 2677. No. 5: 1178-1192. <https://doi.org/10.1177/03611981221141435>.
- Rudenko D., Renkas A., Tovaryansky V. Assessment of the impact of road conditions on accidents with the application of the multifactor model. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*. 2022; Т. 24: 33–39. DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.24.2021.04>.
- Luo Y., Chen Ya., Lu K., Chen L., Zhang J., Physica A. Modeling and analysis of heterogeneous traffic flow considering dynamic information flow topology and driving behavioral characteristics. *Statistical Mechanics and its Applications*. 2024; Т. 637. P. 129521. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2024.129521>.
- Hao W., Rong D., Zhang Zh., ByonY.Ji., Lv N., Chen Y. Stability analysis and speed-coordinated control of mixed traffic flow in expressway merging area. *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems*. 2022; Т. 148. No. 11. <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000755>.
- Zatserkovny A.V., Nurminsky E.A. Neural network analysis of transport flows of urban agglomerations based on data from public video surveillance cameras. *Computer Research and Modeling*. 2021; Т. 13, no. 2: 305–318. (in Russ)
- Pugachev I.N., Evtukov S.S., Sheshera N.G., Grigоров D.E. Forecast of traffic flow intensity. Training with a teacher. Random tree method. *T-Comm: Telecommunications and transport*. 2024; Volume 18. No. 4: 36–47. (in Russ)
- Pugachev I.N., Sheshera N.G., Grigоров D.E. Determination of effective latitudes of influence of temperature regimes on the intensity of traffic flow using Spearman rank correlation // *T-Comm: Telecommunications and Transport*. 2024. Volume 18. No. 3. pp. 34–40. (in Russ)
- Rahmanov F., LalaNeymatova L.N., Aliyeva R., Hashimova A. Management of the transport infrastructure of global logistics: cross-country analysis. *Marketing and Management of Innovations*. 2022; Т. 13. No. 4: 65–75.
- Jun-Fang S., Yan Ch. Traffic flow state prediction based on space-time correlation of vehicle trajectory using the deep hybrid model. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. 2023; Т. 44. No. 4: 6855-6863. <https://doi.org/10.3233/jifs-212998>.

11. Qin Ya., Luo Q., Wang H. Stability analysis and connected vehicles management for mixed traffic flow with platoons of connected automated vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2023; T. 157: 104370. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104370>.

12. Purba L.I., Humaidi S., DarmawanYa. Analysis of spearman rank correlation & linear regression of atmospheric stability and cloud tops temperature of himawari-8 ir satellite images (case study of hail on May 22, 2022). *PrismaSains: JurnalPengkajianIlmudanPembelajaranMatematikadan IPA IKIP Mataram*. 2023; T. 11. No. 2: 476. DOI: <https://doi.org/10.33394/j-ps.v11i2.7818>.

13. Rahmani F., Fattahi M.H. A multifractal cross-correlation investigation into sensitivity and dependence of meteorological and hydrological droughts on precipitation and temperature. *Natural Hazards*. 2021. DOI: 10.1007/s11069-021-04916-1.

14. Xu Zh., Wang R., Pan K., Li J., Wu Q. Two-stream networks for copert correction model with time-frequency features fusion. *Atmosphere*. 2023; T. 14. No. 12: 1766. <https://doi.org/10.3390/atmos14121766>.

15. Wang H., Yan J., Yan X. Spearman rank correlation screening for ultrahigh-dimensional censored data. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2023; T. 37. No. 8: 10104-10112. DOI: <https://doi.org/10.1609/aaai.v37i8.26204>.

16. Gasilova O.S., Borodulin I.V., Starkov V.V. Analysis of vehicle traffic intensity in places where traffic flows separate. *Scientific notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University*. 2022; No. 2 (76): 250–254. (in Russ)

17. Boyarshinov M.G., Vavilin A.S. Study of traffic flow intensity using the Hurst index. *Chemistry. Ecology. Urbanism*. 2022; T. 3: 187–191. (in Russ)

18. Novikova M.N. The influence of certain conditions on road safety for novice drivers. *Road Safety*. 2021; No. 4: 49–52. (in Russ)

19. Pilipets O.O. Structural peculiarities of intelligent transport systems development in the Russian Federation. *Young Don Researcher*. 2023; No. 2 (41): 55–61. (in Russ)

20. Boyarshinov M.G., Vavilin A.S., Vaskina E.V. Application of Wavelet analysis to study the intensity of traffic flow. *Innovation. Investments*. 2022; No. 4: 88–103. (in Russ)

21. Boyarshinov M.G. Digital processing of data from a video recording system for traffic violations. *Transport. Transport facilities. Ecology*. 2022; No. 3: 5–18. (in Russ)

22. Butyrkin A.Ya., Gelis V.A., Kulikova E.B. Features of the use of progressive methods of predictive modeling for solving problems in transport. *Bulletin of the Ural State University of Transport*. 2021; No. 4 (52): 68–78. (in Russ)

23. Kadiev Sh.K. Results of the primary analysis of accident data on road transport and their preparation for machine learning. *Technosphere Safety Technologies*. 2023; 4 (102): 146-156. (in Russ)

24. Pugachev I.N., Sheshera N.G., Grigorov D.E. Improving the road safety system striving for zero mortality on highways: monograph. Khabarovsk: Publishing-house DVGUPS, 2024. 183 p. (in Russ)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Пугачев И.Н. Генерация идеи исследования, постановка задачи исследования, анализ результатов исследования, написание текста статьи.

Шешера Н.Г. Выполнение работы по систематизации материала, получение данных для анализа, анализ результатов исследования и подготовка данных, написание текста статьи.

Григоров Д.Е. Техническая поддержка проекта, написание кода на языке программирования Python, перевод.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Pugachev I.N. Generation of research ideas; statement of the research problem, analysis of the research results; writing the text of the article.

Sheshera N.G. Systematization of the material; obtaining data for analysis; processing and testing the results and data preparation; writing the text of the article.

Grigorov D.Ye. Technical support of the project, writing code in the Python programming language, translation.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пугачев Игорь Николаевич – д-р техн. наук, доц., зам. руководителя ХФИЦ ДВО РАН (680000, Россия, г. Хабаровск, ул. Дзержинского, 54), **ORCID**: <https://orcid.org/0000-0003-0345-4350>, **SPIN-код**: 1856-1556, e-mail: ipugachev64@mail.ru

Шешера Николай Геннадьевич – канд. техн. наук, доц. кафедры ИиТО ОВД ДВЮИ МВД России имени И.В. Шилова (680020, Россия, г. Хабаровск, пер. Казарменный, д. 15), **ORCID**: <https://orcid.org/00009-0006-3302-5572>, **SPIN-код**: 9869-8822, e-mail: kolyaka239@mail.ru

Григоров Денис Евгеньевич – начальник кабинета специальных дисциплин ИиТО ОВД ДВЮИ МВД России имени И.В. Шилова (680020, Россия, г. Хабаровск, пер. Казарменный, д. 15), **ORCID**: <https://orcid.org/0009-0005-4049-9488>, **SPIN-код**: 6146-4152, e-mail: glowfish8lan@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pugachev Igor N. – Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the (KhFRC FEB RAS), (54 Dzerzhinsky str., 680000, Russia), **ORCID**: <https://orcid.org/0000-0003-0345-4350>, **SPIN-code**: 1856-1556, e-mail: ipugachev64@mail.ru

Sheshera Nikolay G. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Information and Technical Support of Internal Affairs Agencies of the Far Eastern Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia named after I.F. Shilov (15 Kazarmenny lane, 680020, Russia), **ORCID**: <https://orcid.org/00009-0006-3302-5572>, **SPIN-code**: 9869-8822, e-mail: kolyaka239@mail.ru

Grigorov Denis Ye. – head of the office of special disciplines of the Department of Information and Technical Support of Internal Affairs Agencies of the Far Eastern Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia named after I.F. Shilov (15 Kazarmenny lane, 680020, Russia), **ORCID**: <https://orcid.org/0009-0005-4049-9488>, **SPIN-code**: 6146-4152, e-mail: glowfish8lan@gmail.com

Научная статья
УДК 629.113
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-736-754>
EDN: CMUWCB



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДКЛЮЧАЕМОГО ПОЛНОГО ПРИВОДА КОЛЁСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА СТЕНДАХ С БЕГОВЫМИ БАРАБАНАМИ

А.И. Федотов, О.С. Яньков, Д.О. Ухватов ✉
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия
✉ ответственный автор
dim.ia@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Современные колёсные транспортные средства оснащаются системами управления подключаемым полным приводом, увеличивающими их проходимость, устойчивость и управляемость. Ярким примером является система AWD (All-wheel drive), применение которой позволяет получить наибольшую эффективность подключаемого привода по сравнению с постоянным полным приводом. Для обеспечения и поддержания эффективности и безопасности транспортных средств с системами управления подключаемым полным приводом необходимо проведение исследования процесса функционирования этих систем, причём как в процессе производства, так и в процессе эксплуатации. Наибольшее распространение получили дорожные методы испытаний рассматриваемых систем, которые не всегда реализуемы в условиях предприятий, осуществляющих производство, испытания и экспертизу транспортных средств, а также на станциях технического обслуживания, сервисных центрах и других организациях автомобильной отрасли.

Материалы и методы. Для выполнения аналитических исследований использовался разработанный комплекс математических моделей, содержащих модели подсистем «Транспортное средство» и «Стенд». Описание моделей выполнено в программном комплексе «Универсальный механизм – 9». Проведение экспериментальных исследований процесса функционирования автомобиля с автоматизированной системой AWD выполнялось на полноопорном multifunctionальном стенде с беговыми барабанами ИРНИТУ. В качестве объекта исследований использовался автомобиль Volvo S60 2.5T AWD с муфтой Haldex II поколения.

Результаты исследования и их анализ. В ходе аналитических и экспериментальных исследований получены результаты процесса функционирования транспортного средства при имитации его разгона с буксованием ведущих колёс как передней, так и задней оси: силы тяги на ведущих колёсах и скорости колёс.

Заключение. Полученные результаты аналитических исследований и их соответствие с результатами экспериментов показывают возможность проведения качественных и количественных исследований автомобилей с системами управления подключаемым полным приводом на стендах с беговыми барабанами. Использование комплекса математических моделей позволит в дальнейшем разрабатывать уникальные стендовые методы и реализующее эти методы оборудование для выполнения исследования эксплуатационных свойств современных транспортных средств.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: системы управления подключаемым полным приводом, AWD, стенд с беговыми барабанами, математическая модель, муфта Haldex, исследование эксплуатационных свойств автомобиля

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность редактору и рецензентам данной статьи, а также ООО «Вычислительная механика» за предоставление лицензии на ПК «Универсальный механизм – 9».

Статья поступила в редакцию 01.09.2024; одобрена после рецензирования 04.10.2024; принята к публикации 17.10.2024.

© Федотов А.И., Яньков О.С., Ухватов Д.О., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

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: Федотов А.И., Янков О.С., Ухватов Д.О. Исследование процесса функционирования системы управления подключаемого полного привода колёсных транспортных средств на стендах с беговыми барабанами // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 5. С. 736-754. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-736-754>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-736-754>

EDN: CMUWCB

INVESTIGATION OF CONTROL SYSTEM OPERATION IN PLUG-IN FOUR-WHEEL DRIVE OF WHEELED VEHICLES ON ROLLER TEST BENCHES

Alexander I. Fedotov, Oleg S. Yankov, Dmitrii O. Ukhvatov ✉

Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia

✉ corresponding author
dim.ia@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Modern wheeled vehicles are equipped with plug-in all-wheel drive control systems that increase their trafficability, stability and controllability. A good example is the AWD (All-wheel drive) system, which provides the highest efficiency of a plug-in drive compared to a permanent all-wheel drive. In order to ensure and maintain the efficiency and safety of vehicles with plug-in all-wheel drive control systems, it is necessary to investigate their functioning during manufacture and operation stages. Road testing methods are the most widespread methods for testing the systems under consideration. However they are not always feasible in the conditions of enterprises which provide testing and examination of vehicles, as well as in the conditions of service stations, service centers and other organizations of the automotive industry.

Materials and methods. For the purpose of analytical research, a developed set of mathematical models containing the "Vehicles" and the "Stand" subsystems models was used. The description of the models is completed with the software package "Universal mechanism-9". Experimental studies of operation of the vehicle with an automated AWD system were carried out on a full-support multifunctional stand with IRNIT running drums. The Volvo S60 25T AWD automobile with Haldex clutch of II generation was used as a research object.

Results and discussion. In the course of analytical and experimental studies, the results of investigating vehicle operation were obtained by simulating acceleration with the slipping of the driving wheels of both the front and rear axles: the traction force on the driving wheels and the wheel speed.

Conclusion. The results of this analytical research and their correspondence to the results of experimental study show the possibility of conducting qualitative and quantitative testing of automobiles with plug-in all-wheel drive control systems on roller test benches. The use of a complex of mathematical models will further allow for the development of unique bench methods and equipment to carry out research on the operational properties of modern vehicles.

KEYWORDS: control systems for plug-in all-wheel drive, AWD, stand with running drums, mathematical model, Haldex coupling, study of the operational properties of vehicles

ACKNOWLEDGEMENTS: the authors express their gratitude to the editor and reviewers of this article, as well as to Computational Mechanics LLC for granting a license for the Universal Mechanism-9 software.

The article was submitted 01.09.2024; approved after reviewing 04.10.2024; accepted for publication 17.10.2024.

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.

© Fedotov A.I., Yankov O.S., Ukhvatov D.O., 2024



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

For citation: Fedotov A.I., Yankov O.S., Ukhvatov D.O. Investigation of control system operation in plug-in four-wheel drive of wheeled vehicles on roller test benches. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (5): 736-754. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-736-754>

ВВЕДЕНИЕ

Постоянное улучшение эксплуатационных свойств колесных транспортных средств (КТС) приводит к значительному усложнению их конструкции. В современных КТС повсеместно применяются автоматизированные системы, обеспечивающие высокие тяговые, динамические качества, устойчивость, управляемость, безопасность, экономичность и экологичность. Одной из таких систем является система управления трансмиссией КТС с подключаемым полным приводом, ярким примером которой является система AWD (All-wheel drive), позволяющая использовать полный привод с наибольшей эффективностью, чем в трансмиссиях с постоянным полным приводом, увеличивая проходимость КТС. Кроме этого, автоматизированное управление полным приводом позволяет достичь большей устойчивости и управляемости КТС при прохождении поворотов, особенно на дорогах с низким коэффициентом сцепления, что повышает уровень безопасности автомобиля. На рисунке 1 показана структурная схема систем

управления подключаемым полным приводом легковых КТС.

Широкое распространение получили обеспечивающие управление подключаемым приводом электронные системы, которые имеют общее название *On-demand* (дословный перевод – *включаемый по требованию*). Чаще всего работа такого привода основана на управляемых электроникой многодисковых фрикционных муфтах, в заданный момент подключающих привод колес ведомой оси к приводу колес оси ведущей. Одной из наиболее распространённых конструкций муфт является муфта *Haldex*.

Несмотря на высокую надежность как системы в целом, так и муфты в частности, после определенного пробега КТС начинают появляться различные её неисправности. Анализ данных по неисправностям муфты *Haldex II* поколения, полученный авторами статьи по результатам опроса сервисных и дилерских центров, а также станций технического обслуживания г. Иркутска и Иркутской области в период с 2021 по 2024 г., представлен на рисунке 2.



Рисунок 1 – Структура систем управления подключаемым полным приводом легковых КТС
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The structure of control systems for plug-in all-wheel drive passenger vehicles
Source: compiled by the authors.

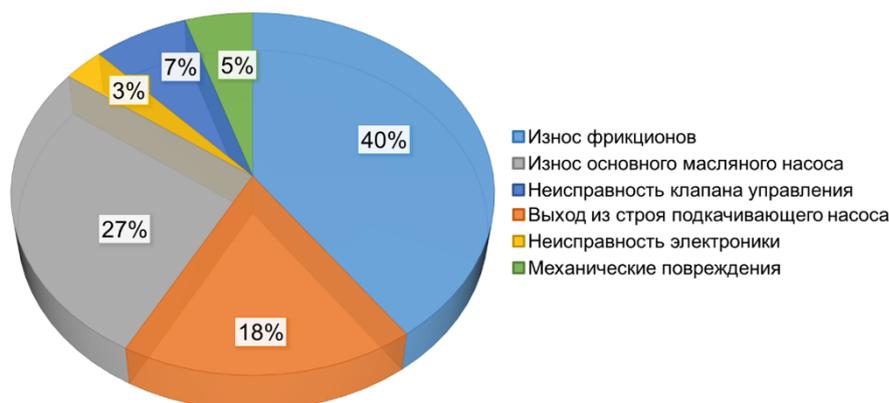


Рисунок 2 – Неисправности системы AWD с муфтой HALDEX II
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Malfunctions of the AWD system with the HALDEX II coupling
Source: compiled by the authors.

Для обеспечения и поддержания эффективности и безопасности КТС с системами управления подключаемым полным приводом необходимо провести исследование процесса функционирования этих систем, причём на всех этапах их жизненного цикла как в процессе производства, так и в процессе эксплуатации.

Большинство экспериментальных исследований КТС с системами управления подключаемым полным приводом основаны на дорожных методах оценки их движения, и, как правило, выполняются при сертификационных испытаниях [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. В процессе таких исследований определяют вид поворачиваемости КТС и в большинстве случаев контролируют кинематические параметры движения КТС, а также углы их сноса и заноса. Анализ

методов экспериментальных исследований КТС с системами управления подключаемым полным приводом показывает, что они основаны на измерении скорости рыскания^{2,3} [8]; угла дрейфа⁴ [9, 10]; угловых скоростей колёс [11]; бокового ускорения и контроля параметров, характеризующих нахождение КТС в коридоре движения. В исследовании реализован метод определения устойчивости движения КТС по так называемому *фазовому плану*, т.е. зависимости скорости изменения угла дрейфа от величины этого угла. Определены условия и границы, которые разделяют движение КТС на устойчивое и неустойчивое. Отмечается техническая сложность реализации данного метода, поскольку измерение величины угла дрейфа датчиками КТС не производится⁵.

¹ Bucchi, F., Lenzo, B., Frenzo, F., Sorniotti, A., De Nijs, W., "The effect of the front-to-rear wheel torque distribution on vehicle handling: an experimental assessment," 25th International Symposium on dynamics of vehicles on roads and tracks (IAVSD), 2017.

² Авторское свидетельство № 1635143 А1 СССР, МПК G01P 3/64. Устройство для измерения скорости и угла рыскания транспортного средства: № 4442396: заявл. 17.06.1988: опубл. 15.03.1991 / Б.А. Бачурин, К.К. Ещин, В.И. Заровский, Н.Ф. Пантелеев; заявитель ВОЕННАЯ АКАДЕМИЯ ИМ.Ф.Э.ДЗЕРЖИНСКОГО. EDN ВАРАРЕ.

³ Gruber P.A Single Input Single Output Formulation for Yaw Rate and Sideslip Angle Control via Torque-Vectoring // Conference: AVEC 18 - 14th International Symposium on Advanced Vehicle Control, At: Beijing, China, July 2018.

⁴ Agliullin T., Ivanov V., Sliding Mode Methods in Electric Vehicle Stability Control November 2019 DOI: 10.1109/ICCVE45908.2019.8965171 Conference: 2019 IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE), DOI:10.13140/RG.2.2.21150.69444.

⁵ Яньков О.С. Математическая модель процесса функционирования колесного транспортного средства с системой подключаемого полного привода на стенде с беговыми барабанами / О.С. Яньков, Д.О. Ухватов, А.В. Куртова // Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации: материалы 116-й Международной научно-технической конференции, Улан-Удэ, 12–13 сентября 2023 года. Улан-Удэ: Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 2023. С. 105–115. DOI 10.53980/9785907746091_105

В процессе исследований А.В. Антонян⁶ определял курсовую устойчивость КТС на основе измерения и соотношения переносных скоростей колёс передней и задней оси. Следует отметить недостатки данного метода.

Во-первых, автор использует в расчетах переносных скоростей колёс их свободный радиус r_0 , который не учитывает скоростные потери в шинах. Во-вторых, в процессе прохождения КТС поворотов с большим боковым ускорением его внутренние по радиусу поворота колёса разгружаются. Использование таких режимов, а также движение КТС по дорогам с низким коэффициентом сцепления, часто приводят к буксованию ведущих колёс. Всё это ведет к весьма некорректному определению курсовой устойчивости КТС. Метод определения поворачиваемости КТС в процессе движения приведен в стандарте ISO 8855:2011(en). Данный стандарт позволяет рассчитывать основной параметр U , который в полной мере характеризует поворачиваемость КТС.

Таким образом, в процессе дорожных испытаний КТС с системами управления подключаемым полным приводом, как правило, определяют кинематические параметры, характеризующие курсовую устойчивость, координаты движения центра масс, скорость продольного движения и рыскания, угол поворота рулевого колеса, а также параметры, характеризующие рабочий процесс системы. Стоит обратить внимание на существенный недостаток дорожных испытаний, заключающийся в том, что, во-первых, для выполнения такого рода исследований необходимо наличие испытательного полигона, специализированного оборудования и подготовленного персонала, способного выполнять такого рода испытания; во-вторых, проведение дорожных испытаний может быть затруднено из-за природно-климатических условий.

Для исследований КТС с системами управления подключаемым полным приводом на стендах, реализующих принцип обратимости движения, требуется задание таких тестовых режимов, которые способны активировать работу электронных систем подключаемого привода и вызвать его срабатывание. При этом необходимо обеспечить измерение кинемати-

ческих и силовых параметров, позволяющих в полной мере оценить эффективность функционирования КТС.

Эти требования в полной мере способны обеспечить стендовые комплексы MTS Systems⁷ и подобные им. Однако, учитывая высокую стоимость как самих комплексов, так и выполняемых на их основе исследований, они недоступны для большей части организаций и предприятий, которые в этих исследованиях заинтересованы.

Наиболее близкой по направлению является работа, в которой автор выполнил исследование процессов функционирования противобуксовочной системы КТС на стенде с беговыми барабанами. Отмечено, что исследование процессов разгона ведущих колёс КТС при функционировании противобуксовочной системы на стендах, реализующих принцип обратимости движения, обеспечивает большую информативность испытаний и безопасность транспортных средств за счёт измерения силовых параметров процесса, нежели исследования в дорожных условиях. Авторы обосновали следующие тестовые режимы воздействия на противобуксовочную систему⁸:

- 1) трогание КТС с места при полной подаче топлива;
- 2) имитацию разности коэффициентов сцепления под колёсами КТС (имитация покрытия «МИКСТ») за счёт значительной разности в моментах инерции маховых масс стенда, соединённых с «буксующим» и «небуксующим» колёсами.

При этом имитация буксования ведущих колёс КТС на беговых барабанах стенда реализовывалась за счёт разности моментов инерции связанных с беговыми барабанами маховых масс.

Подводя итог, можно отметить, что для исследования эксплуатационных свойств современных КТС с системами управления подключаемым полным приводом требуется наукоёмкое оборудование, реализующее высокоинформативные и оперативные методы. Одним из наиболее перспективных направлений решения проблемы с исследовательским оборудованием является применение стендов, реализующих принцип обратимости движения.

⁶ Антонян А.В. Повышение устойчивости и управляемости автомобилей колесной формулой 4x4 путем перераспределения подводимых к колесам вращающих моментов: автореф. дис. канд. техн. наук. М., 2021.

⁷ Сайт компании MTS. URL: <https://www.mts.com/en> (дата обращения: 05.07.2024).

⁸ Потапов А.С. Динамический метод диагностирования противобуксовочных систем автотранспортных средств на стендах с беговыми барабанами: дис. канд. техн. наук. 05.22.10. Иркутск, 2011.

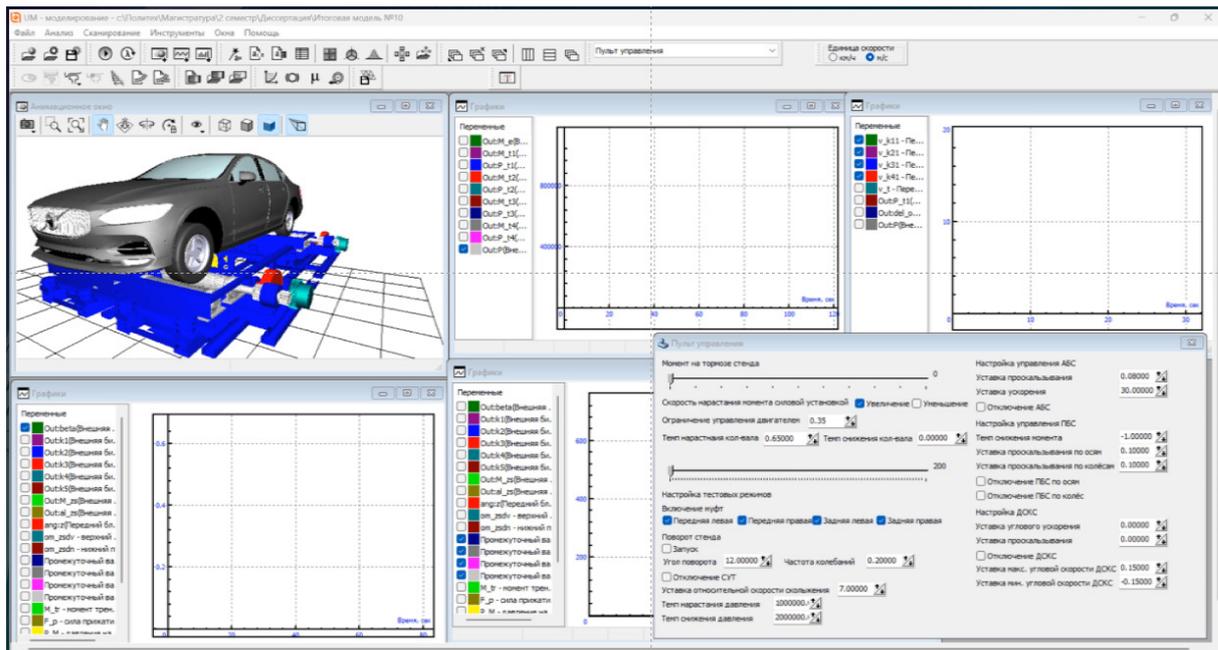


Рисунок 3 – Внешний вид программного обеспечения «Универсальный механизм – 9»
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – The appearance of the «Universal mechanism 9» software
Source: compiled by the authors.

Они позволяют проводить исследования КТС в помещениях, закрытых от влияния погодных, климатических и других внешних факторов в заранее заданных режимах температуры, влажности и прочих условий. Такое оборудование должно быть доступно по цене и пригодно к использованию на предприятиях, осуществляющих производство, испытания и экспертизу КТС, а также на станциях технического обслуживания, сервисных центрах и других организациях автомобильной отрасли.

Решению указанных проблем препятствует недостаток знаний о процессах функционирования современных КТС с системами управления подключаемым полным приводом на стендах, реализующих принцип обратимости движения, при исследовании параметров их эксплуатационных свойств, а также о формировании параметров, характеризующих рабочие процессы агрегатов и систем КТС и их нормативных значений, на стендах, и их связи с показателями эффективности эксплуатации и безопасности КТС.

Цель работы – разработка методов исследования эксплуатационных свойств КТС с системами управления подключаемым полным приводом на стендах с беговыми барабанами. Результаты исследования позволят значитель-

но снизить временные, производственные и финансовые затраты на производство, экспертизу и эксплуатацию КТС с системами управления подключаемым полным приводом, что значительно повысит их эксплуатационные свойства и активную безопасность.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для достижения поставленной цели были проведены аналитические и экспериментальные исследования процесса функционирования КТС с системой управления подключаемым полным приводом на стенде с беговыми барабанами.

Аналитическое исследование проводилось в программном комплексе «Универсальный механизм» (рисунок 3). Для выполнения исследования была разработана система «Транспортное средство – Стенд», содержащая математические описания силовой установки КТС, его трансмиссии, логики функционирования системы AWD, а также трансмиссии стенда. Описание комплекса математических моделей приведено в работе [12]. В процессе моделирования использованы параметры автомобиля Volvo S60 2.5T AWD с муфтой Haldex II поколения.

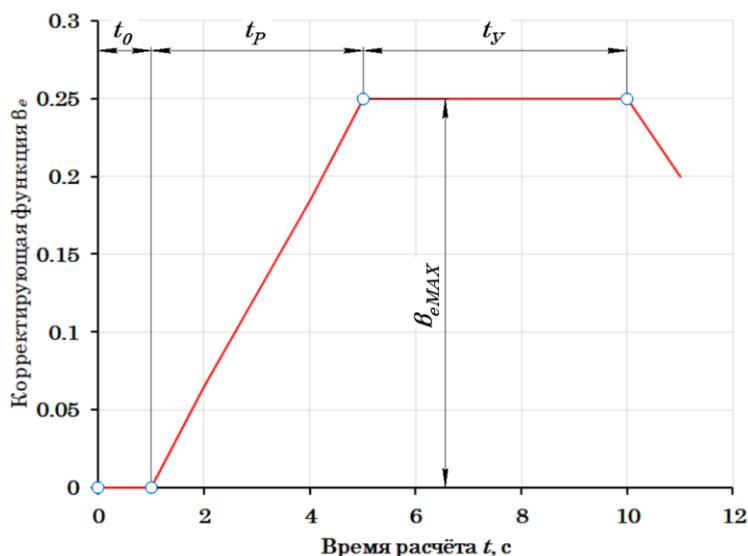


Рисунок 4 – Зависимость функции от времени расчёта
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Relation between function and the calculation time
Source: compiled by the authors.

Имитация буксования заданной оси в процессе моделирования определялась моментом трения фрикционной муфты стенда. Управление силовой установкой при разгоне ведущих колёс КТС осуществлялось линейным нарастанием коэффициента управления β_e в течение заданного времени расчёта. Изменение корректирующей функции осуществлялось до её максимального значения (рисунок 4), которое было достигнуто по времени, соответствующему времени разгона $t_p = 5$ с. С увеличением времени удержания t_y функция β_e оставалась неизменной. Максимальное значение корректирующей функции составляло $\beta_{eMAX} = 0,25$, что соответствует открытию дроссельной заслонки ДВС на 25%. По истечении времени удержания значение функции β_e уменьшалось с последующей остановкой колёс КТС.

Для проведения экспериментальных исследований процесса функционирования КТС с автоматизированной системой AWD на полноопорном мультифункциональном стенде с беговыми барабанами ИРННТУ^{9,10} использовал-

ся КТС Volvo S60 2.5T AWD с муфтой Haldex II поколения (рисунок 5). Экспериментальное исследование процесса функционирования КТС на стенде с беговыми барабанами осуществлялось по аналогичным условиям, используемым в аналитическом исследовании.



Рисунок 5 – Внешний вид КТС Volvo S60 2.5T AWD, установленного на полноопорный стенд с беговыми барабанами ИРННТУ
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Exterior view of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD mounted on the ISTU roller test bench
Source: compiled by the authors.

⁹ Яньков О.С. К вопросу о диагностике систем подключаемого полного привода / О.С. Яньков, Д.О. Ухватов, А.В. Куртова // Мировая наука на пути к устойчивому развитию: естественно-научные исследования, технический прогресс: материалы IV Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 31 марта 2023 года. Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство «Манускрипт», 2023. С. 253–257.

¹⁰ Fedotov A., Yankov O., Chernyshkov A. Traction control and diagnostics of electric and unmanned vehicles on roller stands // E3S Web of Conferences: Key Trends in Transportation Innovation, KTTI 2019, Khabarovsk, 24–26 октября 2019 года. Vol. 157. Khabarovsk: EDP Sciences, 2020. P. 01021. DOI 10.1051/e3sconf/202015701021.

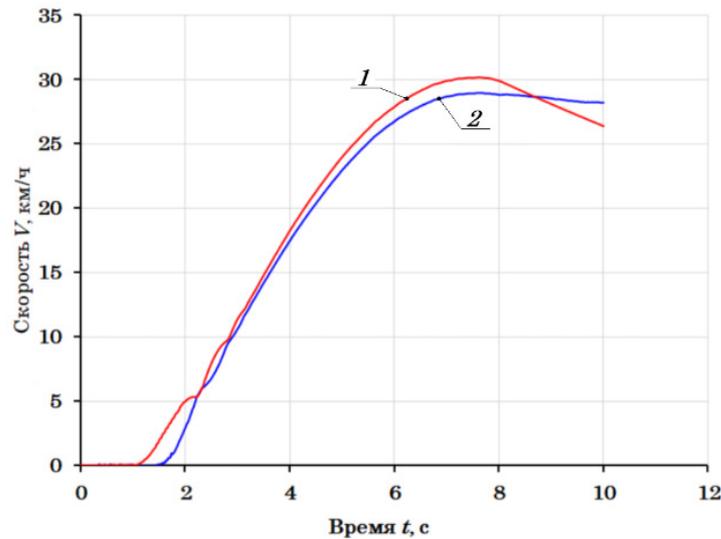


Рисунок 6 – Зависимость скоростей ведущих колёс V_{Ki}^{Π} в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс передней оси (расчёт):
 1 – скорость колёс передней оси V_{K12}^{Π} ;
 2 – скорость колёс задней оси V_{K34}^{Π}
 Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Relations between the speeds of driving wheels V_{Ki}^{Π} in the process of simulating acceleration of vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels of the front axle slipping (calculation):
 1 – the speed of the wheels on the front axle V_{K12}^{Π} ;
 2 – the speed of the wheels on the rear axle V_{K34}^{Π}
 Source: compiled by the authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Основной задачей исследования являлось определение выходных параметров процессов разгона с буксованием ведущих колёс КТС на стенде с беговыми барабанами с имитацией покрытия типа «МИКСТ» отдельно для колёс каждой ведущей оси: силы тяги на колёсах КТС F_{Ki} и скорости ведущих колёс V_{Ki}^{Π} .

На рисунках 6, 7, 8, 9 показаны зависимости сил тяги F_{Ki} на ведущих колёсах и скоростей колёс V_{Ki}^{Π} от времени t в процессе имитации разгона с буксованием, полученные в результате аналитического исследования по следующим вариантам имитации покрытия типа «МИКСТ» ($\Delta\varphi = 0,5$):

- 1) разгон ведущих колёс КТС до заданной скорости с имитацией низкого коэффициента сцепления шин ведущих колёс передней оси;
- 2) разгон ведущих колёс КТС до заданной скорости с имитацией низкого коэффициента сцепления шин ведущих колёс задней оси.

Исходные параметры:

- 1) момент инерции маховых масс $J_{Mi} = 3,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$;
- 2) конечная, имитируемая скорость разгона, $V_K = 30 \text{ км/ч}$;
- 3) моменты инерции маховых масс, связанных с буксующими колёсами, $J_{M6} = 1,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Участок разгона (см. рисунки 6 и 7) характеризуется резким увеличением скорости V_{Ki}^{Π} ведущих колёс КТС, причём повышение скорости V_{K12}^{Π} колёс передней оси происходит интенсивнее, чем задней по причине имитации процесса буксования именно этой оси. При этом силы тяги колёс передней оси V_{K12}^{Π} возрастают несколько раньше сил тяги колёс задней оси V_{K34}^{Π} . В момент, когда разность скоростей достигает значения, при котором происходит срабатывание системы управления подключаемым полным приводом, происходит подключение колёс задней оси, о чём свидетельствует возрастание сил тяги задних колёс V_{K34}^{Π} . Дальнейший разгон всех колёс КТС осуществляется за счёт сил тяги V_{K34}^{Π} колёс задней оси.

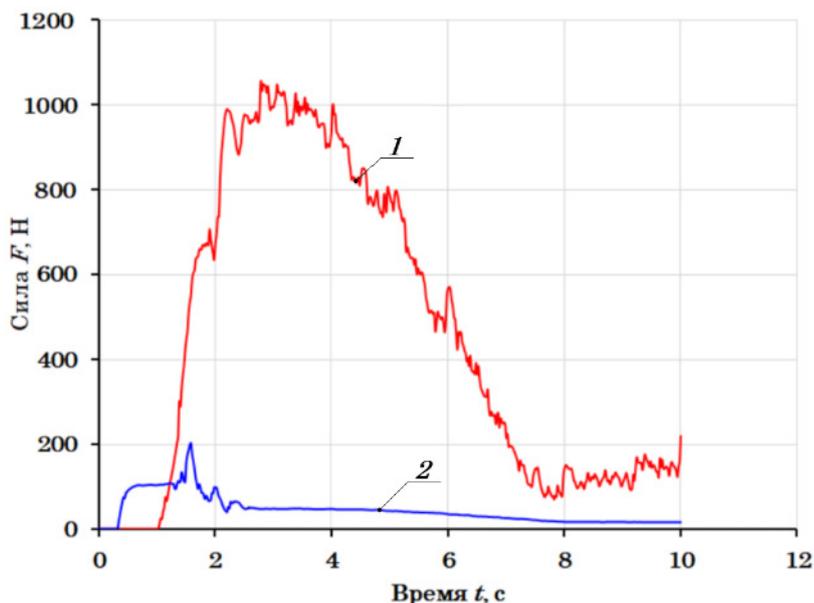


Рисунок 7 – Зависимость сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^{Π} в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс передней оси (расчёт):
 1 – силы тяги колёс задней оси F_{K34}^{Π} ;
 2 – силы тяги колёс передней оси F_{K12}^{Π}
 Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Traction forces of the driving wheels F_{Ki}^{Π} in the process of simulating acceleration of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels of the front axle slipping (calculation):
 1 – traction forces of the wheels on the rear axle F_{K34}^{Π} ;
 2 – traction forces of the wheels on the front axle F_{K12}^{Π}
 Source: compiled by the authors.

Зависимость скоростей V_{Ki}^3 и сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^3 в процессе имитации разгона КТС с буксованием задней оси на покрытии типа «МИКСТ» показана на рисунках 8 и 9. Этот режим характеризуется увеличением скорости V_{Ki}^3 ведущих колёс КТС, однако значительного повышения скорости V_{K12}^3 колёс передней оси по отношению к скоростям V_{K34}^3 колёс задней оси не происходит. Объясняется

это тем, что задан режим имитации процесса буксования задней оси. Силы тяги колёс передней оси F_{K12}^3 увеличиваются больше сил тяги колёс задней оси F_{K34}^3 . В случаях, когда разность скоростей достигает значения, при котором осуществляется подключение колёс задней оси, силы тяги на колёсах этой оси возрастают незначительно. Дальнейший разгон всех колёс КТС осуществляется за счёт сил тяги F_{K34}^3 колёс передней оси.

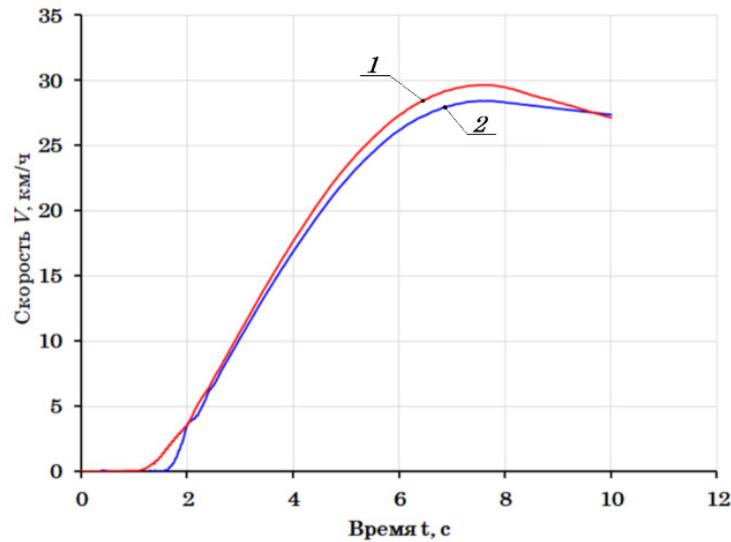


Рисунок 8 – Зависимость скоростей ведущих колёс F_{Ki}^3 в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс задней оси (расчёт):
 1 – скорость колёс передней оси V_{K12}^{Π} ;
 2 – скорость колёс задней оси V_{K34}^{Π}
 Источник: составлено авторами.

Figure 8 – The speeds of the driving wheels F_{Ki}^3 in the process of simulating acceleration of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels on the rear axle slipping (calculation):
 1 – the speed of the wheels on the front axle V_{K12}^{Π} ;
 2 – the speed of the wheels on the rear axle V_{K34}^{Π}
 Source: compiled by the authors.

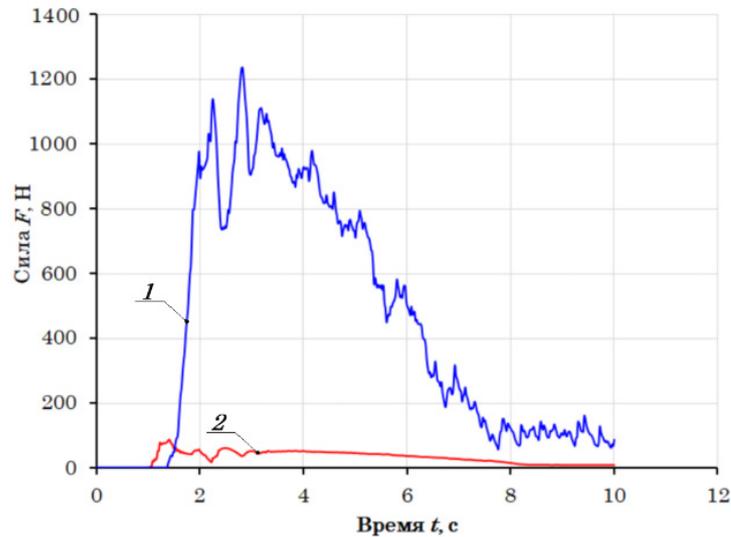


Рисунок 9 – Зависимость сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^3 в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс задней оси (расчёт):
 1 – силы тяги колёс передней оси F_{K12}^{Π} ;
 2 – силы тяги колёс задней оси F_{K34}^{Π}
 Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Traction forces of the driving wheels F_{Ki}^3 in the process of simulating acceleration of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels on the rear axle slipping (calculation):
 1 – traction forces of the wheels on the front axle F_{K12}^{Π} ;
 2 – traction forces of the wheels on the rear axle F_{K34}^{Π}
 Source: compiled by the authors.

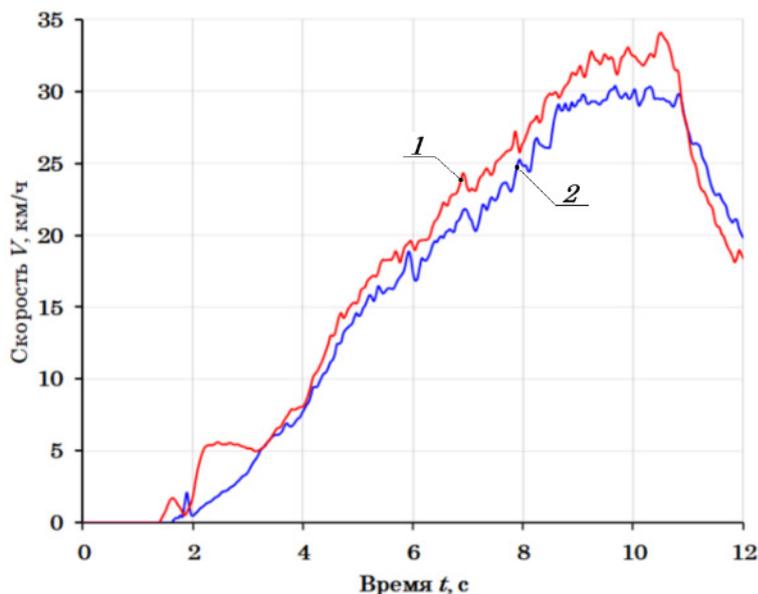


Рисунок 10 – Зависимость скоростей ведущих колёс V_{Ki}^{Π} в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс передней оси (эксперимент):
 1 – скорость колёс передней оси V_{K12}^{Π} ;
 2 – скорость колёс задней оси V_{K34}^{Π}
 Источник: составлено авторами.

Figure 10 – The speeds of the driving wheels V_{Ki}^{Π} in the process of simulating the acceleration of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels on the front axle slipping (experiment):
 1 – the speed of the wheels on the front axle V_{K12}^{Π} ;
 2 – the speed of the wheels on the rear axle V_{K34}^{Π}
 Source: compiled by the authors.

На рисунках 10, 11, 12, 13 показаны зависимости сил тяги F_{Ki} на ведущих колёсах и их скоростей V_{Ki} в процессе имитации разгона с буксованием ведущих колёс КТС, полученные в результате экспериментального исследования. Зависимости получены при параметрах стенда и тестового воздействия, которые использовались в ходе аналитического исследования. Имитация процесса буксования определённой оси в соответствии с методиками проведения эксперимента осуществлялась при помощи фрикционных муфт и моментов инерции маховых масс, связанных с буксующими колёсами $J_{M6}=1,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Разность скоростей V_{Ki} наблюдается до тех

пор (см. рисунки 10 и 12), пока не достигнуто условие подключения муфты системы управления подключаемым полным приводом. При срабатывании муфты происходит процесс синхронизации скоростей V_{Ki} колёс.

Согласно результатам аналитических исследований, в процессе экспериментальных исследований на графиках скоростей V_{Ki} , в начале процесса разгона возникает петля, которая сходится при срабатывании автоматизированной системы управления трансмиссией. При последующем увеличении скоростей V_{Ki} наблюдается их разность, которая также обусловлена значением уставки срабатывания системы.

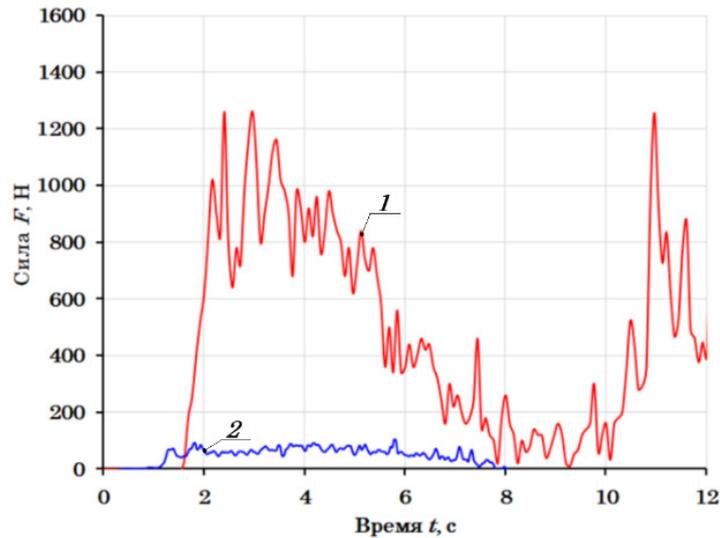


Рисунок 11 – Зависимость сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^{Π} в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс передней оси (эксперимент):
 1 – силы тяги колёс задней оси F_{K34}^{Π} ;
 2 – силы тяги колёс передней оси F_{K12}^{Π}
 Источник: составлено авторами.

Figure 11 – The traction forces of the driving wheels F_{Ki}^{Π} in the process of simulating the acceleration of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels on the front axle slipping (experiment):
 1 – traction forces of the wheels on the rear axle F_{K34}^{Π} ;
 2 – traction forces of the wheels on the front axle F_{K12}^{Π}
 Source: compiled by the authors.

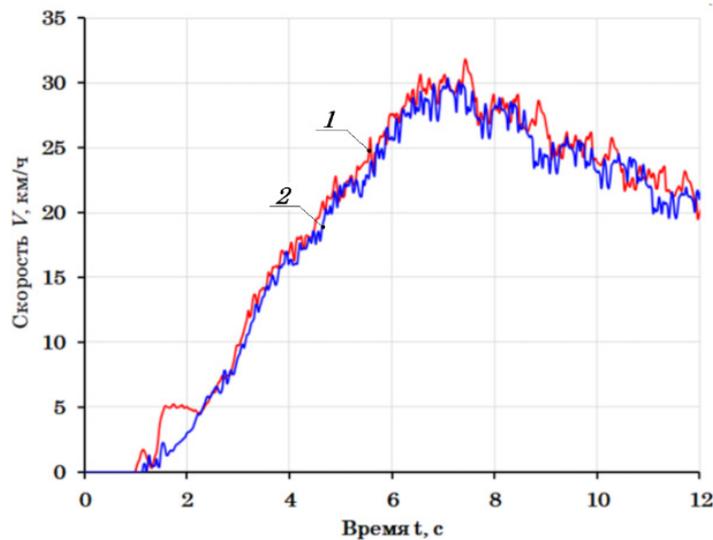


Рисунок 12 – Зависимость скоростей ведущих колёс V_{Ki}^3 в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс задней оси (эксперимент):
 1 – скорость колёс передней оси V_{K12}^{Π} ;
 2 – скорость колёс задней оси V_{K34}^{Π}
 Источник: составлено авторами.

Figure 12 – The speeds of the driving wheels V_{Ki}^3 in the process of simulating acceleration of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels on the rear axle slipping (experiment):
 1 – the speed of the wheels on the front axle V_{K12}^{Π} ;
 2 – the speed of the wheels on the rear axle V_{K34}^{Π}
 Source: compiled by the authors.

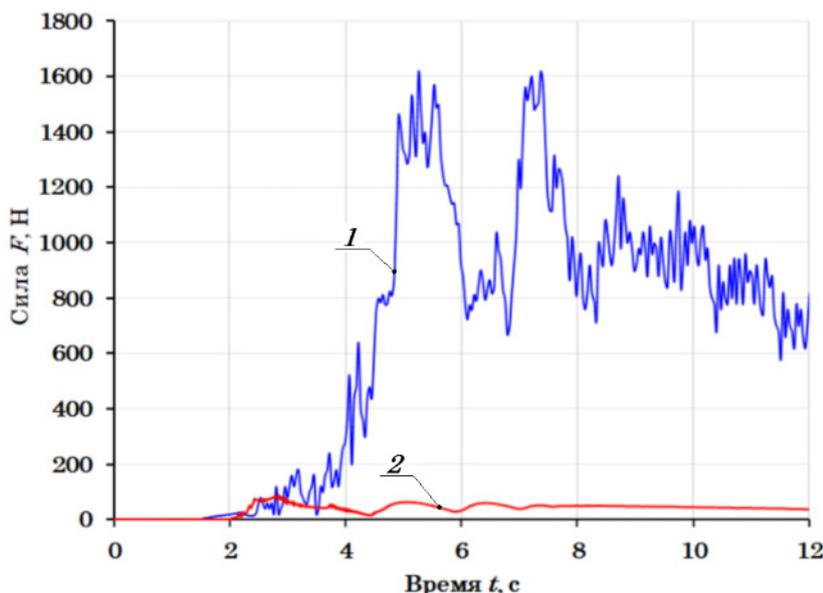


Рисунок 13 – Зависимость сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^{Π} в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс задней оси (эксперимент):
 1 – сила тяги колёс передней оси F_{K12}^3 ;
 2 – сила тяги колёс задней оси F_{K34}^3
 Источник: составлено авторами.

Figure 13 – Traction forces of the driving wheels F_{Ki}^{Π} in the process of simulating the acceleration of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels on the rear axle slipping (experiment):
 1 – traction force of the wheels on the front axle F_{K12}^3 ;
 2 – traction force of the wheels on the rear axle F_{K34}^3
 Source: compiled by the authors.

На графиках (см. рисунки 11 и 13) показаны зависимости сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^{Π} в процессе имитации разгона КТС с буксованием передней оси, а также сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^3 с буксованием задней оси, полученные в результате экспериментального исследования. По графикам можно отметить резкие скачкообразные изменения сил F_{Ki} , которые вызваны крутильными колебаниями в трансмиссиях стенда и автомобиля.

Для оценки соответствия результатов математического моделирования и результатов, полученных в ходе экспериментального исследования при функционировании КТС с системой управления подключаемым полным приводом на стенде с беговыми барабанами при имитации покрытия «МИКСТ», была проведена проверка адекватности разработанного комплекса математических моделей по

критерию Фишера. Оценку адекватности проводили при уровне значимости, равном 95%. Сопоставление данных приведено в виде зависимостей, показанных на рисунках 14, 15, 16, 17, при параметрах, которые использовались в аналитическом исследовании.

На рисунке 14 представлены результаты сравнения зависимостей скоростей ведущих колёс V_{Ki}^{Π} в процессе разгона КТС с имитацией покрытия «МИКСТ» с буксованием колёс передней оси, полученных аналитически и экспериментально. Рассчитанное значение критерия Фишера для скоростей колёс передней оси V_{K12}^{Π} составило $F_p = 664,35$, при табличном значении – $F_{(v_1, v_2, \%)}^T = 3,49$. Рассчитанное значение критерия Фишера для скоростей колёс задней оси V_{K34}^{Π} составило $F_p = 231,55$, при табличном значении – $F_{(v_1, v_2, \%)}^T = 3,49$.

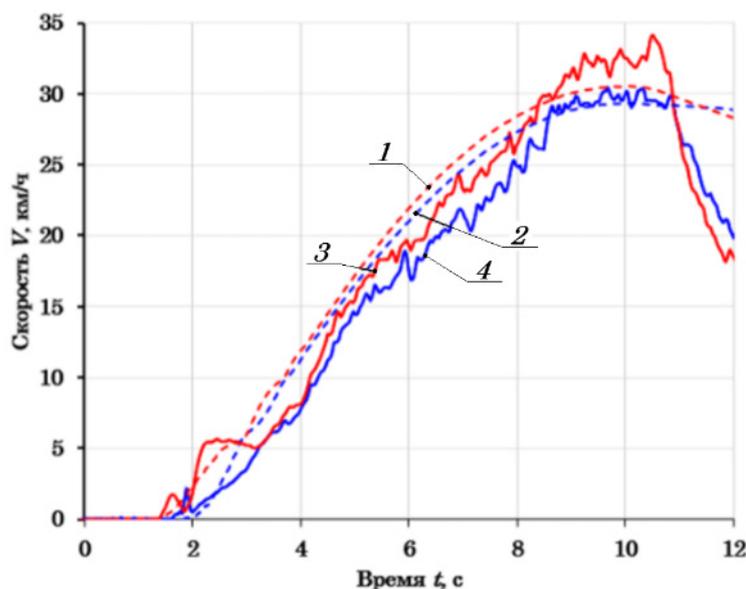


Рисунок 14 – Зависимость скоростей ведущих колёс V_{Ki}^{Π} в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс передней оси:
 1 – скорость колёс передней оси V_{K12}^{Π} (расчёт);
 2 – скорость колёс задней оси V_{K34}^{Π} (расчёт);
 3 – скорость колёс передней оси V_{K12}^{Π} (эксперимент);
 4 – скорость колёс задней оси V_{K34}^{Π} (эксперимент)
 Источник: составлено авторами.

Figure 14 – The speeds of the driving wheels V_{Ki}^{Π} in the process of simulating the acceleration of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels on the front axle slipping:
 1 – the speed of the wheels on the front axle V_{K12}^{Π} (calculation);
 2 – the speed of the wheels on the rear axle V_{K34}^{Π} (calculation);
 3 – the speed of the wheels on the front axle V_{K12}^{Π} (experiment);
 4 – the speed of the wheels on the rear axle V_{K34}^{Π} (experiment)
 Source: compiled by the authors.

Результаты сравнения зависимостей сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^{Π} в процессе разгона КТС с имитацией покрытия «МИКСТ» с буксованием колёс передней оси, полученные в ходе экспериментального и аналитического исследований, представлены на рисунке 15. Рассчитанное значение критерия Фише-

ра для сил тяги колёс передней оси F_{K12}^{Π} составило $F_p = 401,85$, при табличном значении $F_{(v_1, v_2, \%)}^T = 3,49$. Рассчитанное значение критерия Фишера для сил тяги колёс задней оси F_{K34}^{Π} составило $F_p = 561,55$, при табличном значении $F_{(v_1, v_2, \%)}^T = 3,49$.

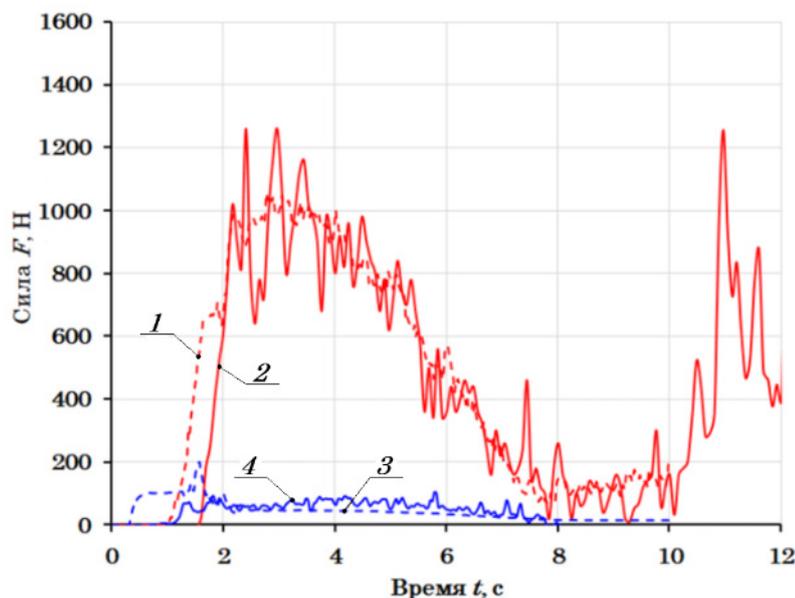


Рисунок 15 – Зависимости сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^{Π} в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс передней оси:

- 1 – силы тяги колёс задней оси F_{K34}^{Π} (расчёт);
 - 2 – силы тяги колёс задней оси F_{K34}^{Π} (эксперимент);
 - 3 – силы тяги колёс передней оси F_{K12}^{Π} (расчёт);
 - 4 – силы тяги колёс передней оси F_{K12}^{Π} (эксперимент)
- Источник: составлено авторами.

Figure 15 – Traction forces of the driving wheels F_{Ki}^{Π} in the process of simulating the acceleration of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels on the front axle slipping:

- 1 – traction forces of the wheels on the rear axle F_{K34}^{Π} (calculation);
 - 2 – traction forces of the wheels on the rear axle F_{K34}^{Π} (experiment);
 - 3 – traction forces of the wheels on the front axle F_{K12}^{Π} (calculation);
 - 4 – traction forces of the wheels on the front axle F_{K12}^{Π} (experiment)
- Source: compiled by the authors.

На рисунке 16 представлены результаты сравнения зависимостей скоростей ведущих колёс V_{Ki}^3 в процессе разгона КТС с имитацией покрытия «МИКСТ» с буксованием колёс задней оси, полученных аналитически и экспериментально. Рассчитанное значение критерия

Фишера для скоростей колёс передней оси V_{K12}^3 составило $F_p = 504,22$, при табличном значении $F_{(v_1, v_2, \%)}^T = 3,49$. Рассчитанное значение критерия Фишера для скоростей колёс задней оси V_{K34}^3 составило $F_p = 630,64$, при табличном значении $F_{(v_1, v_2, \%)}^T = 3,49$.

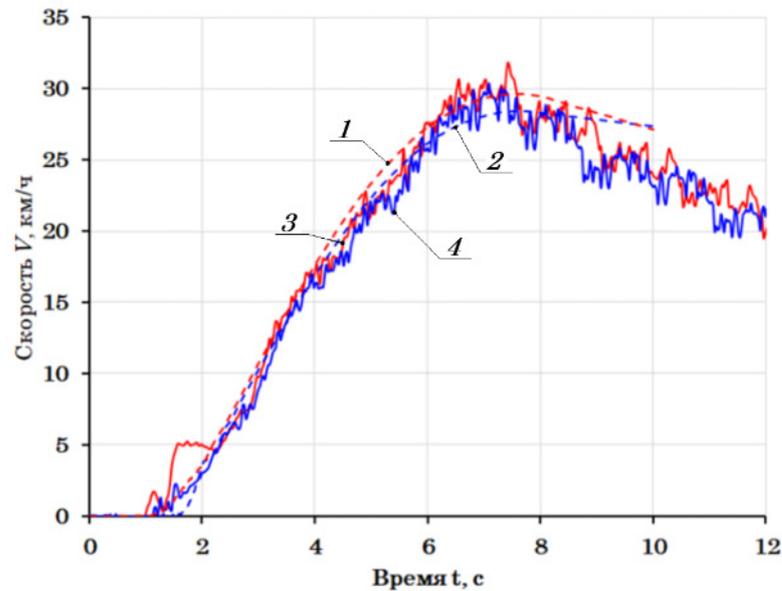


Рисунок 16 – Зависимость скоростей ведущих колёс V_{Ki}^3 в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс задней оси:

- 1 – скорость колёс передней оси V_{K12}^3 (расчёт);
 - 2 – скорость колёс задней оси V_{K34}^3 (расчёт);
 - 3 – скорость колёс передней оси V_{K12}^3 (эксперимент);
 - 4 – скорость колёс задней оси V_{K34}^3 (эксперимент)
- Источник: составлено авторами.

Figure 16 – The speeds of the driving wheels V_{Ki}^3 in the process of simulating acceleration of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels on the rear axle slipping:

- 1 – the speed of the wheels on the front axle V_{K12}^3 (calculation);
 - 2 – the speed of the wheels on the rear axle V_{K34}^3 (calculation);
 - 3 – the speed of the wheels on the front axle V_{K12}^3 (experiment);
 - 4 – the speed of the wheels on the rear axle V_{K34}^3 (experiment)
- Source: compiled by the authors.

Результаты сравнения представлены на рисунке 17, где видны зависимости сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^3 в процессе разгона КТС с имитацией покрытия «МИКСТ» с буксованием колёс задней оси, полученные в результате экспериментального и аналитического исследований. Рассчитанное значение критерия

Фишера для сил тяги колёс передней оси F_{K12}^3 составило $F_p = 140,41$, при табличном значении – $F_{(v_1, v_2, \%)}^T = 3,49$. Рассчитанное значение критерия Фишера для сил тяги колёс задней оси F_{K34}^3 составило $F_p = 681,74$, при табличном значении – $F_{(v_1, v_2, \%)}^T = 3,49$.

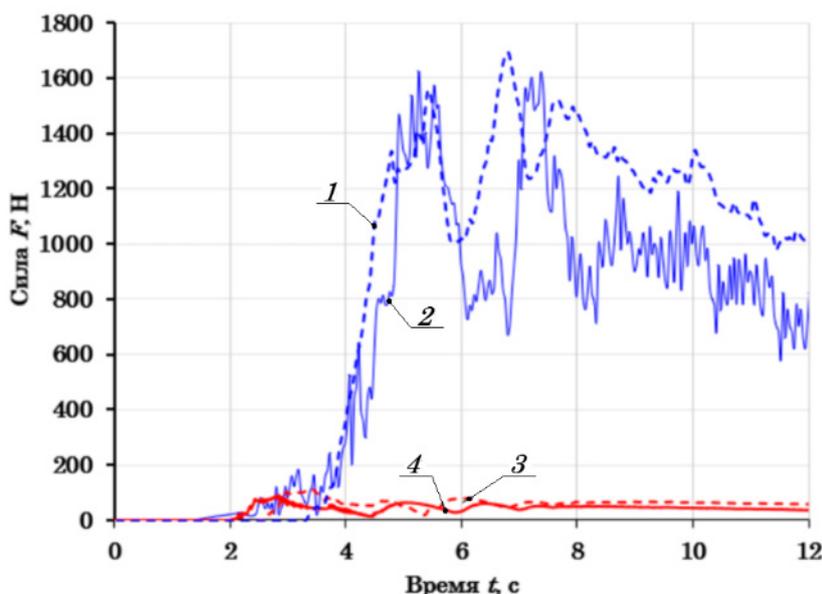


Рисунок 17 – Зависимости сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^3 в процессе имитации разгона КТС Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс задней оси:
 1 – силы тяги колёс передней оси F_{K12}^3 (расчёт);
 2 – силы тяги колёс передней оси F_{K12}^3 (эксперимент);
 3 – силы тяги колёс задней оси F_{K34}^3 (расчёт);
 4 – силы тяги колёс задней оси F_{K34}^3 (эксперимент)
 Источник: составлено авторами.

Figure 17 – Traction forces of the driving wheels F_{Ki}^3 in the process of simulating acceleration of the vehicle Volvo S60 2.5T AWD with the wheels on the rear axle slipping:
 1 – traction forces of the wheels on the front axle F_{K12}^3 (calculation);
 2 – traction forces of the wheels on the front axle F_{K12}^3 (experiment);
 3 – traction forces of the wheels on the rear axle F_{K34}^3 (calculation);
 4 – traction forces of the wheels on the rear axle F_{K34}^3 (experiment)
 Source: compiled by the authors.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты аналитических и экспериментальных исследований позволяют восполнить недостаток знаний о процессах функционирования современных КТС с системами управления подключаемым полным приводом на стендах, реализующих принцип обратимости движения. Это доказывает возможность выполнять качественное и количественное исследование процессов функционирования КТС с системами управления подключаемым полным приводом.

При сравнении результатов расчетных и экспериментальных исследований наблюдается качественное совпадение характеристик процесса разгона КТС с муфтой HALDEX II поколения на стенде с беговыми барабанами. Проверка адекватности комплекса разра-

ботанных математических моделей по силам тяги F_{K34}^3 на ведущих колёсах КТС и средним скоростям, имитируемым на стенде, показывает, что для уровня значимости 0,05 расчетные значения критерия Фишера F_p значительно превышают их табличные значения $F_{(v_1, v_2, \%)}^T$. Таким образом, с достоверностью 95% комплекс математических моделей можно считать значимым. Проведение дальнейших исследований с использованием комплекса математических моделей позволит:

1) оптимизировать тестовые воздействия при испытаниях КТС на стендах;

2) выявлять зависимости изменения параметров функционирования автоматизированных систем управления подключаемым полным приводом от параметров их технического состояния;

3) разрабатывать новейшие стендовые методы и доступное по стоимости оборудование для выполнения комплексного исследования эксплуатационных свойств современных КТС не только с системами управления подключаемым полным приводом, но и с другими автоматизированными системами, такими как системы индивидуального привода на каждом ведущем колесе для КТС с электрическими силовыми установками.

Такой подход значительно снизит временные, трудовые и материальные затраты на производство КТС, проведение технической экспертизы, диагностики и ремонта, что в конечном итоге повысит активную безопасность КТС, а также показатели эффективности их эксплуатации и работы предприятий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бахмутов С.В., Куликов И.К., Барашков А.А. Исследование динамических характеристик автомобиля с системами активной безопасности посредством виртуальных и дорожных испытаний // Труды НАМИ. 2016. № 265. С. 53–65.

2. Заватский А.М., Харитонов С.А. Имитационное моделирование критических режимов, выявленных при эксплуатации систем автоматически подключаемого полного привода // Труды НАМИ. 2018. № 2 (273). С. 26–34.

3. Zavatsky A.M., Keller A.V., Shadrin S.S., Makarova D.A., Furletov Y.M. Development of an Electric All-Wheel-Drive Simulation Model Used to Test Torque Distribution Algorithms. *Energies* 2023, 16, 7144. <https://doi.org/10.3390/en16207144> Ascosta M., Kanarachos S., Blundell M. Road Friction Virtual Sensing A Review of Estimation Techniques with Emphasis on Low Excitation Approaches // *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7(12).

4. Bill Post, Xiaodi Kang and Theodore Klaus, «The Influence of Direct Yaw Control AWD Systems on Vehicle Stability and Response in All Driving Conditions», SAE Technical Paper 2008-01-059, 2008

5. Ghosh J., Tinoli A., Amati N. A Torque Vectoring Strategy for Improving the Performance of a Rear-Wheel-Drive Electric Vehicle // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. Montreal. 2015.

6. Huang, T., Zhao, J., and Li, H., «Research on Stability Control of a Rear Wheel Distributed Drive Electric Formula SAE Vehicle Based on Differential Drive», SAE Technical Paper 2020-01-5234, 2020.

7. Ghosh J., Tinoli A., Amati N. A Torque Vectoring Strategy for Improving the Performance of a Rear-Wheel-Drive Electric Vehicle // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. Montreal. 2015, DOI:10.1109/VPPC.2015.7352887.

8. Lenssen, D., Bertipaglia, A., Santafe, F., and Shyrokau, B., «Combined Path Following and Vehicle Stability Control using Model Predictive

Control», SAE Technical Paper 2023-01-0645, 2023, DOI:10.4271/2023-01-0645.

9. Lu Q., Gentile P., Tota A., Sorniotti A., Gruber P., Costamagna F., De Smet J., «Enhancing vehicle cornering limit through sideslip and yaw rate control. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016. 75, pp. 455–472.

10. Анкинович Г.Г., Вержбицкий А.Н., Жилейкин М.М. Метод определения параметров движения двухосных колесных машин для обеспечения работы системы динамической стабилизации // *Известия ВУЗов. Сер. «Машиностроение»*. 2017. № 4. С. 11–20.

11. Guo, J. Integrated Control of Variable Torque Distribution and Electronic Stability Program Based on Slip Angle Phase/ Guo. J. – 2011 International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT). 2011. P. 133–141, DOI:10.1109/EMEIT.2011.6023881.

12. Ухватов Д.О., Яньков О.С., Федотов А.И. [и др.] Процесс функционирования КТС с автоматизированной системой полного привода на стенде с беговыми барабанами // *Грузовик*. 2024. № 8. С. 12–16. DOI 10.36652/1684-1298-2024-8-12-16.

REFERENCES

1. Bakhmutov S.V. S.V., Kulikov I.K., Barashkov A.A. Investigation of the dynamic characteristics of a car with active safety systems through virtual and road tests. *Trudy NAMU*. 2016; 265: 53-65. (in Russ.)

2. Zavatskiy A.M., Kharitonov S.A. Simulation of the critical modes of automatically connected four-wheel drive systems detected in operation. *Trudy NAMU*. 2018; (2): 26–34. (In Russ.)

3. Zavatskii A., Zavatskii M., Veduta O. Applying Simulation for the Development of Active All-wheel-drive Systems. *International Journal of Applied Exercise Physiology*. 2023; Vol.8 No.3.1 (in Russ.)

4. Bill Post, Xiaodi Kang and Theodore Klaus, «The Influence of Direct Yaw Control AWD Systems on Vehicle Stability and Response in All Driving Conditions», SAE Technical Paper 2008-01-059, 2008

5. Ghosh J., Tinoli A., Amati N. A Torque Vectoring Strategy for Improving the Performance of a Rear-Wheel-Drive Electric Vehicle. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. Montreal. 2015.

6. Huang T., Zhao J., and Li H., Research on Stability Control of a Rear Wheel Distributed Drive Electric Formula SAE Vehicle Based on Differential Drive, SAE Technical Paper 2020-01-5234, 2020.

7. Ghosh J., Tinoli A., Amati N. A Torque Vectoring Strategy for Improving the Performance of a Rear-Wheel-Drive Electric Vehicle. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. Montreal. 2015, DOI:10.1109/VPPC.2015.7352887.

8. Lenssen D., Bertipaglia A., Santafe F., and Shyrokau B. Combined Path Following and Vehicle Stability Control using Model Predictive Control, SAE Technical Paper 2023-01-0645, 2023, DOI:10.4271/2023-01-0645.

9. Lu Q., Gentile P., Tota A., Sorniotti A., Gruber P., Costamagna F., De Smet J., Enhancing vehicle cornering limit through sideslip and yaw rate control. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016; 75: 455-472.

10. Ankinovich G.G., Verzhbitsky A.N., Zhileikin M.M. A method for determining the motion parameters of biaxial wheeled vehicles to ensure the operation of a dynamic stabilization system. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2017; 4: 11-20. (in Russ.)

11. Guo J. Integrated Control of Variable Torque Distribution and Electronic Stability Program Based on Slip Angle Phase. 2011 *International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT)*. 2011: P.133-141, DOI:10.1109/EMEIT.2011.6023881.

12. Ukhvatov D.O., Yankov O.S., Fedotov A. The process of functioning of a CCC with an automated all-wheel drive system on a stand with running drums. *Truck*. 2024; No. 8: 12-16. DOI 10.36652/1684-1298-2024-8-12-16. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Федотов А.И. Научный руководитель, консультант, подготовка текста статьи.

Яньков О.С. Общая организация. Разработка методик экспериментальных исследований, обработка и анализ результатов исследования, подготовка текста статьи.

Ухватов Д.О. Оформление рисунков и описание их, подготовка текста статьи, выполнение экспериментальных исследований, аналитических исследований.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Fedotov A.I. Scientific supervisor, consulting, writing the manuscript.

Yankov O.S. General organization of work, drafting experimental research methods, data processing and analysis, writing the manuscript.

Ukhvatov D.O. Design of drawings and their description, writing the manuscript, contribution to experimental research, data analysis.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Федотов Александр Иванович – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), **ORCID:** 0009-0002-8329-6785, **SPIN-код:** 1342-4073, **Scopus Author ID:** 56341065000, **Researcher ID:** AAZ-7059-2021, e-mail: fai.abs@yandex.ru

Яньков Олег Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), **ORCID:** 0000-0001-6709-4820, **SPIN-код:** 3127-7106, **Scopus Author ID:** 57212165852, **Researcher ID:** AAG-5898-2022, e-mail: yos913005@mail.ru

Ухватов Дмитрий Олегович – аспирант кафедры «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), **ORCID:** 0009-0006-8467-4804, **SPIN-код:** 1763-4986, e-mail: dim.ia@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fedotov Alexander I. – Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Automobile Transport, Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, 83 Lermontov str.), **ORCID:** 0009-0002-8329-6785, **SPIN-код:** 1342-4073, **Scopus Author ID:** 56341065000, **Researcher ID:** AAZ-7059-2021, e-mail: fai.abs@yandex.ru

Yankov Oleg S. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Automobile Transport, Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, 83 Lermontov str.), **ORCID:** 0000-0001-6709-4820, **SPIN-код:** 3127-7106, **Scopus Author ID:** 57212165852, **Researcher ID:** AAG-5898-2022, e-mail: yos913005@mail.ru

Ukhvatov Dmitrii O. – postgraduate student at the Department of Automobile Transport, Irkutsk National Research Technical University (664074, Irkutsk, 83 Lermontov str.), **ORCID:** 0009-0006-8467-4804, **SPIN-код:** 1763-4986, e-mail: dim.ia@mail.ru

**РАЗДЕЛ III.
СТРОИТЕЛЬСТВО
И АРХИТЕКТУРА**



**PART III.
CONSTRUCTION
AND ARCHITECTURE**

Научная статья
УДК 625.712
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-756-769>
EDN: RLEKTO



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КРИТЕРИЯ МОРА – КУЛОНА ДЛЯ РАСЧЕТА ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД ДОРОГ С НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ДВИЖЕНИЯ

А.С. Александров ✉, Т.В. Семенова

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия
aleksandrov00@mail.ru
✉ ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время при расчете дорожной одежды по сдвигу в грунте напряжения сдвига от временной и постоянной нагрузок вычисляются при разных значениях угла внутреннего трения. Следовательно, в расчете дорожной одежды по сдвигу в грунте оперируют напряжениями, действующими вдоль двух разных площадок, что является ошибкой и требует исправления.

Методы и материалы. Разработана модель прогнозирования накапливаемой остаточной деформации, которая при заданных значениях минимального главного напряжения и числа приложенных нагрузок позволяет определять величину максимального главного напряжения, при которой остаточная деформация достигает предельной величины. Используя значение главных напряжений, вычисляются сцепление и угол внутреннего трения для числа нагрузок, принятого в расчете деформации.

Результаты. Произведен расчет параметров сопротивления сдвигу и сопротивления всестороннему растяжению при применении для расчета накапливаемой остаточной деформации предлагаемой модели и модели Барксдейла – Казарновского. Выполнено сопоставление результатов расчета.

Заключение. Полученные результаты позволяют сделать расчет дорожной одежды дороги с низкой интенсивностью движения по критерию сопротивления сдвигу в грунте.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сопротивление сдвигу, критерий Мора – Кулона, гипотеза упрочнения грунта

Статья поступила в редакцию 02.09.2024; одобрена после рецензирования 15.10.2024; принята к публикации 17.10.2024.

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: Александров А.С., Семенова Т.В. Совершенствование критерия Мора – Кулона для расчета дорожных одежд дорог с низкой интенсивностью движения // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 5. С. 756-769. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-756-769>

© Александров А.С., Семенова Т.В., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-756-769>
EDN: RLEKTO

IMPROVEMENT OF MOHR-COULOMB CRITERION FOR DESIGNING PAVEMENTS OF ROADS OF LOW TRAFFIC INTENSITY

Anatoly S. Aleksandrov ✉, Tatiana V. Semenova

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

aleksandrov00@mail.ru

✉ corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Currently, when designing road pavements taking into account soil shear displacement, shear stresses from temporary and permanent loads are calculated at different values of internal friction angle. Consequently, in terms of soil shear displacement while designing road pavements, stresses applied along two different sites are considered, which is an error and requires correction.

Materials and methods. A model for predicting accumulated residual deformation has been developed, which allows for determining the value of the maximum principal stress at which the residual deformation reaches its limit value, given that values of the minimum principal stress and the number of applied loads are known. The values of principal stresses being taken into account, the adhesion and the angle of internal friction are calculated for the number of loads considered in the deformation calculation.

Results. The calculation of shear resistance and resistance to universal tension parameters was performed by applying the proposed model and the Barksdale-Kazarnovsky model for calculating the accumulated residual deformation. The calculation results have been compared.

Conclusions. The obtained results allow for designing surfaces of roads of low traffic intensity based on the criterion of resistance to soil shear displacement.

KEYWORDS: shear strength, Mohr-Coulomb criterion, soil hardening hypothesis

The article was submitted 02.09.2024; approved after reviewing 15.10.2024; accepted for publication 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. 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. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-756-769>

© Aleksandrov A.S., Semenova T.V., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время дорожные одежды нежесткого типа различной капитальности, предназначенные для дорог с низкой интенсивностью движения, проектируют по двум принципиально разным методикам. Капитальные и облегченные нежесткие дорожные одежды рассчитывают по трем критериям прочности: упругого прогиба, сопротивления монолитных слоев растяжению от изгиба и сопротивления сдвигу в грунте земляного полотна. Дорожные одежды переходного типа проектируют по критериям обеспечения требуемого модуля деформации дорожной одежды и по эксплуатационной надежности, рассчитывая дорожную одежду по глубине колеи и на износ покрытия.

Необходимость расчета по сопротивлению сдвигу в грунте земляного полотна обусловлена двумя обстоятельствами. Во-первых, если напряжение сдвига не превышает предельное значение, то накапливаемая остаточная деформация мала и обусловлена объемными деформациями, то есть уплотнением. Во-вторых, возникновение предельного состояния по критерию Мора – Кулона в точке с наибольшим напряжением сдвига возможно только при воздействии на поверхность грунтового сооружения давления, равного первой критической нагрузке. Согласно общепринятому учению Н.М. Герсеванова о фазах деформирования грунтового основания, первая критическая нагрузка разделяет фазы уплотнения и сдвигов. При работе грунта в фазе уплотнения осадка линейно зависит от давления на основание, а в фазе сдвигов эта связь нелинейная. Вследствие этого расчет по сопротивлению сдвигу, базирующийся на критерии Мора – Кулона, гарантирует правомерность применения физических уравнений теории упругости (обобщен-

ный закон Гука), в котором связь деформаций с напряжениями линейна. Отметим, что расчеты дорожных одежд по критериям упругого прогиба, требуемого модуля деформации, глубины колеи базируются на физических уравнениях линейной теории упругости. В данном случае расчет по сдвигу является индикатором правомерности применения физических уравнений (в деформациях или в напряжениях), предполагающих их линейную зависимость.

Отмеченные два обстоятельства обуславливают актуальность работ, направленных на совершенствование расчета дорожных одежд по сдвигу в грунте.

В основе расчета дорожной одежды по сдвигу в грунте лежит условие пластичности Мора – Кулона, имеющее вид [1, 2]:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi \leq c, \quad (1)$$

где σ_1 и σ_3 – максимальное и минимальное главные напряжения, Па; c и φ – сцепление и угол внутреннего трения, МПа и град.

Критерий расчета дорожной конструкции по сдвигу в грунте содержит сумму эквивалентных напряжений от двух нагрузок: временной T_σ (транспортной) и постоянной T_γ (вес слоев, расположенных выше проверяемого элемента). Правомерность суммирования напряжений сдвига T_σ и T_γ вытекает из принципа независимости действия сил. Поэтому критерий расчета записан в виде

$$T_\sigma + T_\gamma \leq k_d \cdot c, \quad (2)$$

где k_d – известный коэффициент, регламентируемый ОДН 218.046–01¹, ПНСТ 265–2018², ПНСТ 542–2021³ и обсуждаемый в настоящее время ГОСТ Р 71404–2024⁴.

¹ ОДН 218.046–01 (взамен ВСН 46–83) (срок действия до 14.08.2018 г.) Проектирование нежестких дорожных одежд: утвержден и введен в действие распоряжением Росавтодора Министерства транспорта РФ от 20 декабря 2000 г. № ОС-35-Р – М.: Стандартинформ, 2000 // ИС «Техэксперт» / АО «Кодекс». Дата обновления: 16.09.2024.

² ПНСТ 265–2018 (взамен ОДН 218.046–01) (срок действия с 15.05.2018 г. до 15.05.2021 г.) Дороги автомобильные общего пользования. Проектирование нежестких дорожных одежд: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 апреля 2018 г. № 3-пнст – М.: Стандартинформ, 2018 // ИС «Техэксперт» / АО «Кодекс». Дата обновления: 16.09.2024.

³ 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: 16.09.2024.

⁴ 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: 16.09.2024.

Каждое из напряжений сдвига, записанных в левой части неравенства (2), определяется левой частью неравенства (1), но с различным подходом к вычислению главных напряжений. В нормативных методах расчета напряжение сдвига T_σ вычисляют графоаналитическим методом по соответствующей номограмме, но при величине угла внутреннего трения φ_N , зависящей от общего числа приложенных нагрузок N . Подход к определению напряжения сдвига T_γ в современных нормах претерпел некоторые изменения. Однако в расчетах T_γ по нормам XX и XXI вв. есть общие черты. Они состоят в том, что напряжение σ_1 вычисляется произведением объемного веса верхнего слоя двухслойной модели γ_{cp} (МН/м³) и толщины этого слоя, под которой понимается сумма толщин слоев дорожной конструкции Σh (м), расположенных выше проверяемого слоя. Объемный вес γ_{cp} находится как усредненное значение по толщине этих вышележащих слоев. Минимальное главное напряжение σ_3 вычисляется произведением коэффициента бокового давления ξ и напряжения $\sigma_1 = \gamma_{cp} \cdot \Sigma h$. Следовательно, напряжение сдвига T_γ находится по формуле

$$T_\gamma = \frac{\gamma_{cp} \cdot \Sigma h - \xi \cdot \gamma_{cp} \cdot \Sigma h}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\gamma_{cp} \cdot \Sigma h + \xi \cdot \gamma_{cp} \cdot \Sigma h}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (3)$$

Если в зависимости (3) привести подобные, то получим формулу А.М. Кривисского, по которой вычисляли напряжения сдвига в нормах XX в. Эта формула имеет вид

$$T_\gamma = \frac{\gamma_{cp}}{2 \cdot \cos \varphi} \cdot [1 - \xi - (1 + \xi) \cdot \sin \varphi] \cdot \Sigma h. \quad (4)$$

В ранее действовавших инструкциях по расчету дорожных одежд коэффициент бокового давления ξ определяли по формуле А.Н. Динника, то есть отношением коэффициента Пуассона μ к разности единицы и коэффициента Пуассона. Таким образом, классическое решение базировалось на гипотезе о компрессионном сжатии грунта от действия постоянной нагрузки. В современных нормах XXI в. принято $\xi = 1$, то есть современные решения полагают, что под действием постоянной нагрузки грунт испытывает гидростатическое сжатие. В случае $\xi = 1$ формула (4) примет вид

$$T_\gamma = -\gamma_{cp} \cdot \Sigma h \cdot \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = -\gamma_{cp} \cdot \Sigma h \cdot \tan \varphi. \quad (5)$$

Для иллюстрации одной из ошибок, допущенных в современных стандартах по проектированию нежестких дорожных одежд, зависимость (5) подставим в неравенство (2). Тогда получим

$$T_\sigma - \gamma_{cp} \cdot \Sigma h \cdot \tan \varphi \leq k_\delta \cdot c. \quad (6)$$

Неравенство (6) можно привести к виду

$$T_\sigma \leq k_\delta \cdot c + \gamma_{cp} \cdot \Sigma h \cdot \tan \varphi. \quad (7)$$

В правой части неравенства (7) записано выражение для определения предельного напряжения сдвига в трактовке ОДН 218.046-01, которое было получено научной группой, возглавляемой В.Д. Казарновским. В ОДН 218.046-01 эта формула имеет вид

$$T_{np} = k_\delta \cdot c + 0,1 \cdot \gamma_{cp} \cdot \Sigma h \cdot \tan \varphi_{ст}, \quad (8)$$

где 0,1 – множитель размерности, необходимость которого обусловлена единицами измерения γ_{cp} (кг/см³) и Σh (см); $\varphi_{ст}$ – статический угол внутреннего трения.

Авторы ПНСТ 265–2018, ПНСТ 542–2021 решили, что в зависимость (8) нужно ввести скобки. В результате абсолютно правильно выведенная формула (8) приобрела вид

$$T_{np} = k_\delta \cdot (c + 0,001 \cdot \gamma_{cp} \cdot \Sigma h \cdot \tan \varphi_{ст}), \quad (9)$$

где 0,001 – множитель размерности, необходимость которого обусловлена единицами измерения γ_{cp} (кН/м³) и Σh (м).

Отметим, что формула (9) содержит ошибку в виде введенных скобок, которые в этой зависимости не нужны. Здесь подчеркнем, что группа В.Д. Казарновского вывела формулу (8) верно, проделав те же выкладки, что и мы, получая критерий (7). Также отметим, что возврат от ошибочного решения (9) к верной зависимости (8) нормативный расчет по сдвигу не исправит. Этот вывод обусловлен гипотезой упрочнения грунта, положенной в основу расчета напряжения сдвига от временной нагрузки T_σ .

Предпосылкой к изменению расчета напряжения T_σ стала работа [3], в которой предложена гипотеза упрочнения зернистого материала при действии повторной нагрузки, приводящей к эффекту накопления остаточной деформации. Эта гипотеза развита в работах известных специалистов Ф. Lekar и А. Dawson [4, 5].

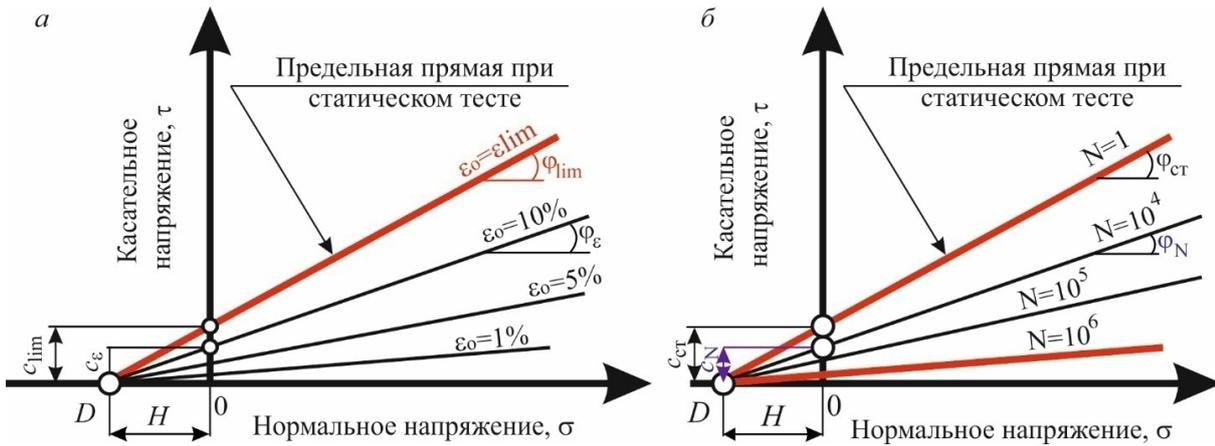


Рисунок 1 – Изменение местоположения предельной прямой на τ–σ плане:
 а – зависимость параметров с и φ от величины накопленной остаточной деформации ε₀,
 Источник: заимствован [4, 5];
 б – зависимость параметров с и φ от числа приложенных нагрузок N
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Changes in the location of the limit line on the τ–σ plan:
 а) – dependence of parameters c and φ on the value of accumulated residual deformation ε₀,
 Source: borrowed [15, 16];
 б) – dependence of parameters c and φ on the number of applied loads N,
 Source: compiled by the authors.

Согласно этой гипотезе с увеличением накопленной остаточной деформации происходит изменение местоположения предельной прямой на τ–σ или q–p плане, описываемое увеличением угла внутреннего трения φ_ε.

На рисунке 1 мы привели графическую интерпретацию этой гипотезы, на которой показали изменение местоположения предельной прямой Кулона на τ–σ плане при увеличении накопленной остаточной деформации (рисунок 1, а) и уменьшении числа приложенных нагрузок (рисунок 1, б).

Из анализа данных рисунка 1, а следует, что центром вращения прямой Кулона является точка D, вследствие чего длина отрезка H при любых значениях параметров c_ε и φ_ε всегда одинакова. Это значит, что сопротивление всестороннему растяжению H при увеличении остаточной деформации при сжатии не изменяется. Данное условие обеспечивается выполнением уравнений:

$$H = c_{\epsilon} \cdot \operatorname{ctg} \varphi_{\epsilon} = c_{\text{lim}} \cdot \operatorname{ctg} \varphi_{\text{lim}}; \quad (10)$$

$$H = c_N \cdot \operatorname{ctg} \varphi_N = c_{\text{ct}} \cdot \operatorname{ctg} \varphi_{\text{ct}}.$$

Уравнения (10) трудно подтвердить экспериментально. Анализ результатов испытаний зернистых материалов [6, 7] трехосным сжатием повторной нагрузкой показывает, что сопротивление H изменяется. Изменение величины

сопротивления H вызвано тем, что угол внутреннего трения φ_ε изменяется так, как показано на рисунке 1, а, то есть увеличивается при росте деформации, а сцепление c_ε этой зависимости не подчиняется. Отсюда следует, что до настоящего времени модель упрочнения грунта, показанная на рисунке 1, а, не нашла экспериментального подтверждения. Однако именно эта модель стала основой для современных стандартов РФ, в которых модель упрочнения грунта дается графической зависимостью, представленной на рисунке 1, б.

Для оценки соответствия параметров сопротивления сдвигу грунтов, регламентируемых ПНСТ 542–2021, модели упрочнения грунта, показанной на рисунке 1, б, достаточно выполнить расчет сопротивления всестороннему растяжению. Такой расчет производится по второй формуле выражений (10). Результаты расчета приведены в таблице 1.

Из анализа данных таблицы 1 следует, что при одной и той же влажности грунта, но разном количестве нагрузок, значения сопротивления H неодинаковы. Это говорит о том, что данные о сцеплении и угле внутреннего трения, представленные в стандартах России, не соответствуют модели, показанной на рисунке 1, б, которая была положена в основу вычисления этих значений. Поэтому данные российских стандартов о параметрах, характеризующих сопротивление сдвигу грунтов, нуждаются в пересмотре.

Таблица 1

Параметры сопротивления сдвигу и всестороннему растяжению суглинков и глин
Источник: в части сопротивления растяжению - составлено авторами.

Table 1

Parameters of shear resistance and universal tensile strength of loams and clays
Source: in terms of tensile strength - compiled by the authors.

Расчетная влажность, W/W_L	Характеристики сопротивления сдвигу по ПНСТ 542–2021										Сопротивление растяжению H при числе приложенных нагрузок, кПа				
	$\frac{c}{\sigma_3}$ при числе приложенных нагрузок, градус					$\frac{\tau}{\sigma_3}$ при числе приложенных нагрузок, кПа									
	1	10^3	10^4	10^5	10^6	1	10^3	10^4	10^5	10^6	1	10^3	10^4	10^5	10^6
0,60	24	20	14,5	11	9	30	30	16	14	12	67	82	62	72	76
0,65	21	15	11	8	7	24	19	13	11	9	63	71	67	78	73
0,70	18	11,5	8,5	6,5	5,5	19	13	9	7	6	58	64	60	61	62
0,75	15	10	7,5	5	4	15	9	6	5	4	56	51	46	57	57
0,80	13	8	5	3	2,5	11	7	5	3	2	48	50	57	57	46
0,90	11,5	6,5	3,5	2,2	2,0	8	4	4	2	1	39	35	65	52	29

Примечание: W – влажность грунта, %; W_L – влажность на границе текучести, %.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Зависимость, проиллюстрированную на рисунке 1, б, можно получить путем добавления в критерий Мора – Кулона расчета остаточной деформации, накапливаемой в процессе действия повторной нагрузки. В общем виде модель накопления остаточной деформации описывается функцией [8]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_N &= \varepsilon_1 \cdot f(\sigma_1; \sigma_3; N; a; b); \\ \varepsilon_1 &= f(\sigma_1; \sigma_3; c; d), \end{aligned} \quad (11)$$

где ε_1 – остаточная деформация от первого приложения нагрузки; a , b , c и d – параметры материала, характеризующие деформацию ε_1 и накапливаемую деформацию ε_N .

Из анализа формул (11) следует, что при известных значениях параметров расчета σ_3 , N , a , b , c и d , а также ограниченной величине деформации ε_N , например $\varepsilon_N=0,15$, имеется возможность расчета напряжения σ_1 . После вычисления максимального главного напряжения σ_1 вычисляется девиатор напряжения $\sigma_1-\sigma_3$ и строится круг напряжений Мора. Аналогичные расчеты можно выполнить для разных напряжений σ_3 , что приводит к возможности построения семейства кругов напряжений и последующему вычислению параметров C_N и φ_N , соответствующих заданному при расчете числу нагрузок N , например $N=10^3$. Аналогичным образом строится семейство

кругов Мора для другого количества нагрузок N , например, $N=10^4$, к которым проводится своя предельная прямая и вычисляются характерные значения C_N и φ_N . В этом случае, увеличивая число нагрузок N , но сохраняя все остальные параметры расчета, величина напряжения σ_1 будет уменьшаться. Значит, будет уменьшаться девиатор $\sigma_1-\sigma_3$, который является диаметром круга напряжений. Для каждой предельной прямой, применяя общепринятые формулы, можно вычислить параметры C_N и φ_N , которые при уменьшении величины $\sigma_1-\sigma_3$ тоже должны уменьшаться.

Модель упрочнения грунта (см. рисунок 1, б) имеет один недостаток, не позволяющий применить эту модель к расчету дорожной при большом числе прикладываемых нагрузок. Этот недостаток показан в нашей работе [1], он связан с тем, что при числе нагрузок N , стремящихся к бесконечности и ограниченном значении остаточной деформации $\varepsilon_N=0,15$, величина деформации ε_1 будет стремиться к нулю. Безусловно, что при $\varepsilon_1=0$ величина девиатора напряжений $\sigma_1-\sigma_3$ тоже равна нулю. Так как при $\sigma_1-\sigma_3=0$ круг напряжений сводится в точку, расположенную на оси абсцисс графика, показанного на рисунке 1, б, то прямая Кулона ложится на ось σ . В этом случае параметры уравнения прямой имеют нулевые значения, то есть $C_N=0$ и $\varphi_N=0$. В расчете дорожной одежды нулевые значения параметров грунта недопустимы. Поэтому разработчикам

нормативных документов потребовалось ограничить число расчетных нагрузок предельной величиной $N=10^6$.

При анализе формул (8) и (9) несложно заметить, что предельное напряжение сдвига определяется при угле внутреннего трения $\varphi_{ст}$. Значит, углы наклона площадки скольжения, на которой определяется предельное напряжение $T_{пр}$, к главным осям составят $\alpha_1=\pi/4-\varphi_{ст}/2$ и $\alpha_2=\pi/4+\varphi_{ст}/2$. В расчете напряжения T_{σ} оперируют другим значением угла внутреннего трения φ_N . Это значит, что напряжение T_{σ} действует на другой площадке, повернутой к главным осям под углами $\alpha_1=\pi/4-\varphi_N/2$ и $\alpha_2=\pi/4+\varphi_N/2$. Отсюда вытекает вывод, что напряжения T_{σ} и $T_{пр}$ вычислены для разных площадок, вследствие чего их сравнивать нельзя. Поэтому общепринятое решение содержит ошибку, которая делает это решение неприемлемым для расчета дорожной конструкции.

Причина неудачных модификаций критерия Мора – Кулона с упрочнением, показанным на рисунке 1, б, лежит в необходимости ограничения числа нагрузок некоторой предельной величиной. В качестве этой величины принято $N=10^6$. Такое ограничение привело к существенному уменьшению значений C_N и φ_N , в результате чего потребовалось введение несуразных допущений. Но если число расчетных нагрузок ограничить меньшей величиной N , например, $N=5 \cdot 10^4$, то ввода ошибочных допущений можно избежать. Для дорог общего пользования допущение $N=5 \cdot 10^4$ принять нельзя вследствие большой интенсивности движения и наличия в составе движения большегрузных автомобилей и автопоездов. Но на дорогах с низкой интенсивностью движения ограничение $N=5 \cdot 10^4$ является естественным, а значит оно приемлемо.

В общепринятой модели, показанной на рисунке 1, б, есть еще один недостаток, суть которого состоит в применении для расчета деформации ε_N , российской модификации устаревшей феноменологической модели Ричарда Барксдейла [9, 10].

В настоящее время разработано много моделей, позволяющих прогнозировать накопленную остаточную деформацию, они приведены в обзорных частях работ [8, 11, 12]. Эти модели не лишены недостатков. Поэтому целью нашей работы является модификация модели упрочнения, основанная на анализе и разработке новой модели для расчета деформации ε_N .

В области исследования процесса накопления остаточных деформаций грунтами и зернистыми материалами выполнено множество теоретических и экспериментальных работ. К таким работам необходимо отнести исследования, проведенные с применением динамических приборов трехосного сжатия. Вследствие специфики экспериментов данные исследования выполнены нашими зарубежными коллегами: J. Anochie-Boatehg, G.K. Arnold, R.S. Ashtiani, R.D. Barksdale, J.R. Boyce, F. Brecciaroly, S. F. Brown, L.W. Cheung, I.F. Collins, A.R. Dawson, L. Francken, A. Hettler, P. Hornych, M. Huurman, W.J. Kenis, S. Khedr, P. Kolisoja, J. Leng, J. Long, J.-L. Paute, I. Peres, G.T.H. Sweere, H.L. Theyse, V. Veverka, A. Visser, H. Wolff и др. В России трехосные испытания грунтов для нужд дорожной отрасли выполнены в 80–90-х годах прошлого столетия. Для этого применен прибор динамический трехосного сжатия, имевшийся в то время в лаборатории центрального Союздорнии. Испытания проведены научной группой В.Д. Казарновского, в которой результаты по испытанию песчаных грунтов получены В.М. Смирновым и Ю.И. Косаревым, а тестирование глинистых грунтов проведено Е.А. Петрушиным и А.С. Пилипенко. На основе этих данных разработана феноменологическая модель накопления остаточной деформации, легшая в основу модели, показанной на рисунке 1, б. Эта модель является модификацией модели Ричарда Барксдейла [9, 10]. Оригинальная модель [9, 10] является возрастающей логарифмической функцией, описывающей увеличение остаточной деформации ε_N при возрастании количества приложенных нагрузок N . В данной модели деформация от первого приложения нагрузки зависит от уровня напряженного состояния, определяемого отношением девиатора к предельной величине напряжения сдвига, вычисляемой из критерия Мора – Кулона с критическими значениями параметров $C_{ст}$ и $\varphi_{ст}$. Специфика зарубежных исследований состоит в том, что моделей накопления остаточных деформаций разработано много, история их создания приведена в работах [8, 11, 12]. Продолжительность применения любой феноменологической модели определяется отрезком времени, в течение которого новая, более точная модель еще не создана, но как только такая модель будет разработана, действие ее предшественника заканчивается. Поэтому в зарубежных исследованиях модель Ричарда Барксдейла имеет чисто историческое значение, а на смену ей пришли другие [13, 14, 15, 16, 17], среди кото-

рых наиболее современными являются зависимости, базирующиеся на теории приспособляемости. Несмотря на большое количество феноменологических моделей накопления остаточной деформации следует отметить, что общего решения для большой номенклатуры грунтов и зернистых материалов пока не найдено. Вследствие этого поиск такого решения является актуальным для дорожной отрасли.

В качестве рабочей гипотезы возьмем предположение, что процесс накопления остаточной деформации носит наследственный характер, состоящий в том, что величина накопленной деформации обусловлена историей приложения нагрузок. Такое предположение позволяет вычислять накопленную остаточную деформацию ε_N суммированием деформаций, возникающих от каждого приложения нагрузки ε_i . Следовательно, вычисление накопленной остаточной деформации производится по формуле

$$\varepsilon_N = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i. \quad (12)$$

Безусловно, что из-за большого числа нагрузок применение формулы (12) на практике неудобно. Поэтому в зависимости (12) операцию суммирования целесообразно заменить интегрированием функции приращения остаточной деформации по числу нагрузок. Для этого необходимо показать, что процесс накопления пластических деформаций непрерывен. Рассматривая расчет дорожной одежды, можно отметить, что все транспортные средства, оказывающие силовое воздействие, приводятся к расчетной нагрузке, распределенной по круглой площадке с давлением, равным давлению воздуха в шине. Поэтому при расчете дорожной одежды все нагрузки считаются одинаково равными расчетной нагрузке, к которой приводится нагрузка от любого транспортного средства, но со своим коэффициентом приведения. Такая специфика расчета позволяет нам принимать суммарное число нагрузок с любым количеством знаков после запятой. Эта особенность позволяет считать гипотезу о непрерывности процесса накопления деформации правомерной.

При динамических трехосных испытаниях [15, 16, 17, 18, 19] продолжительность действия напряжений и период отдыха материала между нагрузками одинаковые, как правило, длительность нагрузки составляет 0,1 с, интервал между нагрузками 0,9 с. Таким образом, продолжительность каждого цикла со-

ставляет 1 с. Эта особенность позволяет описывать приращение остаточной деформации степенной функцией, имеющей вид,

$$\varepsilon_i = a \cdot n^b, \quad (13)$$

где a и b – параметры материала и уровня напряженного состояния.

Применяя зависимость (13) в качестве подынтегральной функции, процесс суммирования деформаций можно представить уравнением

$$\varepsilon_N = \varepsilon_1 \cdot \left(1 + \int_1^N a \cdot n^b dn \right). \quad (14)$$

Из анализа выражения (14) следует, что общий вид конечной формулы определяется величиной параметра b . Если параметр $b = -1$, то функция накопления деформации будет логарифмическая, подобная функциям Р. Баркстейла и В.Д. Казарновского. Но при $b \neq -1$ функция накопления деформации будет степенная. При выборе значения параметра b будем учитывать известные экспериментальные данные о точности различных функций при определении накопленной деформации. Из анализа работ [15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23] можно сделать вывод, что применимость различных функциональных зависимостей обуславливается количеством нагрузок. Установлено, что экспоненциальные функции являются наилучшим приближением при сравнительно малом числе нагрузок, не превышающем $N \leq 10^3$ [23]. С увеличением числа нагрузок точность экспоненциальных функций уменьшается, и с ними конкурируют логарифмические зависимости. При количестве нагрузок, варьирующемся в интервале $10^3 < N \leq 10^4$, необходимо решать задачу выбора функциональной зависимости между экспоненциальной и логарифмической. Экспоненциальные функции перестают быть пригодными при числе нагрузок, превышающем $N > 10^4$. В этом случае накопление остаточной деформации описывается логарифмическими зависимостями, которые являются наиболее пригодным приближением при варьировании числа нагрузок в диапазоне $10^4 < N \leq 10^5$. При числе нагрузок, превышающем 100 тыс., наряду с логарифмической зависимостью приемлемым приближением являются степенная функция, которая становится однозначно возможным приближением при $N > 10^6$. Учитывая, что для проектирования переходных дорожных одежд на дорогах с низкой интенсивностью движения число

нагрузок, прикладываемых за срок службы, находится в пределах $10^3 < N \leq 5 \cdot 10^4$, нужно ориентироваться на логарифмическую зависимость. Поэтому приняв $b = -1$ и выполнив интегрирование (14), получим

$$\varepsilon_N = \varepsilon_1 \cdot \left(1 + \int_1^N a \cdot n^{-1} dn \right) = \varepsilon_1 \cdot (1 + a \cdot \ln N). \quad (15)$$

В уравнении (15) параметр a является характеристикой как материала, так и уровня напряженного состояния. Значения этого параметра высчитываются по данным трехосных испытаний материалов повторной нагрузкой. Сложность определения величины данного параметра обусловлена тем, что такие испытания с требуемым числом приложения нагрузок проведены исключительно за рубежом. Показания российских специалистов ориентированы на расчеты сопротивления оснований фундаментов сейсмическим воздействиям. Вследствие этого российские экспериментальные данные [18, 19] получены для малого числа повторных нагрузок. Значит, нам необходимо анализировать факты зарубежных специалистов, полученные для материалов и грунтов, соответствующих требованиям отечественных стандартов.

Второй особенностью формулы (15) является зависимость деформации ε_1 от главных напряжений σ_1 и σ_3 . Современные математические модели зависимости объемного, продольного и поперечного модуля деформации грунта [18, 20, 21, 22, 23] содержат до пяти функций. Проблематичность применения современных эмпирических зависимостей состоит в необходимости определения большого числа параметров модели. Это определение необходимо выполнить для каждого материала при его различном состоянии по плотности (пористости) и влажности, что требует огромного количества испытаний. В связи с такой проблемой для расчета деформации ε_1 нами применяется более простая зависимость, полученная М. Шентоном. С учетом модели М. Шентона формула (13) примет вид

$$\varepsilon_N = A \cdot \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_3} \right)^B \cdot (1 + a \cdot \ln N), \quad (16)$$

где A и B – параметры материала.

В отличие от современных эмпирических зависимостей [21, 22, 23] формула (16) содержит всего три параметра, что значительно упрощает их определение по данным трехосных испытаний повторной нагрузкой, выполненных за рубежом. В формуле (16) главные напряжения содержатся как в явном виде, так в функции параметра a . Тем не менее, определив значения параметров материала A , B и a , а также задавая значения σ_3 и N , можно рассчитать значение напряжения σ_1 , при котором деформация ε_N приобретет предельную величину $\varepsilon_{lim} = 15\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для определения параметров динамической модели Мора – Кулона, показанной на рисунке 1, б, необходимо использовать определенный алгоритм их вычисления. Согласно этому алгоритму расчет сцепления и угла внутреннего трения нужно выполнять в следующей последовательности:

1. Разработать математическую модель накопления остаточной деформации в условиях трехосного сжатия при многократном воздействии нагрузок и определить значения постоянных коэффициентов эмпирической формулы. Например, для зависимости (16) нужно установить значения коэффициентов A , B и a для различных материалов и грунтов при разных показателях их физических свойств (влажность, коэффициент уплотнения, гранулометрический состав и т.п.).

2. В полученной модели накапливаемую деформацию ε_N нужно ограничить величиной 15%, задать значения σ_3 и N и вычислить критическое напряжение σ_1 . После этого при том же числе нагрузок N , но другой величине напряжения σ_3 произвести новый расчет критического напряжения σ_{1i} . Целью такой серии расчетов является формирование пар значений напряжений σ_{1i} и σ_{3i} при одном и том же числе нагрузок N , которые необходимы для последующего вычисления характеристик C_N и φ_N , соответствующих этому количеству нагрузок N .

3. Используя найденные пары главных напряжений σ_{1i} и σ_{3i} и общепринятые формулы, регламентируемые ГОСТ 12248.3–2020⁵, необходимо рассчитать угол внутреннего трения φ_N :

⁵ ГОСТ 12248.3–2020 (введен 01.06.2021 г.) Межгосударственный стандарт. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 октября 2020 г. № 823-ст – Москва : Стандартинформ, 2020 // ИС «Техэксперт» / АО «Кодекс». Дата обновления: 16.09.2024.

$$\varphi_N = \operatorname{arctg} \frac{L-1}{2 \cdot \sqrt{L}}$$

$$L = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n \sigma_{1i} \cdot \sigma_{3i} - \sum_{i=1}^n \sigma_{1i} \cdot \sum_{i=1}^n \sigma_{3i}}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\sigma_{3i})^2 - \left(\sum_{i=1}^n \sigma_{3i} \right)^2}, \quad (17)$$

где i и n – номер и общее количество рассчитанных пар главных напряжений σ_{1i} и σ_{3i} при одном и том же числе нагрузок N .

4. На завершающем этапе следует вычислить сцепление грунта c_N . Такой расчет можно произвести двумя способами. Первый способ применялся всеми нашими предшественниками. Этот способ предполагает применение традиционных формул, основанных на использовании вычисленных пар главных напряжений σ_{1i} и σ_{3i} и регламентируемых ГОСТ 12248.3–2020 формул:

$$c = \frac{M}{2 \cdot \sqrt{L}},$$

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{1i} \cdot \sum_{i=1}^n \sigma_{3i}^2 - \sum_{i=1}^n \sigma_{3i} \cdot \sum_{i=1}^n \sigma_{1i} \cdot \sigma_{3i}}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\sigma_{3i})^2 - \left(\sum_{i=1}^n \sigma_{3i} \right)^2}. \quad (18)$$

Рассматривая результаты расчета параметров сопротивления сдвигу, выполненные по формулам (17) и (18), отметим, что при исполь-

зовании любой модели накопления пластической деформации мы получим зависимость характеристик сдвигоустойчивости грунта, аналогичную данным таблицы 1. В этом случае при возрастании числа нагрузок параметр φ_N всегда уменьшается, но характеристика c_N такой зависимости не подчиняется. Вследствие этого, при росте числа нагрузок, сопротивление всестороннему растяжению не будет оставаться постоянным, что противоречит модели, показанной на рисунке 1, б. Поэтому применение формулы (18) для расчета сцепления грунта приводит к несоответствию данных расчета (например, данных таблицы 1) модели, положенной в основу этого расчета, показанной на рисунке 1, б. Для устранения данного недостатка мы рекомендуем вычислять сцепление по формуле, полученной из второй зависимости (10). Эта формула имеет вид

$$c_N = \frac{c_{ст}}{\operatorname{tg} \varphi_{ст}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_N. \quad (19)$$

В таблице 2 представлены результаты расчета характеристик c_N и φ_N , выполненные по формулам (17) и (19), а также значения сопротивления растяжению H по выражению (10).

Из анализа данных таблицы 2 следует, что при строго определенной величине относительной влажности W/W_L в условиях увеличения числа нагрузок характеристики φ_N и c_N уменьшаются, а сопротивление всестороннему растяжению остается постоянным, что в полной мере соответствует модели, представленной на рисунке 1, б.

Таблица 2

Характеристики φ_N , c_N и H_N суглинков и глин, вычисленные по формулам (17) и (19)

Источник: составлено авторами.

Table 2

Characteristics φ_N , c_N and H_N of loams and clays calculated by using formulae (17) and (19)

Source: compiled by the authors.

Расчетная влажность, W/W_L	Параметры сопротивления сдвигу, вычисленные по (17) и (19)										Сопротивление растяжению H_N при числе приложенных нагрузок, кПа				
	φ_N при числе приложенных нагрузок, градус					c_N при числе приложенных нагрузок, кПа									
	1	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	1	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	1	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶
0,60	24	20	14,5	11	9	30	24,5	17,4	13,1	10,7	67,4	67,4	67,4	67,4	67,4
0,65	21	15	11	8	7	24	16,8	12,2	8,8	7,7	62,5	62,5	62,5	62,5	62,5
0,70	18	11,5	8,5	6,5	5,5	19	11,9	8,7	6,7	5,6	58,5	58,5	58,5	58,5	58,5
0,75	15	10	7,5	5	4	15	9,9	7,4	4,9	3,9	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0
0,80	13	8	5	3	2,5	11	6,7	4,2	2,5	2,1	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6
0,90	11,5	6,5	3,5	2,2	2,0	8	4,5	2,4	1,5	1,4	39,3	39,3	39,3	39,3	39,3

Таблица 3
 Характеристики φ_N , C_N и H_N суглинков и глин, вычисленные по формулам (17) и (19) при расчете остаточной деформации по зависимости (16)
 Источник: составлено авторами.

Table 3
 Characteristics φ_N , C_N and H_N of loams and clays calculated by using formulae (17) и (19), the residual deformation being calculated according to dependence (16)
 Source: compiled by the authors.

Расчетная влажность, W/W_L	Параметры сопротивления сдвигу, вычисленные по (17) и (19)								Сопротивление растяжению H_N при числе приложенных нагрузок, кПа			
	φ_N при числе приложенных нагрузок, градус				C_N при числе приложенных нагрузок, кПа							
	1	10^3	10^4	$5 \cdot 10^4$	1	10^3	10^4	$5 \cdot 10^4$	1	10^3	10^4	$5 \cdot 10^4$
0,60	24	23	21	18	30	28,6	25,9	21,9	67,4	67,4	67,4	67,4
0,65	21	20	18	15	24	22,8	20,3	16,8	62,5	62,5	62,5	62,5
0,70	18	17	15	12	19	17,9	15,7	12,4	58,5	58,5	58,5	58,5
0,75	15	13	11	9	15	12,9	10,9	8,9	56,0	56,0	56,0	56,0
0,80	13	11	8	5	11	9,3	6,7	4,2	47,6	47,6	47,6	47,6
0,90	11,5	10	7	4	8	6,9	4,8	2,7	39,3	39,3	39,3	39,3

Следовательно, в рамках применения этой модели вычисление сцепления C_N нужно выполнять по предлагаемой формуле (19).

Расчет параметров сопротивления сдвигу, показанных в таблице 1 и 2, основан на применении модели накопления деформаций Р.Д. Барксдейла, предложенной в 1972 г. Безусловно, что эта модель устарела. В таблице 3 даны характеристики φ_N , C_N и H_N , вычисленные по формулам (17) и (19) при расчете остаточной деформации по зависимости (16).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что параметры сопротивления сдвигу, регламентируемые современными стандартами для расчета нежестких дорожных одежд, не соответствуют модели упрочнения грунта, положенной в основу этого расчета. Кроме того, расчет накапливаемой остаточной деформации производится по устаревшей модели Р. Барксдейла.

Для устранения данного недостатка предложено определять сцепление по формуле (19) при расчете накапливаемой остаточной деформации по современным моделям, одной из которых является зависимость (16). Выполнение предложенных нами изменений приводит к полному соответствию вычисляемых характеристик сопротивления сдвигу, мо-

дели динамического упрочнения грунта, положенной в основу расчета дорожной одежды по сдвигу в грунте.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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.
2. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.: Изд-во физико-математической литературы, 1960. 242 с.
3. Gerrard, C.M., Morgan, J.R., Richards, B.G., An approach to the design of flexible pavements for Australian conditions // Australian Road Research Report. 1975. Vol. 5 (8). pp 42–59.
4. Lekarp, F., Dawson, A. Analysis of permanent deformation behaviour of unbound granular materials // Processing International Symposium on Thin Pavements, Surface Treatments, Unbound Roads. New Brunswick, Canada. 1997.
5. Lekarp, F., Dawson, A. Modelling permanent deformation behaviour of unbound granular materials // Construction and Building Materials. 1998. Vol. 12, No. 1. pp. 9–18.
6. Becquart F. et al. Monotonic aspects of the mechanical behaviour of bottom ash from municipal solid waste incineration and its potential use for road construction // Waste Management. 2009. Vol. 29. pp. 1320–1329.

7. Nunez W.P. et al. Shear strength and permanent deformation of unbound aggregates used in brazilian pavements // *Proc. of the 6th International Symposium on Pavements unbound (UNBAR 6)*, Nottingham, England, 6–8 July 2004. pp. 27–37.
8. Александров А.С. Исследование пластического деформирования дискретных материалов при воздействии циклических нагрузок и определение параметров математических моделей // *Строительные материалы*. 2016. № 10. С. 27–32.
9. Barksdale R.D. Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials // *Proceedings of the 3-rd International Conference on Asphalt Pavements*. London. 1972. pp. 161–174.
10. Barksdale, R.D. Performance of Crushed-Stone Base Courses // *Transportation Research Record*. 1984. T. 954. pp. 78–87.
11. Alnedawi A., Nepal K.P., Al-Ameri R. Permanent Deformation Prediction Model of Unbound Granular Materials for Flexible Pavement Design // *Transportation Infrastructure Geotechnology*. 2019. No 6 (3). pp. 1–17. DOI:10.1007/s40515-018-00068-1.
12. Aregbesola S.O., et al. Sequential backward feature selection for optimizing permanent strain model of unbound aggregates // *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Vol. 19 (1): e02554. DOI:10.1016/j.cscm.2023.e02554.
13. Erlingsson S., Rahman M. S. Evaluation of permanent deformation characteristics of unbound granular materials by means of multistage repeated-load triaxial tests // *Transportation Research Record*. 2013. T. 2369 (1). pp. 11–19.
14. Fladvad M., Erlingsson S. Modelling the response of large-size subbase materials tested under varying moisture conditions in a heavy vehicle simulator // *Road materials and pavement design*. 2021. Vol. 23 (1). pp. 1-22. DOI:10.1080/14680629.2021.1883462.
15. Fladvad M., Erlingsson S. Permanent deformation modelling of large-size unbound pavement materials tested in a heavy vehicle simulator under different moisture conditions // *Road Materials and Pavement Design*. 2021. Vol. 23 (8). pp. 1–24. DOI:10.1080/14680629.2021.1883464.
16. Pérez-González E.L., Bilodeau J.-P., Doré G. Analysis model for permanent deformation in granular materials under the action of superheavy vehicles // *Transportation Geotechnics*. 2021. 28:100536. DOI:10.1016/j.trgeo.2021.100536.
17. Pérez-González E.L., Bilodeau J.-P., Doré G. Plastic strain rate in granular materials as a function of stress history: a probabilistic approach for the PBD model // *International Journal of Pavement Engineering*. 2022. 24:2. Pp 1–12. DOI:10.1080/10298436.2022.2078974.
18. Мирсаяпов И.Т., Брехман А.И., Королева И.В., Иванова О.А. Прочность и деформации песчаных грунтов при трехосном циклическом нагружении // *Известия КГАСУ*. 2012. № 3(21). С. 58–63.
19. Mirsayarov, I.T., Koroleva, I.V. Strength and Deformability of Clay Soil Under Different Triaxial Load Regimes that Consider Crack Formation // *Soil Mech Found Eng*. 2016. Vol. 53. pp. 5–11. <https://doi.org/10.1007/s11204-016-9356-x>.
20. Niemunis A., Wichtmann T. Separation of Time Scales in the HCA Model for Sand // *Acta Geophysica*. 2014. Vol. 62. Pp. 1127–1145. DOI: 10.2478/s11600-014-0221-x.
21. Staubach P., Machaček J., Tschirschky L., Wichtmann T. Enhancement of a high-cycle accumulation model by an adaptive strain amplitude and its application to monopile foundations // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2022. T. 46 (2). pp. 315–338. DOI:10.1002/nag.3301.
22. Van Niekerk A.A., Molenaar A.A.A., Houben L.J.M. Effect of Material Quality and Compaction on the Mechanical Behaviour of Base Course Materials and Pavement Performance // In book: *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*. 2020. pp.1071–1079. DOI:10.1201/9781003078821-28.
23. Wichtmann T., Triantafyllidis Th.. Influence of a cyclic and dynamic loading history on dynamic properties of dry sand, part I: Cyclic and dynamic torsional prestraining // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2004. T. 24 (2). pp. 127–147. DOI:10.1016/j.soildyn.2003.10.004.

REFERENCES

1. 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.)
2. Sokolovskij V.V. Statika sypuchej sredy [Statics of bulk solids]. Moscow. *Izd-vo fiziko - matematicheskoy literatury*. 1960: 242. (In Russ.)
3. Gerrard, C.M., Morgan, J.R., Richards, B.G., An approach to the design of flexible pavements for Australian conditions. *Australian Road Research Report*. 1975; 5 (8): 42–59.
4. Lekarp F., Dawson A. Analysis of permanent deformation behaviour of unbound granular materials. *Processing International Symposium on Thin Pavements, Surface Treatments, Unbound Roads*. New Brunswick, Canada. 1997.
5. Lekarp, F., Dawson, A. Modelling permanent deformation behaviour of unbound granular materials. *Construction and Building Materials*. 1998; 12 (1): 9–18.
6. Becquart F. et al. Monotonic aspects of the mechanical behaviour of bottom ash from municipal solid waste incineration and its potential use for road construction. *Waste Management*. 2009; 29: 1320–1329.
7. Nunez W.P. et al. Shear strength and permanent deformation of unbound aggregates used in brazilian pavements. *Proc. of the 6th International Symposium on Pavements unbound (UNBAR 6)*. Nottingham, England, 6–8 July 2004; 27–37.
8. Aleksandrov A.S. Study of plastic deformation of discrete materials under cyclic loads and determination of parameters of mathematical models.

Stroitel'nye Materialy (Construction Materials). 2016; 10: 27–32. (In Russ.)

9. Barksdale R.D. Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials. *Proceedings of the 3-rd International Conference on Asphalt Pavements*. London. 1972; 161–174.

10. Barksdale, R.D. Performance of Crushed-Stone Base Courses. *Transportation Research Record*. 1984; 954: 78–87.

11. Alnedawi A., Nepal K.P., Al-Ameri R. Permanent Deformation Prediction Model of Unbound Granular Materials for Flexible Pavement Design. *Transportation Infrastructure Geotechnology*. 2019; 6 (3): 1–17. DOI:10.1007/s40515-018-00068-1.

12. Aregbesola S.O., et al. Sequential backward feature selection for optimizing permanent strain model of unbound aggregates. *Case Studies in Construction Materials*. 2023; 19 (1): e02554. DOI:10.1016/j.cscm.2023.e02554.

13. Erlingsson S., Rahman M. S. Evaluation of permanent deformation characteristics of unbound granular materials by means of multistage repeated-load triaxial tests. *Transportation Research Record*. 2013; 2369 (1): 11–19.

14. Fladvad M., Erlingsson S. Modelling the response of large-size subbase materials tested under varying moisture conditions in a heavy vehicle simulator. *Road materials and pavement design*. 2021; 23 (1): 1–22. DOI:10.1080/14680629.2021.1883462.

15. Fladvad M., Erlingsson S. Permanent deformation modelling of large-size unbound pavement materials tested in a heavy vehicle simulator under different moisture conditions. *Road Materials and Pavement Design*. 2021; 23 (8): 1–24. DOI:10.1080/14680629.2021.1883464.

16. Pérez-González E.L., Bilodeau J.-P., Doré G. Analysis model for permanent deformation in granular materials under the action of superheavy vehicles. *Transportation Geotechnics*. 2021; 28:100536. DOI:10.1016/j.trgeo.2021.100536.

17. Pérez-González E.L., Bilodeau J.-P., Doré G. Plastic strain rate in granular materials as a function of stress history: a probabilistic approach for the PBD model. *International Journal of Pavement Engineering*. 2022; 24(2): 1–12. DOI:10.1080/10298436.2022.2078974.

18. Mirsayapov I.T., Brekhman A.I., Koroleva I.V., Ivanova O.A. Prochnost' i deformacii peschanyh grunтов pri trekhosnom ciklicheskom nagruzenii [Strength and deformation of sandy soils under triaxial cyclic loading]. *Izvestiya KGASU*. 2012; 3(21): 58–63. (In Russ.)

19. Mirsayapov, I.T., Koroleva, I.V. Strength and Deformability of Clay Soil Under Different Triaxial Load Regimes that Consider Crack Formation. *Soil Mech Found Eng*. 2016; 53: 5–11. <https://doi.org/10.1007/s11204-016-9356-x>.

20. Niemunis A., Wichtmann T. Separation of Time Scales in the HCA Model for Sand. *Acta Geophysica*. 2014; 62: 1127–1145. DOI: 10.2478/s11600-014-0221-x.

21. Staubach P., Machaček J., Tschirschky L., Wichtmann T. Enhancement of a high-cycle accumula-

tion model by an adaptive strain amplitude and its application to monopile foundations. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2022; 46 (2): 315–338. DOI:10.1002/nag.3301.

22. Van Niekerk A.A., Molenaar A.A.A., Houben L.J.M. Effect of Material Quality and Compaction on the Mechanical Behaviour of Base Course Materials and Pavement Performance. In book: *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*. 2020; 1071–1079. DOI:10.1201/9781003078821-28.

23. Wichtmann T., Triantafyllidis Th.. Influence of a cyclic and dynamic loading history on dynamic properties of dry sand, part I: Cyclic and dynamic torsional prestraining. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2004; 24 (2): 127–147. DOI:10.1016/j.soildyn.2003.10.004.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Александров А.С. Руководство темой исследования, формирование целей и постановка задачи исследования. Анализ состояния вопроса. Участник приведённых в статье исследований. Обработка экспериментальных данных. Анализ результатов.

Семенова Т.В. Общее редактирование. Участник приведённых в статье исследований. Оформление наглядных материалов статьи. Подготовка материала для статьи, оформление статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Aleksandrov A.S. Design of the research, including goals and research objectives. Analysis of the state of the art. Conducting experiments presented in the article. Processing experimental data. Interpretation of the data.

Semenova T.V. General editing. Conducting the research presented in the article. Design of visual materials of the article. Collecting data, writing the manuscript.

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:** 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:** 693537, e-mail: sibadisemenova@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandrov Anatoly Sergeevich – Cand. of Sci. (Engineering), 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-код:** 7573-4997,
Author ID: 57191531014, e-mail: aleksandrov00@mail.ru

Semenova Tatiana Victorovna – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Road Construction and Maintenance, Civil Engineering Institute, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644080),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1921-8531>,
SPIN-код: 6344-3503, **Author ID:** 693537, e-mail: sibadisemenova@yandex.ru

Научная статья
УДК 625.85.06
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-770-785>
EDN: RSHWAO



ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ПОРОШКОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО К ТЕРМИЧЕСКИМ ДЕФОРМАЦИЯМ

М.А. Высоцкая¹, В.С. Лесовик¹, Я.М. Катрич¹, Д.Ю. Егоров²

¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия
2000 «ИНФРАТЕСТ»,
г. Санкт-Петербург, Россия
✉ ответственный автор
roruri@rambler.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Комплексное воздействие динамических нагрузок, климатических факторов, агрессивных сред является драйвером преждевременного деформирования асфальтобетонных покрытий. Основными типами разрушений являются: пластические деформации в виде колеи, возникающие при высоких положительных температурах; усталостные трещины в покрытии, образующиеся от действия многократных повторяющихся нагрузок; низкотемпературные поперечные трещины, возникающие в области отрицательных температур при охлаждении покрытия. По современным представлениям, вклад вяжущего в образование обозначенных дефектов достигает до 90–100%. Однако битум утрачивает свои оригинальные свойства, вступая во взаимодействие с минеральным порошком и формируя асфальтовяжущее, которое выполняет роль связующего в асфальтобетоне. Поэтому прогнозирование поведения асфальтобетонов в широком диапазоне температур и особенно в отрицательной его части целесообразно выполнять, опираясь не на битумное вяжущее, а на асфальтовяжущее.

Материалы и методы. Экспериментальные лабораторные исследования материалов выполнены в соответствии с ГОСТ 33133–2014, ГОСТ Р 58400.1–2019, ГОСТ 32761–2014, ГОСТ 58401.1–2019, ГОСТ Р 58400.8–2019, ГОСТ Р 58400.11–2019. В роли объектов исследования выступал битум, наполненный минеральными порошками из известняка и пыли электрофильтров асфальтобетонного завода.

Результаты. Обнаружены значительные изменения свойств исходного битума под влиянием различной степени наполнения минеральным порошком из известняка и пыли электрофильтров. Показано, что наполнение вяжущего минеральным порошком (пылью) в максимально допустимом концентрационном пределе изменяет параметр марки PG (X) на три позиции с 64 °С до 82 °С. Кардинальные данные получены для низкотемпературной устойчивости образцов с обрушением параметра ($\pm Y$) с величины -34 °С до -22 °С. Выявляя параметры, отвечающие за низкотемпературное растрескивание системы на уровне асфальтовяжущего, возможно масштабировать знания и на асфальтобетоны.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: битумное вяжущее, PG марка, минеральный порошок, асфальтовяжущее, VBR-тест, ABCD-тест, DSR-тест

Статья поступила в редакцию 02.05.2024; одобрена после рецензирования 22.07.2024; принята к публикации 17.10.2024.

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: Высоцкая М.А., Лесовик В.С., Катрич Я.М., Егоров Д.Ю. Влияние минеральных порошков на устойчивость битумного вяжущего к термическим деформациям // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 5. С. 770–785. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-770-785>

© Высоцкая М.А., Лесовик В.С., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-770-785>
EDN: RSHWAO

THE INFLUENCE OF MINERAL POWDERS ON THE RESISTANCE OF BITUMEN BINDER TO THERMAL DEFORMATIONS

Marina A.I. Vysotskaya¹, Valeriy S. Lesovik¹, Yaroslav M. Katrich¹, Dmitriy Y. Egorov²

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
Belgorod, Russia

²Limited liability company "INFRATEST",
St. Petersburg, Russia

✉ corresponding author
roruri@rambler.ru

ABSTRACT

Introduction. The complex influence of dynamic loads, climatic factors, and aggressive environments is the driver of premature deformation of asphalt concrete pavements. The main types of failure are: plastic rutting deformations occurring at high temperatures above zero; fatigue cracks in the pavement caused by repeated loads; low-temperature transverse cracks occurring in the area with temperatures below zero while pavement cooling. According to modern concepts, the contribution of the binder to the formation of the described defects reaches 90–100%. However, bitumen loses its original properties, interacting with mineral powder and forming an asphalt binder, which acts as a binder in asphalt concrete. Therefore, it is advisable to predict the behavior of asphalt concrete in a wide range of temperatures, and especially in low-temperature part, relying not on the bitumen binder, but on the asphalt binder.

Materials and methods. Experimental laboratory studies of materials were carried out in accordance with GOST 33133–2014, GOST R 58400.1–2019, GOST 32761–2014, GOST 58401.1–2019, GOST R 58400.8–2019, GOST R 58400.11–2019. The objects of study were bitumen filled with mineral powders from limestone and dust from electric filters of an asphalt concrete plant.

Results. Significant changes in the properties of the original bitumen were revealed under the influence of varying degrees of filling with mineral powder from limestone and dust from electric filters. It was shown that filling the binder with mineral powder (dust) in the maximum permissible concentration limit changes the PG (X) brand parameter by three positions from 64 °C to 82 °C. More fundamental data were obtained for the low-temperature stability of samples with a collapse of the parameter ($\pm Y$) from -34 °C to -22 °C. By identifying the parameters responsible for low-temperature cracking of the system at the binder level of asphalt, it is possible to scale the knowledge to asphalt concretes.

KEYWORDS: bitumen binder, PG grade, mineral powder, asphalt binder, BBR-test, ABCD-test, DSR-test

The article was submitted 02.05.2024; approved after reviewing 22.07.2024; accepted for publication: 17.10.2024.

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. Vysotskaya M.A., Lesovik V.S., Katrich Ya.M., Egorov D.Yu. The influence of mineral powders on the resistance of bitumen binder to thermal deformations. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (5): 770-785. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-770-785>

© Vysotskaya M.A., Lesovik V.S., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

За последний десяток лет дорожно-строительная и сопутствующие ей отрасли совершили стремительный качественный рывок. Синергия поступательного движения отраслей дала удивительный результат в части формирования обновленной нормативной базы по оценке качества и долговечности дорожных материалов и композитов, что, в свою очередь, подтянуло качество, расширило номенклатуру производимой продукции и в целом изменило подход к производству битумных вяжущих и щебня для асфальтобетонных смесей.

Тем не менее комплексное воздействие динамических нагрузок, климатических факторов, агрессивных сред при возможном низком качестве сырьевых материалов все также является драйвером преждевременного деформирования асфальтобетонных покрытий. К основным типам их разрушения в последнее время принято относить: пластические деформации в виде колеи, возникающие при высоких положительных температурах; усталостные трещины в покрытии, образующиеся от действия многократных повторяющихся нагрузок, в основном весной и осенью при переувлажненном земляном полотне; низкотемпературные поперечные трещины, возникающие в области отрицательных температур при охлаждении покрытия.

По современным представлениям вклад вяжущего в образование обозначенных дефектов достаточно весом, а в ряде случаев достигает 90–100% [1, 2, 3]. Так, решающую роль вид и качество битумного вяжущего играют в коррозионной стойкости асфальтобетонных. Актуальным исследовательским трендом является анализ вяжущих для возможности прогнозирования поведения асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог при низких (отрицательных) температурах. Подобный интерес обусловлен тем, что вклад вяжущего в образование низкотемпературных трещин доходит до 90% [1, 4, 5].

Практика показывает, что образование низкотемпературных трещин на асфальтобетонном покрытии возможно даже в отсутствии нагрузки от подвижного состава. Истоком таких негативных явлений могут служить усадочные и растягивающие напряжения, возникающие вследствие значительного однократного понижения температуры окружающего воздуха.

Решение обозначенной проблемы в настоящее время осуществляется посредством прогнозирования поведения битумных вяжущих, используемых в дорожных композитах,

под действием низких температур. К числу методов низкотемпературного тестирования относятся: определение температуры хрупкости битума на приборе Фрааса [6], оценка температуры стеклования [7], BBR-тест [4], DSR-тест с использованием для испытаний пластин диаметром 4 мм [4, 8] и ABCD-тест [9, 10, 11].

Необходимо отметить, что с переходом на метод объемно-функционального проектирования асфальтобетона, подразумевающий использование битумного вяжущего по PG, где нижняя граница марки демонстрирует фактическую работоспособность при отрицательной температуре и должна обеспечивать низкотемпературную трещиностойкость всего композита, была надежда, что этот вид дефектов на покрытии останется в отраслевой истории. Однако зарубежный опыт [4, 5] свидетельствует, что после разработки спецификаций на битумные вяжущие и запуска системы Superpave в промышленную эксплуатацию проблема разрушений поверхности покрытий автомобильных дорог, вызванных термическим растрескиванием асфальтобетона, не была решена. В 2017 г. было зафиксировано, что тридцать из тридцати шести ответивших агентств США сообщили о преждевременных разрушениях поверхности асфальтобетонного покрытия в виде расслоения (эрозии) или растрескивания.

Российские ученые-практики [1, 3, 12] также неоднократно заявляли о несоответствии трещиностойкости битумного вяжущего реальному поведению асфальтобетона при низких температурах.

На наш взгляд, проблема кроется не в битуме или асфальтобетоне, а в методологии оценки трещиностойкости структурных систем асфальтобетона. В соответствии с классической теорией структуры асфальтобетона он складывается тремя структурами: макро, мезо и микро. Таким образом, асфальтобетон является высоконаполненной полидисперсной системой [13] (рисунок 1), где каждая из структур проявляет максимум своего влияния в восприимчивости асфальтобетона к различным климатическим и деформативным воздействиям.

Остановимся подробнее на микроструктуре смеси, состоящей из минерального порошка и битума. Технологичность и специфика свойств битума определили весьма широкий круг сфер его использования. Однако ввиду особенностей рецептур изделий битум практически всегда утрачивает свои оригинальные свойства, вступая во взаимодействие с другими компонентами [14, 15, 16].

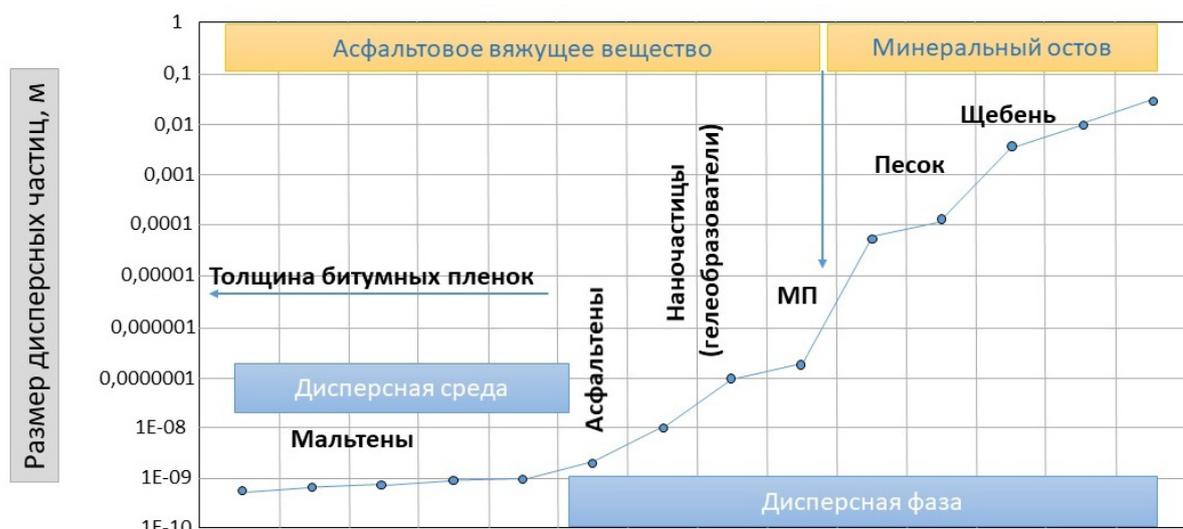


Рисунок 1 – Полидисперсность состава асфальтобетона [13]

Figure 1 – Polydispersity of asphalt concrete composition [13]

В составе асфальтобетонных смесей, сочетающихся с дисперсной составляющей смеси – минеральным порошком, образует асфальтовяжущее вещество (АВВ), которое кардинально отличается от битума и выступает в качестве связующего компонента в асфальтобетоне. При этом именно АВВ в основном определяет восприимчивость асфальтобетона к температурам как высоким положительным, так и низким отрицательным. В то время как минеральный каркас рассеивает и перераспределяет внутренние напряжения в композите на различных масштабных уровнях.

Таким образом, прогнозирование поведения асфальтобетонов в широком диапазоне температур и особенно в отрицательной его части, целесообразно выполнять, опираясь не на битумное вяжущее, а на асфальтовяжущее. По нашему мнению, такой подход будет способствовать получению адекватного результата, соответствующего фактическим температурным способностям работы асфальтобетона в покрытии.

Цель представленной работы – оценить динамику изменения свойств битума под влиянием

различной степени наполнения минеральным порошком из известняка и пыли. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: изучить показатели свойств базового битума в соответствии с методологией PG; изготовить композиции АВВ с различной степенью наполнения и оценить показатели их свойств, в том числе по PG; выполнить тестирование низкотемпературных параметров базового битума и АВВ по методикам BBR и ABCD; проанализировать влияние минеральных порошков кислой и основной природы, а также их концентрации на свойства формирующегося АВВ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании в качестве базового вяжущего рассматривался битум из специализированной линейки нефтеперерабатывающего завода (НПЗ) по спецификации ГОСТ 33133–2014¹, соответствующий марке БНД 70/100. Тестирование по ГОСТ Р 58400.1–2019² соотносит вяжущее с PG64-34. Температура размягчения битума 48 °С.

¹ ГОСТ 33133–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2015. 7 с.

² ГОСТ Р 58400.1–2019. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Технические условия с учетом температурного диапазона эксплуатации. М.: Стандартинформ, 2019. 10 с.

Таблица 1
Показатели свойств минеральных порошков
Источник: составлено авторами.

Table 1
Properties' indicators of mineral powders
Source: compiled by the authors.

Показатели	Известняк		Пыль электрофильтров	
	Фактические значения	Требования ГОСТ		Фактические значения
		МП-2	МП-3	
Зерновой состав, % по массе, - мельче 2 мм; -мельче 0,125 мм; - мельче 0,063 мм	100 93,8 91,5	100 не менее 85 не менее 70	100 не менее 75 не менее 60	100 91,9 90,7
Истинная плотность, кг/м ³	2650	-	-	2781
Средняя плотность, кг/м ³	1950	-	-	2064
Пористость, %,	32	не более 35	не более 40	27,8
Битумоемкость, г,	55,3	не более 65	не более 80	54,7
Набухание образцов из смеси МП с битумом, %,	2,1	не более 2,5	не более 3,0	2,3
Удельная поверхность, кг/м ²	2285	-	-	2300

В таблице 1 приведены сведения о минеральных порошках (МП), используемых в отрасли для приготовления асфальтобетонных смесей из молотого известняка, относящегося к карбонатной (основной) породе и пыли электрофильтров асфальтобетонных заводов, где главным породообразующим минералом является кварц (SiO₂) – кислая порода. Тестирование минеральных порошков выполнялось по стандартным методикам, изложенным в ГОСТ 32761–2014³.

В исследовании битумная матрица объединялась с минеральными порошками для приготовления асфальтовяжущего вещества (АВВ) с различной степенью наполнения. В исследовании использовались МП с максимально близкой удельной поверхностью (см. таблицу 1). Удельная поверхность тонкодисперсных порошков измерялась на приборе ПСХ-10АК.

В соответствии с положением системы

объемно-функционального проектирования, изложенным в ГОСТ 58401.1–2019⁴, при проектировании составов асфальтобетонных смесей, в зависимости от условий движения транспортных средств и размера номинально максимального зерна заполнителя, нормируется величина Н – отношение пыль/вяжущее. В соответствии с нормативным документом, Н – соотношение между эффективным количеством битумного вяжущего в смеси и содержанием в ней дисперсной минеральной части, прошедшей через сито 0,063 мм.

В исследовании отношение пыль/вяжущее принималось от 0,8 до 1,6 с шагом в 0,2. Таким образом, битумная матрица наполнялась дисперсным МП в следующем соотношении (таблица 2). В таблице 2 представлены рецепты приготавливаемых АВВ с присвоением индекса для удобства чтения и анализа графической части.

³ ГОСТ 32761–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Порошок минеральный. Технические требования. М.: ФГУП Стандартинформ, 2014. 10 с.

⁴ ГОСТ 58401.1–2019. Дороги автомобильные общего пользования. Смесей асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Система объемно-функционального проектирования. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2019. 14 с.

Таблица 2
Составы исследуемых АВВ
Источник: составлено авторами.

Table 2
Compositions of the studied АВВ
Source: compiled by the authors.

Рецептура АВВ (отношение МП/битум), части	Вид минерального порошка	
	известняк	пыль электрофильтров
	индекс состава АВВ	
0,8 : 1	1.1	2.1
1,0 : 1	1.2	2.2
1,2 : 1	1.3	2.3
1,4 : 1	1.4	2.4
1,6 : 1	1.5	2.5

Для изготовления образцов АВВ битумное вяжущее нагревалось до температуры 140 °С. В разогретый битум, при постоянном перемешивании, вносилась навеска минерального порошка. Для обеспечения идентичности термальной истории образцов, перемешивание осуществлялось верхнеприводной лопастной мешалкой ИКА в течение 10 мин, после чего готовые образцы термостатировались в сушильном шкафу еще 15 мин. Подобные технологические операции были выполнены и для контрольной серии битума. Образцы АВВ разной степени структурированности тестировали для оценки динамики изменения температуры размягчения по КиШ.

Оставшаяся часть образцов была разделена для оценки влияния вида минерального порошка и степени наполнения им битумной матрицы. Динамику структурных изменений оценивали посредством испытаний балок из АВВ на изгиб (BBR), (рисунок 2); образцов, разрушенных с использованием «Устройства растрескивания битумного вяжущего» (ABCD), (рисунки 3 и 4), а также сдвиговой устойчивости (DSR), (рисунок 5). Исследования выполнялись в соответствии с ГОСТ Р 58400.10⁵, ГОСТ Р 58400.8⁶ и ГОСТ Р 58400.11⁷. Эта часть

образцов подвергалась повторному разогреву для обеспечения технологичности работы со смесью для формирования образцов правильной геометрической формы в виде балки (BBR) и кольца (ABCD).

Перед началом процедуры испытания для образца исходного битума оценивали температуру, при которой его динамическая вязкость находилась в диапазоне (0.28 ± 0.03) Па • с, для наполненных битумных систем температура изготовления всех образцов составляла (165±3) °С. Образцы АВВ для уменьшения седиментационного эффекта от оседания частиц МП подвергались резкому охлаждению.

Суть испытаний на BBR заключалась в тестировании образцов битума и АВВ при низкой температуре для определения их способности сопротивляться сосредоточенной статической нагрузке. Температура испытания обеспечивалась замораживанием образцов при установленной температуре в соответствии с функциональным типом вяжущего. После каждого периода кондиционирования проверялась твердость образцов битума или АВВ в реометре с изгибающейся балкой. В процессе тестирования фиксировалась жесткость и скорость изменения жесткости.

⁵ ГОСТ Р 58400.10–2019. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Метод определения свойств с использованием динамического сдвигового реометра (DSR). М.: Стандартинформ, 2019. 10 с.

⁶ ГОСТ Р 58400.8–2019. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Метод определения жесткости и ползучести битума при отрицательных температурах с помощью реометра, изгибающей балочку (BBR). М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.

⁷ ГОСТ Р 58400.11–2019. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Метод определения температуры растрескивания при помощи устройства ABCD. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.



Рисунок 2 – Общий вид образца балки из АВВ и принципа тестирования на ВВР
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – General view of a beam sample made from ABB and the principle of BBR testing
Source: compiled by the authors.

В соответствии с методикой оценки марки битумного вяжущего по PG для испытаний на реометре с изгибающейся балкой (ВВР) и определения температуры растрескивания битумного вяжущего (АВCD) используют системы, состаренные методом RTFOT (технологическое старение) и PAV (старение в процессе эксплуатации). В виду того, что битум при технологических температурах объединялся и перемешивался с различным минеральным порошком, старением RTFOT пренебрегли, так как в процессе перемешивания происходило технологическое старение.

Испытание выполнялось при пяти температурах: -10, -16, -22, -28, -34 °С. Время термостатирования образцов составляло 60 мин.

Испытание АВCD проводилось в соответствии с ГОСТ Р 58400.8⁸⁷, со скоростью охлаждения 20 °С/час. Опыт постановки эксперимента показал, что в ряде случаев при тестировании наполненных систем целесообразно рассматривать более высокие скорости охлаждения для уменьшения сегрегации наполненной системы в виду седиментации частиц МП. Инварное кольцо прибора обеспечивает удержание вяжущего в период, когда кольцо из АВВ охлаждается и сжимается

(усаживается). Образец разрушается вокруг выступа из-за более высоких концентраций напряжений, возникающих в этой области во время охлаждения. Схематично образцы до и после тестирования представлены на рисунке 3. Очевидно, что в наполненных системах усадка и концентрация напряжений при охлаждении будут протекать иначе. Температура растрескивания T_{ABCD} определяется как температура, при которой образец разрушается при заданной скорости охлаждения.

Итогом тестирования является комплекс данных: температура растрескивания T_{ABCD} , скачок деформаций и напряжение разрушения. Формат получаемых данных в режиме тестирования представлен на рисунке 4.

Посредством тестирования битумных вяжущих на ВВР или АВCD определяется низкотемпературная составляющая марки PG ($\pm Y$). Оценка верхнего параметра (X), соответствующего максимальной температуре дорожного покрытия, которую будет способно воспринять используемое в составе вяжущее без потери работоспособности, выполняется на реометре динамического сдвига (DSR) AntonPaar MCR 302 с диаметром испытательной плиты 25 мм.

⁸⁷ ГОСТ Р 58400.11–2019. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Метод определения температуры растрескивания при помощи устройства АВCD. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.



Рисунок 3 – Общий вид образца кольца из АВВ и принципа тестирования ABCD
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – General view of ABB ring sample and ABCD testing principle
Source: compiled by the authors.

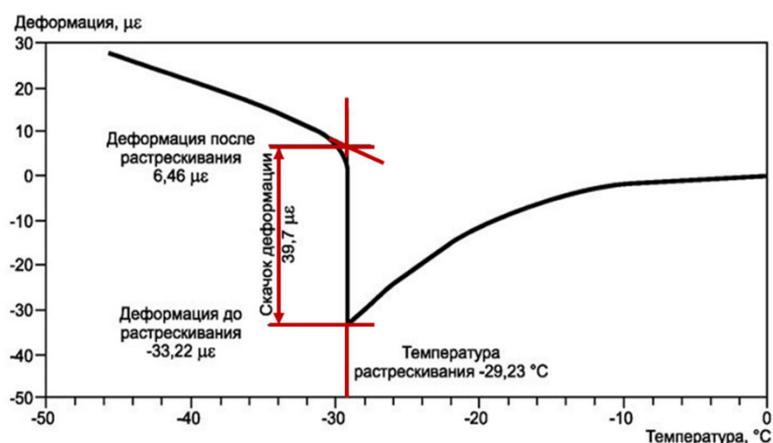


Рисунок 4 – Формат отображения данных при тестировании на ABCD
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Data display format for testing on ABCD
Source: compiled by the authors.

Сущность метода заключается в оценке сдвиговой устойчивости битумного вяжущего или АВВ путем осцилляционной сдвиговой деформации образца и определении значений комплексного модуля сдвига и фазового угла. Для этого подвижные битумные системы с запасом заливали в силиконовую форму так, чтобы обеспечить обрезку готового образца. При тестировании применялась испытательная система с диаметром плит 25 мм. Время термостатирования образцов при начальной температуре испытаний составляло 60 мин. Исследование выполнялось с использованием нескольких температурных режимов на одном образце битума или АВВ. Фиксировались фазовые углы δ и комплексные модули сдвига

систем G*. Испытание выполнялось при четырех температурах.

Посредством оценки изменения параметров ($X \pm Y$) базового битума в процессе его наполнения МП выявляли динамику изменения его свойств при переходе в асфальтовяжущее.

ОБСУЖДЕНИЕ

Как отмечалось выше, в структуре асфальтобетона АВВ определяет восприимчивость асфальтобетона к температурам. Данные, представленные на рисунке 5, демонстрируют логичную зависимость: увеличение концентрации МП в битумной матрице формирует теплоустойчивую структуру асфальтовяжущего.



Рисунок 5 – Влияние вида и концентрации МП на температуру размягчения битума
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Influence of the type and concentration of mineral powders (MP) on the softening temperature of bitumen
 Source: compiled by the authors.

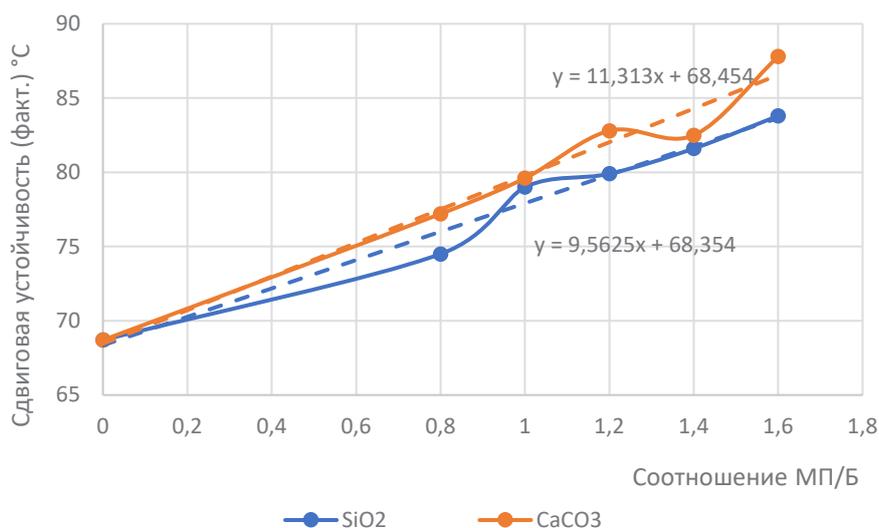


Рисунок 6 – Динамика изменения сдвиговой устойчивости битума под влиянием МП
 Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Dynamics of changes in the shear stability of bitumen under the influence of mineral powders (MP)
 Source: compiled by the authors.

Как видно, введение в битум, с температурой размягчения 48 °С, минерального порошка способствует увеличению этого показателя. Другими словами, наблюдается прямая зависимость между степенью наполнения битумной матрицы минеральным порошком и ее теплоустойчивостью. Вполне обоснована и вторая зависимость: системы, наполненные минеральным порошком из известняка

(CaCO₃) отличаются от параллели, наполненной пылью электрофильтров (SiO₂), более высокими значениями температуры размягчения. Так, прирост температуры размягчения составов АВВ с индексом 1.5 и 2.5 составил 34,8 и 31,7% соответственно.

Однако знаковой позицией системы Supergravel [17,18, 19], в РФ это методология объёмно-функционального проектирования

асфальтобетона, является отсутствие «классических» эмпирических свойств битумных вяжущих, к числу которых относится и температура размягчения. В основу методологии положены фактические температурные диапазоны эксплуатации битумного вяжущего в составе асфальтобетонного покрытия. В связи с этим представляло интерес исследование динамики изменения вязкоупругих свойств битума в процессе его наполнения минеральными порошками различной концентрации и природы.

В соответствии с данными по сдвиговой устойчивости АВВ относительно исходного битума (рисунок 6) наблюдается значительное увеличение сдвиговой устойчивости системы по мере ее наполнения минеральным порошком.

Функции кривых, полученные при тестировании АВВ по методу «Кольцо и шар» и DSR, являются возрастающими. Однако если по приросту температуры размягчения АВВ возможно судить об увеличении теплостойкости системы (косвенно), то параметр сдвиговой устойчивости – это результат реологических испытаний и отправная точка в определении марки вяжущего РG.

Полученные данные демонстрируют (см. рисунок 6), что битум в процессе минимального наполнения минеральными порошками (индекс

составов 1.1 и 2.1) изменил свой верхний показатель марки (X) с 64 °С до 76 °С и 70 °С соответственно. Наполнение битумной матрицы максимальной концентрацией минеральных порошков (индекс составов 1.5 и 2.5) повысило марку системы до 82 °С. Результаты эксперимента удивительны, так как достижение столь высоких марок РG (X) реализуется посредством глубокой модификации битумов различными добавками. Логично предположить возможность получения более значимых результатов по сдвиговой устойчивости битумных систем в случае использования вязких битумов, ПБВ, а также при использовании более пористых МП.

Однако это тот случай, когда получаемый результат приемлем и работает при формировании структуры асфальтобетона в команде позитивных синергетических эффектов, регулируя пластические деформации композита.

Более интересен и значим блок информации по изменению низкотемпературных параметров битума в процессе наполнения минеральными порошками. Как отмечалось, в исследовании было задействовано два альтернативных метода ВВР-тест и АВСД-тест, позволяющих оценить в марке РG низкотемпературную устойчивость ($\pm Y$). Анализ выполненного эксперимента изложен в графическом виде на рисунке 7.

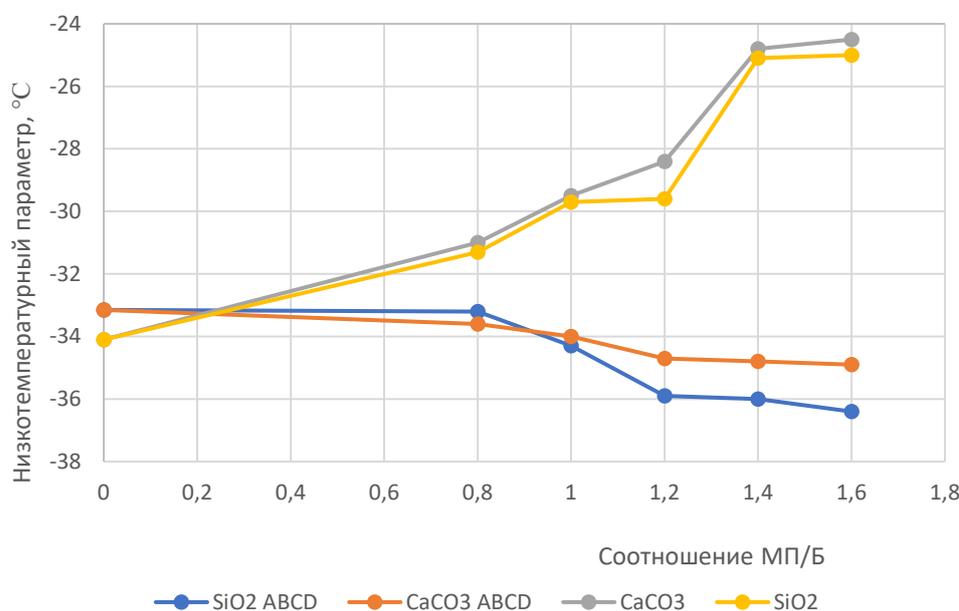


Рисунок 7 – Динамика изменения низкотемпературной устойчивости битума под влиянием МП при определении методами АВСД и ВВР
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Dynamics of changes in low-temperature stability of bitumen under the influence of mineral powders (MP), being determined by the ABCD and BBR tests
Source: compiled by the authors.

Данные, полученные при испытании образцов АВВ по различным методикам, противоречивы. Однако в части тестирования базового битума наблюдаются незначительные отклонения показателей в пределах -1 °С. Это позволяет предположить, что специфика полученных результатов может быть отнесена на счет малоизученности наполненных битумных систем и малой выборкой экспериментальных наработок по рассматриваемой тематике.

Важно отметить, что аналогичный тренд зависимостей при изучении низкотемпературной устойчивости модифицированных SBS битумных вяжущих был получен коллективом авторов [4]. Данные исследователей имеют следующий вид (рисунок 8).

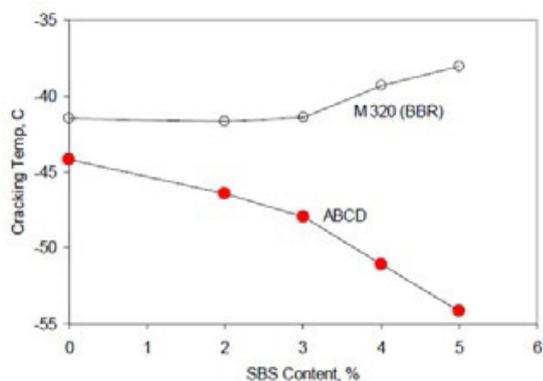


Рисунок 8 – Влияние концентрации СБС на температуру растрескивания вяжущего при определении методами ABCD и BBR [4]

Figure 8 – Effect of SBS concentration on the cracking temperature of the binder applying ABCD and BBR methods [4].

Анализ полученных результатов и изложенных в [4] демонстрирует, что BBR-тест незначительно реагирует на введение полимерного модификатора до 3%, после чего фиксирует повышение температуры растрескивания при увеличении концентрации SBS. В рассматриваемом случае, при минимальном наполнении битума минеральными порошками (составы 1.1 и 2.1), также наблюдается незначительное отклонение показателей от базового битума. После чего график зависимости низкотемпературной устойчивости системы от степени ее наполненности МП начинает демонстрировать повышение температуры растрескивания или прирост жесткости образцов АВВ.

Напротив, ABCD-тест показывает постепенное, но отчетливое уменьшение температуры растрескивания, то есть улучшение низкотемпературной трещиностойкости при

увеличении концентрации как минерального порошка (см. рисунок 7), так и полимера (см. рисунок 8).

Полученные зависимости по ABCD-тесту исследователи [4] попытались объяснить с позиции, что модифицированные битумные вяжущие под действием высоких термических напряжений могут проявлять достаточно большое удлинение без разрушения, при этом поглощая эти напряжения без растрескивания. Вследствие таких рассуждений было предложено анализировать модифицированные вяжущие путем измерения их деформации при разрушении.

Очевидно, что для рассматриваемой системы АВВ не характерны удлинения без разрушений. Однако, следуя фрактальному подходу [13] в структурообразовании асфальтобетона, когда каждая из его структур рассматривается как геометрическое повторение самой себя на следующем масштабном уровне (самоподобие), становится справедливым утверждение о возможности переноса знаний о небольшой части фрактала на весь фрактал и наоборот.

В соответствии с отраслевыми знаниями [20, 21] механизм образования низкотемпературных трещин можно представить следующим образом: композит (асфальтобетон, АВВ) при охлаждении претерпевает термическую усадку, которой сопротивляются его структурные связи между средой и фазой (минеральной составляющей различного масштаба), проявляющиеся как растягивающие напряжения. Превышение пороговых значений растягивающих напряжений запускает процесс трещинообразования. Было установлено [20, 22], что коэффициент температурного расширения асфальтобетона рассматривался как диапазон низких температур и напрямую зависит не только от вида и марки используемого битумного вяжущего, но и его содержания. Для композитов, включающих в свой состав повышенное содержание вяжущего, характерны более высокие температурные деформации.

Подобные заключения в полной мере объясняют полученные данные ABCD-теста (см. рисунок 8). Увеличение доли МП в образце уменьшало объем битума, а соответственно, и склонность образца АВВ к изменению своих геометрических размеров под действием изменяющихся температур. Таким образом, с ростом концентрации минерального порошка в АВВ происходило нарастание пороговых значений растягивающих напряжений (рисунок 9).

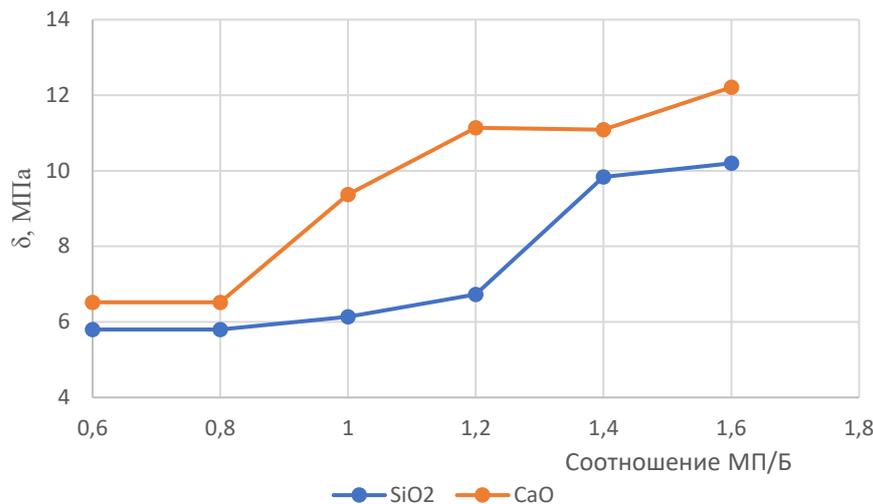


Рисунок 9 – Влияние концентрации МП и его природы на напряжение разрушения битума при ABCD-тесте
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Effect of mineral powder (MP) concentration and its nature on stress of bitumen destruction during the ABCD test
Source: compiled by the authors.

Однако существующие закономерности, связывающие увеличение содержания минерального порошка в асфальтовяжущем с понижением его пластичности и повышением хрупкости и деформативности при низких температурах, ставят под сомнение корректность использования для наполненных битумных систем показателя «температура растрескивания» при ABCD-тесте.

Значимым преимуществом ABCD при оценке низкотемпературной устойчивости битумных систем и особенно наполненных битумных матриц является возможность оценки напряжения разрушения (σ , МПа) образцов, изучения их поведения и сопротивления распространению трещин с понижением температуры испытания.

Целесообразность использования ABCD-теста для наполненных битумных систем подтверждают выводы исследовательских коллективов [5, 23, 24], отмечающие, что результаты протоколов испытаний в значительной степени определяются не только свойствами тестируемых систем, их прочностью, но и коэффициентом температурного расширения сжатия, вариативность значений которого обширна, но является индивидуальным показателем тестируемой системы.

Возвращаясь к обсуждению данных рисунка 9, необходимо подчеркнуть, что при оценке

величины напряжения разрушения (δ) необходимо учитывать температурный диапазон испытаний или модуль показателя. Так, в диапазоне положительных температур величина энергии разрушения битумосодержащих композитов характеризует их прочностные качества. Однако переход в область отрицательных температур диктует обратную зависимость: чем выше показатель δ , тем более жестким будет композит, тем хуже будет его трещиностойкость. Сопоставление результатов рисунков 7 и 9 привлекает внимание перегибом графиков в точке, соответствующей индексам составов АВВ 1.3 и 2.3. Можно предположить, что дальнейшее увеличение концентрации МП в составе АВВ будет переводить систему в хрупкое малодеформативное состояние.

Изложенные данные являются существенной доказательной базой качественных процессов, происходящих в структуре асфальтобетона в процессе его приготовления при объединении битума с МП. Полученные результаты позволяют оценить, каким образом вид и концентрация МП корректируют PG марку битумного вяжущего относительно его базовых свойств (таблица 3). Данные для оценки низкотемпературной устойчивости ($\pm Y$) принимались по BBR-тесту.

Таблица 3
Динамика изменения PG марки битумного вяжущего при наполнении МП
Источник: составлено авторами.

Table 3
Dynamics of change in PG grade of bitumen binder when mineral powder (MP) is filled
Source: compiled by the authors.

Рецептура АВВ (отношение МП/вяжущее), части	Вид минерального порошка	
	известняк	пыль электрофильтров
	PG марка	
битум	64-34	
0,8 : 1	76-28	70-28
1,0 : 1	76-28	76-28
1,2 : 1	76-28	76-28
1,4 : 1	82-22	76-22
1,6 : 1	82-22	82-22

Полученные переходы марок PG вяжущего (см. таблицу 3) коррелируют с графиками зависимости напряжения разрушения наполненных битумных систем по ABCD-тесту. АВВ, наполненные в соотношении 1,2:1 (МП:Б), имеют на рисунке 9 перегибы, свидетельствующие о переходе системы под действием низких температур в иное реологическое состояние (нарастание хрупкости). Данные BBR-теста демонстрируют, что это точка перехода системы относительно базового битума на две марки вниз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка динамики изменения свойств битума под влиянием различной степени наполнения минеральным порошком из известняка и пыли электрофильтров продемонстрировала значительное изменение свойств исходного битума.

Наполнение вяжущего минеральным порошком (пылью) в максимально допустимом концентрационном пределе (по ГОСТу) изменяет параметр марки PG (X) на три позиции с 64 °С до 82 °С. Более кардинальные данные получены для низкотемпературной устойчивости образцов с обрушением параметра ($\pm Y$) с величины -34 °С до -22 °С!

Таким образом, полученные результаты могут являться ответом на вопрос: почему трещиностойкость битума не отвечает реальной трещиностойкости асфальтобетона при эксплуатации. Формирование АВВ в структуре асфальтобетона происходит в неконтролируемой исследователями области. Наблюдающееся нарастание жесткости системы, особенно

в области низких температур, демонстрирует ее неспособность сопротивляться температурным факторам, на которые был рассчитан битум в ее составе, а следовательно, физическим проявлением этих структурных эффектов будет температурное трещинообразование. Особенно необходимо отметить, что базовый битум, используемый в эксперименте, отличался высокими показателями марки относительно своих аналогов. Надо полагать, что более вязкие марки битума и ПБВ в процессе формирования АВВ проявят большую склонность к структурированию и нарастанию хрупких свойств системы.

Интересные, на первый взгляд противоречивые, данные были получены при тестировании образцов АВВ по методикам BBR и ABCD для оценки низкотемпературных параметров. Выполненный анализ продемонстрировал, что полученные данные полностью согласуются между собой. Однако в случае использования теста ABCD целесообразно опираться на данные по напряжению разрушения, позволяющие в динамике фиксировать реакцию системы на вид и степень наполнения, а также улавливать ее реологические изменения, так как более жесткие смеси с высокой прочностью и малым перемещением обладают худшей стойкостью к образованию трещин.

В ходе исследования было установлено: влияние минеральных порошков кислой и основной природы, а также их концентрации на начальном этапе формирования свойства АВВ разнятся незначительно. Возможно отметить, что изменение марки PG-битума, наполненного известняковым минеральным

порошком, происходит более резко, что связано с его высокой структурирующей способностью. Очевидно, в виду разной природы МП, а следовательно, реакционной способности по отношению к битуму, отличия проявятся при исследовании коррозионной устойчивости сформированных АВВ.

Подводя итог, можно утверждать, что необходимо расширять и продолжать программу исследований низкотемпературных реологических параметров не только различных вяжущих, но и АВВ являющихся микроструктурой асфальтобетонов. Очевидно, что, выявляя параметры, отвечающие за низкотемпературное растрескивание системы на микроуровне, станет возможным масштабировать знания и на асфальтобетоны – макроуровень.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Колесник Д.А. Определение низкотемпературной трещиностойкости асфальтобетона // Мир дорог. 2023. №154. С. 80–86.
2. Колесник Д.А., Шапченко Д.В. Новые тенденции в области испытаний асфальтобетона // Мир дорог. 2018. №115. С. 44–46.
3. Пахаренко Д.В., Колесник Д.А. Опытные экспериментальные работы ЗАО «ВАД» // Дорожная техника. 2016. №1. С. 28–35.
4. Elwardany M.D., Planche J.-P., King G. Universal and practical approach to evaluate asphalt binder resistance to thermally-induced surface damage // Construction and Building Materials. 2020. № 255. P. 119331. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119331.
5. Elwardany M.D., King G., Planche J.-P., Rodezno C., Christensen D., Fertig III R.S., Kuhn K.T., Bhuiyan F.H. Internal restraint damage mechanism for age-induced pavement surface damage // Asphalt Paving Technol: J. Assoc. AsphaltPavingTechnol. 2019. Vol 88.
6. Рябов В.Г., Ширкунов А.С., Шуверов В.М. Получение дорожной битумной композиции с улучшенными низкотемпературными характеристиками // Вестник ПНИПУ. 2016. № 3. С. 115–125. DOI: 10.15593/2224-9400/2016.3.09.
7. Zolotarev V. Methods for determining stresses at key temperatures // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 345. P. 128365. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128365.
8. Gorbatova V.N., Gordeeva I.V., Dudareva T.V., Krasotkina I.A., Nikol'skii V.G., Egorov V.M. Effect of the active powder of discretely devulcanized rubber on bitumen properties at low temperatures // Nanotechnologies in Construction. 2023. Vol. 15(1). Pp. 72–83. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-1-72-83.
9. Небрятенко Д.Ю. ABCD – метод оценки низкотемпературного поведения дорожных вяжущих // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал. 2022. № 1 (39). С. 37–41. DOI 10.52684/2312-3702-2022-39-1-37-41.
10. Лебедев Е.В., Зуров Б.А., Высоцкий М.М., Небрятенко Д.Ю. Оценка свойств дорожных вяжущих при низких температурах методом ABCD // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2022. Т.18, № 2 (28). С. 81–89. DOI: 10.34708/GSTOU. 2022.40.59.007.
11. Егоров Д.Ю., Небрятенко Д.Ю. Применение метода ABCD при анализе низкотемпературных свойств состаренных ординарных и модифицированных битумов // Вестник ВСГУТУ. 2023. № 3 (90). С. 73–82.
12. Кирюхин Г.Н. К оценке температурной трещиностойкости асфальтобетона // Наука и техника в дорожной отрасли. 2018. №1 (83). С.27–30.
13. Кирюхин Г.Н. К вопросу о теории структуры асфальтобетона // Дороги и мосты. 2019. №1 (41). С. 247–261.
14. Ярцев В.П., Долженкова М.В., Петрова Н.В. Влияние наполнителей и нанодобавок на эксплуатационные свойства композитов на основе битума // Вестник ТГТУ. 2014. Т. 20, № 4. С. 801–809.
15. Лебедев М.С. Чулкова И.Л. Исследование реологических свойств битумных композиций, наполненных золами-уноса различного состава // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 47–52. DOI: 10.12737/22365.
16. 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.
17. Mr. Robert B. McGennis, Dr. Scott ShuEer, Dr. Hussain U. Bahia. Справочные данные по методам тестирования Битумных вяжущих Суперпейв (Superpave) в США № FHWA-SA-94-069 // Федеральное управление шоссейных дорог. США: Министерство транспорта США. 1994. 118 с.
18. Blazejowski K., OlszackiJa., Peciakowski H. BitumnyjSpravocnik // ORLEN Asfaltsp. z o.o. – Plock, 2017. 142 p.
19. John I., Bangi M.R. and Lawrence M. Effect of Filler and Binder Contents on Air Voids in Hot-Mix Asphalt for Road Pavement Construction // Open Journal of Civil Engineering. 2021. № 11. Pp.255-289. DOI: 10.4236/ojce.2021.113016.
20. Сериков Д.Л., Кравченко С.Е. Экспериментальные исследования влияния компонентов асфальтобетонной смеси на структурную устойчивость асфальтобетона // Автомобильные дороги и мосты. 2016. №2 (18). С. 48–55.
21. Кирюхин Г.Н., Смирнов Е.А., Зайцев Н.Ю. Влияние температуры на прочность нежестких дорожных одежд // Автомобильные дороги. 2022. № 1 (1082). С. 118–122.
22. Кравченко С.Е., Сериков Д.Л. К вопросу о теоретической и экспериментальной оценке структурной устойчивости асфальтобетона // Строительная наука и техника. 2009. № 3 (24). С. 35–40.
23. Akentuna M., Kim S.S., Nazzal M., Abbas A.R. Asphalt Mixture CTE Measurement and the Determination of Factors Affecting CTE // Journal of Materials in Civil Engineering. 2017. Vol. 29 (6). P.04017010. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001840.

24. Marasteanu M., Zofka A., Turos M., Li X., Velasquez R., Li X., Buttlar W., Paulino G., Braham A., Dave E., Ojo J., Bahia H., Williams C., Bausano J., Gallistel A., McGraw, J. Investigation of Low Temperature Cracking in Asphalt Pavements National Pooled Fund Study 776. Minnesota. Department of Transportation, 2004. 338 p.

REFERENCES

1. Kolesnik D.A. Determination of low-temperature crack resistance of asphalt concrete. *Mir dorog*. 2023; 154: 80–86. (in Russ.)

2. Kolesnik D.A., Shapchenko D.V. New trends in the field of asphalt concrete testing. *Mir dorog*. 2018; 115: 44–46. (in Russ.)

3. Pakharenko D.V., Kolesnik D.A. Experimental work of CJSC "VAD". *Dorozhnajatehnika*. 2016; 1: 28–35. (in Russ.)

4. Elwardany M.D., Planche J.-P., King G. Universal and practical approach to evaluate asphalt binder resistance to thermally-induced surface damage. *Construction and Building Materials*. 2020; 255:119331. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119331.

5. Elwardany M.D., King G., Planche J.-P., Rodezno C., Christensen D., Fertig III R.S., Kuhn K.T., Bhuiyan F.H. Internal restraint damage mechanism for age-induced pavement surface damage. *Asphalt Paving Technol. J. Assoc. Asphalt Paving Technol.* 2019; Vol 88.

6. Ryabov V.G., Shirkunov A.S., Shuverov V.M. Obtaining a road bitumen composition with improved low-temperature characteristics. *Bulletin of PNRPU*. 2016; 3: 115-125. DOI: 10.15593/2224-9400/2016.3.09. (in Russ.)

7. Zolotarev V. Methods for determining stresses at key temperatures. *Construction and Building Materials*. 2022; Vol. 345: 128365. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128365.

8. Gorbatova V.N., Gordeeva I.V., Dudareva T.V., Krasotkina I.A., Nikol'skii V.G., Egorov V.M. Effect of the active powder of discretely devulcanized rubber on bitumen properties at low temperatures. *Nanotechnologies in Construction*. 2023; 15(1): 72–83. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-1-72-83.

9. Nebratenko D.Y. ABCD – a method for evaluating the low-temperature behavior of road binders. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region: scientific and Technical Journal*. 2022; 1 (39): 37–41. DOI 10.52684/2312-3702-2022-39-1-37-41. (in Russ.)

10. Lebedev E.V., Zurov B.A., Vysotsky M.M., Nebratenko D.Yu. Assessment of the properties of road binders at low temperatures by the ABCD method. *Herald of GSTOU. Technical Sciences*. 2022; XVIII, 2 (28): 81–89. DOI: 10.34708/GSTOU. 2022.40.59.007. (in Russ.)

11. Egorov D.Yu., Nebratenko D.Yu. Application of abcd method for analysis of low-temperature properties of aged ordinary and modified bitumens. *ESSUTM Bulletin*. 2023; 3 (90): 73–82. DOI 10.53980/24131997_2023_3_73. (in Russ.)

12. Kiryukhin G.N. On the assessment of thermal crack resistance of asphalt concrete. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2018; 1 (83): 27–30. (in Russ.)

13. Kiriukhin G.N. On the theory of the structure of asphalt concrete. *Dorogimosty*. 2019; 1 (41): 247–261. (in Russ.)

14. Yartsev V.P., Dolzhenkova M.V., Petrova N.V. Influence of fillers and nano-additives on the performance properties of bitumen-based composites. *Transactions of the TSTU*. 2014; 20 (4): 801–809. (in Russ.)

15. Lebedev M.S., Chulkova I.L. Study of rheological characteristics of bitumen composites with different fly ashes. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016; 11: 47-52. DOI: 10.12737/22365. (in Russ.)

16. 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>

17. Mr. Robert B. McGennis, Dr. Scott ShuEer, Dr. Hussain U. Bahia. Reference data on testing methods of Bitumen binders Superpave (Superpave) in the USA No. FHWA-SA-94-069. *Federal Highway Administration. USA: US Department of Transportation*. 1994: 118. (in Russ.)

18. Blazejowski K., Olszacki Ja., Peciakowski H. Bitumnyj Spravocnik. *ORLEN Asphalt sp. z o.o. – Plock*, 2017. 142.

19. John I., Bangi M.R. and Lawrence M. Effect of Filler and Binder Contents on Air Voids in Hot-Mix Asphalt for Road Pavement Construction. *Open Journal of Civil Engineering*. 2021; №11: 255–289. DOI: 10.4236/ojce.2021.113016.

20. Serikov D.L., Kravchenko S.E. Experimental studies of the influence of asphalt concrete mixture components on the structural stability of asphalt concrete. *Roadsand Bridges*. 2016; 2 (18): 48–55. (in Russ.)

21. Kiryukhin G.N., Smirnov E.A., Zaitsev N.Yu. The influence of temperature on the strength of non-rigid road clothes. *Avtomobil'nyedorogi*. 2022; 1 (1082): 118–122. (in Russ.)

22. Kravchenko S.E., Serikov D.L. On the theoretical and experimental assessment of the structural stability of asphalt concrete. *Stroitel'najanaukaitehnika*. 2009; 3 (24): 35–40. (in Russ.)

23. Akentuna M., Kim S.S., Nazzal M., Abbas A.R. Asphalt Mixture CTE Measurement and the Determination of Factors Affecting CTE. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017. Vol. 29 (6): 04017010. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001840.

24. Marasteanu M., Zofka A., Turos M., Li X., Velasquez R., Li X., Buttlar W., Paulino G., Braham A., Dave E., Ojo J., Bahia H., Williams C., Bausano J., Gallistel A., McGraw, J. Investigation of Low Temperature Cracking in Asphalt Pavements National Pooled Fund Study 776. Minnesota. Department of Transportation, 2004. 338 p.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Высоцкая М.А. Общее руководство, формулирование цели задач и выводов, работа с текстом статьи, внесла основной вклад в ее написание.

Лесовик В.С. Научное консультирование, работа с текстом статьи.

Катрич Я.М. Обработка экспериментальных данных.

Егоров Д.Ю. Проведение лабораторных исследований ABCD-теста.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Vysotskaya M.A. General guidance, formulation of the purpose of tasks and conclusions, work with the text of the article, has made the main contribution to the manuscript writing.

Lesovik V.S. Scientific consulting, work with the text material.

Katrich Ya.M. Processing of experimental data.

Egorov D.Yu. Conducting laboratory studies of the ABCD test.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Высоцкая Марина Алексеевна – канд. техн. наук, доц. кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4572-7839>, **Scopus Author ID:** 55780438500, **Researcher ID:** AAD-3647-2022, **SPIN-код:** 9233-5349, e-mail: roruri@rambler.ru

Лесовик Валерий Станиславович – д-р техн. наук, проф. кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2378-3947>, **Scopus Author ID:** 55887733300, **Researcher ID:** A-4757-2016, **SPIN-код:** 2873-6860, e-mail: naukavs@mail.ru

Катрич Ярослав Михайлович – аспирант кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина Белгородского государ-

ственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-0314-9877>, **Researcher ID:** JWO-1778-2024, **SPIN-код:** 6338-2633, e-mail: yaroslavkatrich@mail.ru

Егоров Дмитрий Юрьевич – руководитель направления ООО «ИНФРАТЕСТ» (117545, г. Москва, ул. Дорожная, д. 8, корп. 1), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-6127-1305>, **Researcher ID:** KFQ-0086-2024, **SPIN-код:** 0086-2024, e-mail: dmitry.egorov@agni.pro

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vysotskaya Marina A.I. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Automobile and Railway Road Department named after A.M. Gridchin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4572-7839>, **Scopus Author ID:** 55780438500, **Researcher ID:** AAD-3647-2022, **SPIN-код:** 9233-5349, e-mail: roruri@rambler.ru

Lesovik Valeriy S. – Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Department of Building Materials' Science, Products and Structures of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2378-3947>, **Scopus Author ID:** 55887733300, **Researcher ID:** A-4757-2016, **SPIN-код:** 2873-6860, e-mail: naukavs@mail.ru

Katrich Yaroslav M. – Postgraduate student of the Automobile and Railway Road Department named after A.M. Gridchin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46 Kostyukova str., Belgorod, 308012), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-0314-9877>, **Researcher ID:** JWO-1778-2024, **SPIN-код:** 6338-2633, e-mail: yaroslavkatrich@mail.ru

Egorov Dmitriy Y. – Head of research, LLC "INFRAEST" (8 Dorozhnaya str., 1, Moscow, 117545), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-6127-1305>, **Researcher ID:** KFQ-0086-2024, **SPIN-код:** 0086-2024, e-mail: dmitry.egorov@agni.pro

Научная статья
УДК 625.81
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-786-800>
EDN: XCRHGS



ЗАВИСИМОСТЬ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ГРУНТОВ, УКРЕПЛЕННЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИМИ ВЯЖУЩИМИ, ОТ ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ

Н.А. Слободчикова¹, С.В. Ключев² ✉, К.В. Плюта³

¹ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»,
г. Иркутск, Россия

²ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова»,
г. Белгород, Россия

³ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»,
г. Иркутск, Россия

✉ ответственный автор
kv_plyuta@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Модуль упругости относится к одной из основных физико-механических характеристик укрепленных местных грунтов. Деформации грунтов и строительных материалов принято описывать законом Гука. К основным методам лабораторных испытаний относятся методы с применением: одноосного сжатия, трехосного сжатия, жесткого штампа. Определение модуля упругости является сложным, продолжительным во времени и трудоемким испытанием. Существуют эмпирические модели, которые описывают взаимосвязь модуля упругости от разных параметров и характеристик (прочности на сжатие, содержания вяжущего в смеси и др.). Однако данные модели в основном разработаны для стабилизированных грунтов и для щебня, укрепленного портландцементом.

Методы и материалы. Для определения закономерности изменения модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, от прочности на сжатие проведены исследования на образцах различных грунтов, укрепленных портландцементом и известью. Для изготовления образцов применялись существующие методики, указанные в нормативно-технической документации.

Результаты. На основе выполненных исследований разработаны две эмпирические модели, отражающие зависимость значений модуля упругости от значений прочности на сжатие грунтов, укрепленных портландцементом и известью.

Обсуждение и заключение. Существующие методы испытаний модуля упругости являются продолжительными и трудоемкими. Разработанные эмпирические модели позволяют получать ориентировочные значения модуля упругости от значений прочности на сжатие образцов грунтов, укрепленных портландцементом и известью.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: укрепленные грунты, модуль упругости, методы лабораторных испытаний, прочность на сжатие, эмпирические модели

Статья поступила в редакцию 31.07.2024; одобрена после рецензирования 02.10.2024; принята к публикации 17.10.2024.

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: Слободчикова Н.А., Ключев С.В., Плюта К.В. Зависимость модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, от прочности на сжатие // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 5. С. 786-800. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-786-800>

© Слободчикова Н.А., Ключев С.В., Плюта К.В., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-786-800>
EDN: XCRHGS

DEPENDENCE OF THE SOILS' ELASTIC MODULUS REINFORCED WITH INORGANIC BINDERS ON COMPRESSIVE STRENGTH

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

ABSTRACT

Introduction. The modulus of elasticity refers to one of the main physical and mechanical characteristics of reinforced local grounds. Deformations of soils and building materials are usually described by Hooke's law. The main laboratory testing methods include applying of uniaxial compression, triaxial compression, rigid stamp technics. Determining the modulus of elasticity is a complex, time-consuming and labor-intensive test. There are empirical models that describe the relationship between the modulus of elasticity and various parameters and characteristics (compressive strength, binder content in the mixture, etc.). However, these models are mainly developed for stabilized soils and for crushed stone reinforced with Portland cement.

Methods and materials. To determine the pattern of change in the modulus of soils' elasticity reinforced with inorganic binding materials from compressive strength, studies were conducted on samples of various soils strengthened with Portland cement and lime. Existing methods specified in the regulatory and technical documentation were used to produce the samples.

Results. Based on the performed research, two empirical models were developed that reflect the dependence of the elastic modulus values on the compressive strength values of soils reinforced with Portland cement and lime.

Discussion and conclusions. Existing testing methods of the elastic modulus are lengthy and labor-intensive. The developed empirical models allow us to obtain approximate values of the elastic modulus from the values of compressive strength of soil samples reinforced with Portland cement and lime.

KEYWORDS: reinforced soils, modulus of elasticity, laboratory testing methods, compressive strength, empirical models

The article was submitted: 31.07. 2024; approved after reviewing: 02.10.2024; accepted for publication: 17.10.2024.

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. Slobodchikova N.A., Klyuev S.V., Plyuta K.V. Dependence of the soils' elastic modulus reinforced with inorganic binders on compressive strength. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (5): 786-800. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-786-800>

© Slobodchikova N.A., Klyuev S.V., Plyuta K.V., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Укрепление местных грунтов неорганическими вяжущими материалами является одной из эффективных технологий строительства автомобильных дорог. Методам укрепления грунтов посвящены работы различных авторов. В работе [1] приведены результаты исследований влияния добавок неорганических вяжущих, в том числе техногенных отходов, на дисперсность глинистых грунтов. В работе [2] представлены результаты лабораторных исследований получения комплексного неорганического вяжущего на основе золы-уноса и фторгипса для укрепления грунтов. В работе [3] рассмотрены методы подбора составов грунтов, укрепленных известью. В [4] показаны результаты исследований влияния техногенных отходов на деформации, вызванные набуханием и усадкой глинистых грунтов. В [5] приведены результаты применения различных тип золы-уноса для укрепления грунтов и их влияние на прочностные характеристики. В [6] представлены результаты исследования свойств укрепленных грунтов, имеющих в своем составе известь. В [7] приведены результаты исследований укрепления глинистых грунтов различными техногенными отходами. Подбор составов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, производится путем изготовления лабораторных образцов и определения физико-механических характеристик. К таким характеристикам относится модуль упругости E , который также используется при расчете конструкций дорожных одежд автомобильных дорог.

При сжатии, растяжении или сдвиге укрепленного грунта происходит смещение отдельных минеральных частиц, сжатие воды и водных пленок. После окончания действия нагрузки объем воды и воздуха восстанавливается. Одновременно с упругими возникают остаточные деформации, когда число остаточных деформаций значительно превосходит упругие, материал разрушается. Упругой деформации соответствует модуль упругости, полной деформации (условно включающей упругие и остаточные деформации) соответствует модуль деформации.

Исследованиями деформационных характеристик укрепленных и стабилизированных грунтов занимались¹ [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14,

15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26]. Деформации грунтов и строительных материалов принято описывать законом Гука

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (1)$$

где E модуль упругости, Па;

σ напряжение, вызываемое в образце действующей силой, Па.

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (2)$$

где F – действующая на образец сила, Н;

A – площадь приложения силы, м²;

ε – упругая относительная деформация материала, вызванная напряжением.

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где l_1 – размер образца после деформации;

l_0 – первоначальный размер образца.

В нормативной и научно-технической литературе приведены различные методы определения деформационных характеристик [11, 20].

К основным методам относятся методы с применением:

1. Одноосного сжатия.
2. Трехосного сжатия.
3. Жесткого штампа.

При этом определяемые разными способами деформационные характеристики одного и того же грунта могут различаться в несколько раз, т.к. проводятся при различных граничных условиях [21].

В работе [11], например, приводятся результаты анализа методов испытаний в разных странах. В Китае и в Европе используется медленная повторяющаяся нагрузка для имитации транспортной нагрузки. При этом условия нагружения отличаются от фактической транспортной нагрузки, и, соответственно, модуль упругости может необъективно отражать соотношение деформаций и напряжений материалов при воздействии нагрузки транспортного средства [11].

В Америке и Австралии применяют повторное нагружение при трехосном испытании для определения упругости необработанного грунта или материалов основания. Метод основан на воздействии импульса нагрузки на образец

¹ Бунтова О.С. Обработка результатов эксперимента. Физико-математические науки и информационные технологии: проблемы и тенденции развития: сб. ст. по матер. II Междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск: СибАК, 2012. Обработка результатов эксперимента.

длительностью 0,1 с, с последующей разгрузкой в течение 0,9 с. Такой режим больше похож на нагрузку от движения транспортного средства, но требует использования габаритного оборудования [11].

Также стоит отметить, что трехосное испытание под нагрузкой проводится в условиях ограничивающего давления, тогда как влияние ограничивающего давления на модуль грунта, укрепленного неорганическими вяжущими, незначительно по сравнению с неукрепленными или стабилизированными грунтами земляного полотна, т.к. поперечные деформации укрепленных грунтов, как и других строительных материалов с жесткими структурными связями, незначительны.

Определение модуля упругости в лабораторных условиях является сложным и трудоемким. Существуют эмпирические модели, которые описывают взаимосвязь модуля упругости от других прочностных характеристик.

В исследовании [22] отмечается, что с наибольшей точностью прогнозировать значение модуля упругости для стабилизированных грунтов земляного полотна позволяют следующие уравнения:

$$M_r = UCS^{a+b\sigma_d}, \quad (4)$$

где a и b – параметры регрессии;

UCS – прочность на сжатие.

$$M_r = UCS \left[a \cdot \left(\frac{\theta}{\sigma_{atm}} \right)^b \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{\sigma_{atm}} \right)^c \right], \quad (5)$$

где θ – объемное напряжение $\sigma + 2\tau$;

τ_{oct} – напряжение сдвига в октаэдре ($\sqrt{2/3}(\sigma_1 - \sigma_3)$);

σ_{atm} – атмосферное давление, 101 кПа;

a , b и c – параметры регрессии.

Модуль упругости для грунтов, стабилизированных известью:

$$M_{Rt} = 0,124UCS + 9,8, \quad (6)$$

где UCS – прочность на сжатие.

Для определения возрастающих пластических деформаций в зависимости от изменения модуля упругости, которое можно ожидать сезонно и в течение всего срока службы дорожного покрытия, используют формулу

$$\sum_{t=1}^m \varepsilon_p = a \cdot \left(\frac{\sigma_{dt}}{M_{Rt}} \right) \cdot N_t^b, \quad (7)$$

$$\sum_1^m t = T, \quad (8)$$

где ε_p – накопленная постоянная деформация в микродеформациях;

T – расчетный срок службы дорожного покрытия;

σ_{dt} – отклоняющее напряжение в кПа за период времени t ;

N – это количество повторений нагрузки за период времени t ;

a и b – параметры регрессии.

В исследовании [23] указано, что модуль упругости щебня, укрепленного портландцементом, в любое время твердения, M_{Rt} , можно оценить исходя из прочности на сжатие при том же времени твердения (UCS_t):

$$M_{Rt} = m_0 UCS_t, \quad (9)$$

где M_{Rt} – модуль упругости после t дней времени отверждения;

m_0 – наклон линии тренда регрессионной модели;

UCS – прочность на сжатие;

t – время твердения.

$$m_0 = m_1 \frac{1}{F} + m_2 \cdot I_p + m_3 \cdot AC + m_4 \frac{R_{сж1}}{p_a} + b, \quad (10)$$

где F – содержание частиц, проходящих через сито № 200, %;

AC – количество вяжущего, % от веса сухого грунта;

I_p – число пластичности;

$R_{сж1}$ – прочность на сжатие после 1 дня твердения;

p_a – атмосферное давление;

m_1, m_2, m_3, m_4 – параметры регрессии.

Рассмотренные модели в основном разработаны для стабилизированных грунтов, формулы (9), (10) подготовлены для щебня, укрепленного портландцементом. Отсутствуют исследования модуля упругости укрепленных грунтов. И, как следствие, отсутствуют исследования зависимости модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, от прочностных характеристик.

Учитывая изложенное выше в работе, поставлена цель – определить закономерности изменения модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, от прочности на сжатие.

Задачи:

1. Определить прочность на сжатие грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами.

2. Определить модуль упругости образцов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, путем предварительного нагружения и последующей разгрузки образцов.

Таблица 1
Гранулометрический состав грунтов
Источник: составлено авторами.

Table 1
Granulometric composition of soils
Source: compiled by the authors.

Размер сит, мм								Классификация (ГОСТ 25100)
10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1	
4,64	12,53	21,29	30,20	42,70	56,26	70,71	100,00	Суглинок
0,00	0,00	3,25	5,87	11,51	50,05	82,78	100,00	Супесь
0,00	0,00	8,49	12,86	21,77	64,29	90,64	100,00	Песок средней крупности
40,35	50,49	54,88	57,17	64,08	85,34	94,00	100,00	Крупнообломочный гравийный, заполнитель песок гравелистый грунт
5,52	13,96	25,38	50,64	65,83	71,34	77,55	90,51	Золошлаковая смесь

Таблица 2
Физико-механические характеристики грунтов
Источник: составлено авторами.

Table 2.
Physical and mechanical characteristics of soils
Source: compiled by the authors.

Наименование показателя	Един. изм.	Требования к испытываемому материалу		Результаты испытаний				
		Нормативно- техническая документация	Норма- тивное значение	Суглинок	Супесь	Песок средней крупнос- ти	Гравий- ный	Золош- лаковая смесь
Содержание частиц более 2 мм, по массе	%	ГОСТ 25100– 2020	-	21,29	3,25	8,49	54,88	30,28
Влажность на границе текучести	%	ГОСТ 5180– 2015	-	25,78	19,75	-	-	-
Влажность на границе раскатывания	%	ГОСТ 5180– 2015	-	16,43	14,32	не раскаты- вается в жгут диамет- ром 3 мм	не раскаты- вается в жгут диамет- ром 3 мм	не раскаты- вается в жгут диамет- ром 3 мм
Число пластичности	%	ГОСТ 25100– 2020	$7 < I_p \leq 12$	9,35	5,43	-	-	-
Показатель текучести	д.е.	ГОСТ 25100– 2020	$IL < 0$	-1,4	-2,40	-	-	-

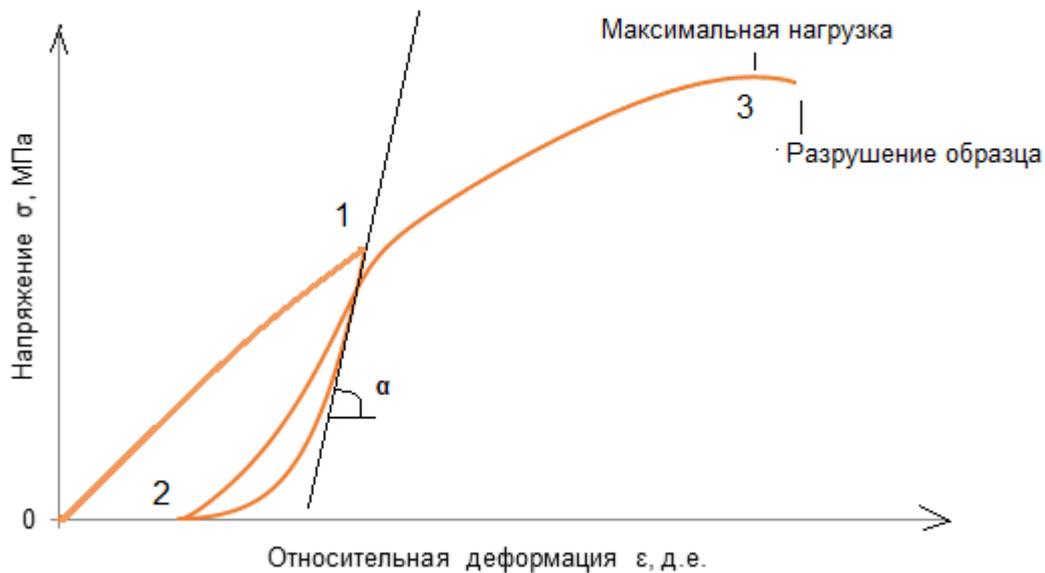


Рисунок 1 – Диаграмма деформирования образца укрепленного грунта:
0-1 – нагружение; 1-2 – разгрузка; 2-3 – нагружение
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Deformation diagram of a reinforced soil sample:
0-1 – loading; 1-2 – unloading; 2-3 – loading
Source: compiled by the authors

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения исследования использованы следующие материалы и грунты:

- крупнообломочный гравийный грунт;
- песок средней крупности;
- супесь легкая песчанистая;
- суглинок легкий песчанистый;
- золошлаковая смесь;
- портландцемент;
- известь.

Вычисление физико-механических характеристик грунтов и материалов осуществлено в лаборатории стандартными методами ГОСТ. Результаты определения гранулометрического состава приведены в таблице 1.

Физико-механические характеристики грунтов приведены в таблице 2.

Определение модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, осуществляется в следующей последовательности:

1. Изготовление образцов грунта, укрепленного портландцементом и известью, с предварительно определенными значениями максимальной плотности и оптимальной влажности.

2. Твердение образцов в нормальных условиях (при температуре 20 ± 2 °С и относительной влажности воздуха $95 \pm 5\%$) до достижения ими проектного возраста.

3. Водонасыщение образцов стандартным методом ГОСТ Р 70452.

4. Определение прочности на сжатие стандартным методом ГОСТ Р 70452.

5. Нагружение лабораторных образцов на прессе.

Поперечные деформации материалов с жесткими структурными связями незначительны, поэтому нагружение образца создается без ограничивающего давления.

Нагружение образцов укрепленного грунта производят на прессе статической нагрузкой. При достижении нагрузкой значения на уровне 50% от разрушающей нагрузки производится разгрузка образца и повторное нагружение (циклирование) до разрушающей нагрузки. Деформации образцов контролируются по датчику перемещения плиты пресса (рисунок 1).

6. Обработка результатов.

Значение модуля упругости определяется по формулам (1)–(3). За конечный результат принимают среднее арифметическое значение серии лабораторных образцов

Таблица 3
Уровни надежности и коэффициент Стьюдента
Источник: составлено авторами.

Table 3
Reliability levels and Student's coefficient
Source: compiled by the authors.

Тип дорожных одежд	Уровень надежности Кн	Коэффициент Стьюдента t
Капитальный	0,98	3,4
	0,95	2,6
	0,92	2,2
	0,90	2,0
Облегченный	0,90	2,0
	0,85	1,7
Переходный	0,82	1,6

$$m_0 = m_1 \frac{1}{F} + m_2 \cdot I_p + m_3 \cdot AC + m_4 \frac{R_{сж1}}{pa} + b, \quad (11)$$

где E_1, E_2, \dots, E_n – значения модуля упругости образцов 1, 2, ... n;

n – количество образцов.

Для оценки точности полученных результатов при малом количестве измерений ($2 \leq n \leq 10$) используют методы математической статистики, разработанной для малого числа измерений. При этом полученные результаты рассматривают как случайную выборку из некоторой генеральной совокупности.

Оценку точности измерений и правильности производят с помощью следующих критериев².

Единичные отклонения (отклонения отдельных измерений от среднего арифметического):

$$E_i = \bar{E} - E_i. \quad (12)$$

Средняя квадратическая ошибка отдельного измерения

$$S = \sqrt{\frac{\sum(E - E_i)^2}{n-1}}. \quad (13)$$

Коэффициент вариации

$$v = \frac{S}{\bar{E}}. \quad (14)$$

Итоговое значение модуля упругости

$$E = \bar{E}(1 - t \cdot v), \quad (15)$$

где t – коэффициент Стьюдента при допустимом уровне надежности.

Уровень надежности принимается по ПНСТ 542–2021 (таблица 3).

Для отбраковки выпадающих результатов необходимо сравнить отдельные значения модуля упругости со средним значением. Отклонение отдельных значений от среднего не должно превышать 15–20%.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам проведенных исследований подобраны составы грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, и определены их физико-механические характеристики (таблица 4, рисунки 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9).

² Бунтова О.С. Обработка результатов эксперимента. Физико-математические науки и информационные технологии: проблемы и тенденции развития: сб. ст. по матер. II Междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск: СибАК, 2012. Обработка результатов эксперимента.

Таблица 4
 Результаты определения модуля упругости золошлаковой смеси,
 укрепленной неорганическими вяжущими
 Источник: составлено авторами.

Table 4.
 Results of determining the elastic modulus
 of an ash-slag mixture reinforced with inorganic binders
 Source: compiled by the authors.

Наименование грунта	Вяжущее	Содержание вяжущего, %	Прочность на сжатие, МПа	Модуль упругости, МПа
Гравийный грунт с добавлением золошлаковой смеси	Портландцемент	6	5,58	1466
			7,6	1500
			5,64	1555
			7,57	1416
			6,35	1461
			6,14	1625
			6,65	1400
			6,81	1600
Золошлаковая смесь	Портландцемент	6	0,99	666
			0,81	500
			0,77	500
			0,62	500
			0,96	666
Суглинок	Портландцемент	4	1,29	1000
			1,21	1000
			2	1000
			1,42	1000
Супесь	Портландцемент	6	2,1	1000
			2,4	743
Песок средней крупности	Портландцемент	6	4,27	1200
			3,85	1200
			4,57	1327
			4,17	1429
			3,92	1473
			3,77	1473
Супесь	Известь	7	0,11	100
			0,27	100
Супесь	Известь	6	0,11	100
			0,21	100
Суглинок	Известь	10	3,86	1333
			3,37	1200

Наименование грунта	Вязущее	Содержание вяжущего, %	Прочность на сжатие, МПа	Модуль упругости, МПа
Суглинок	Известь	6	3,28	775
			4,26	1300
			4,12	1175
			4,79	1233
			4,03	1360
			4,38	1429
			4,03	1529
			4,11	1617
			3,72	1289
			4,76	1167
Золошлаковая смесь	Известь	7	4,01	1428
			4,39	1400
			4,28	1428
			5,69	1480
			5,56	2000
			5,07	1778
Золошлаковая смесь	Известь	6	5,39	1684
			4,22	1000
			3,1	1200
			3,82	1168
			3,71	1122

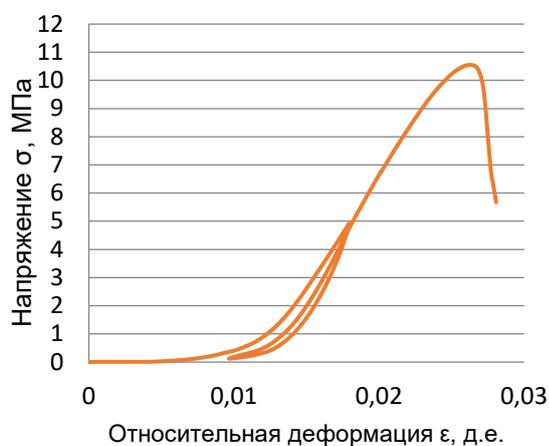


Рисунок 2 – Определение модуля упругости суглинка, укрепленного портландцементом
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Determination of the elastic modulus of the loam reinforced with Portland cement
Source: compiled by the authors.

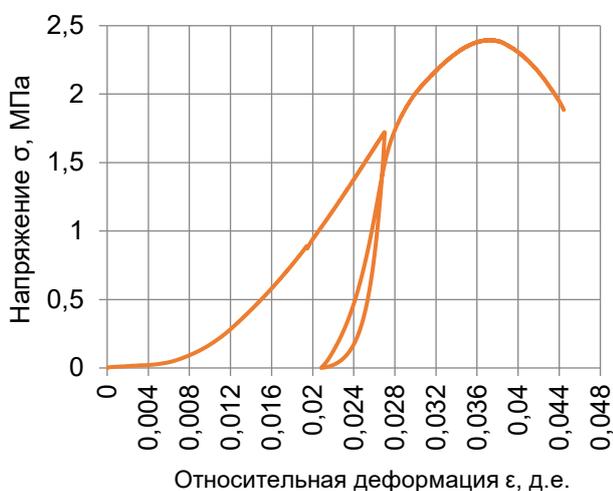


Рисунок 3 – Определение модуля упругости супеси, укрепленной портландцементом 6%
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Determination of the elastic modulus of sandy loam reinforced with Portland cement 6%
Source: compiled by the authors.

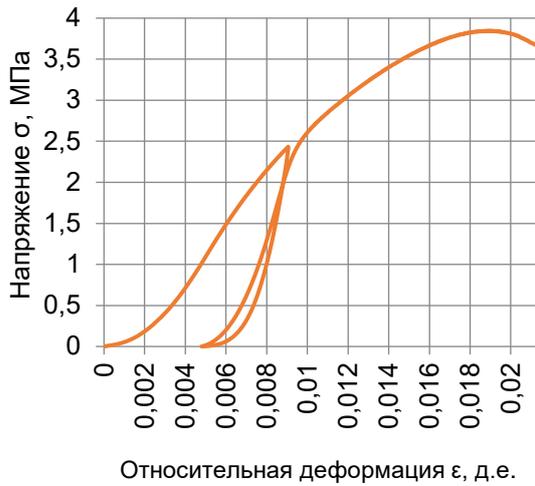


Рисунок 4 – Определение модуля упругости песка средней крупности, укрепленного портландцементом 6%
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Determination of the elastic modulus of medium-sized sand reinforced with Portland cement 6%
Source: compiled by the authors.

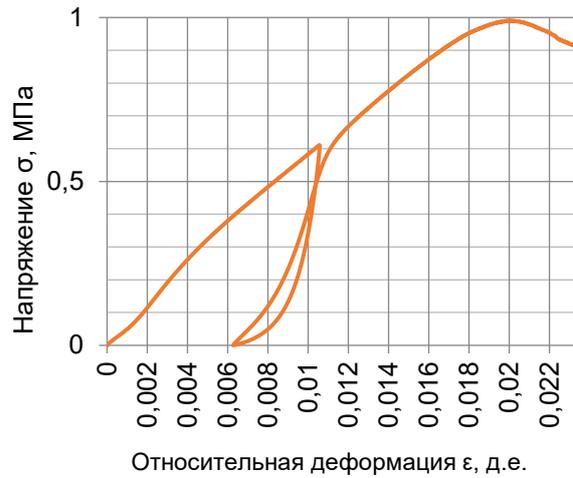


Рисунок 5 – Определение модуля упругости золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом 6%
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Determination of the elastic modulus of an ash-slag mixture reinforced with Portland cement 6%
Source: compiled by the authors.

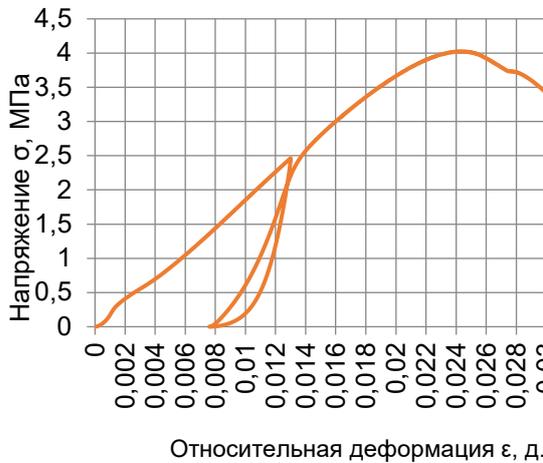


Рисунок 6 – Определение модуля упругости суглинка, укрепленного известью 6%
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Determination of the elastic modulus of the loam reinforced with lime 6%
Source: compiled by the authors.

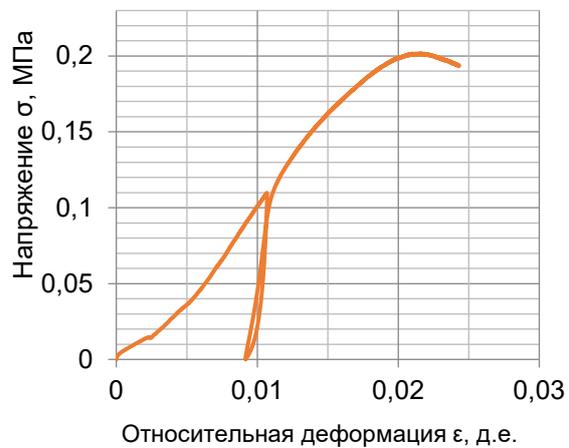


Рисунок 7 – Определение модуля упругости супеси, укрепленного известью 7%
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Determination of the elastic modulus of sandy loam reinforced with lime 7%
Source: compiled by the authors.

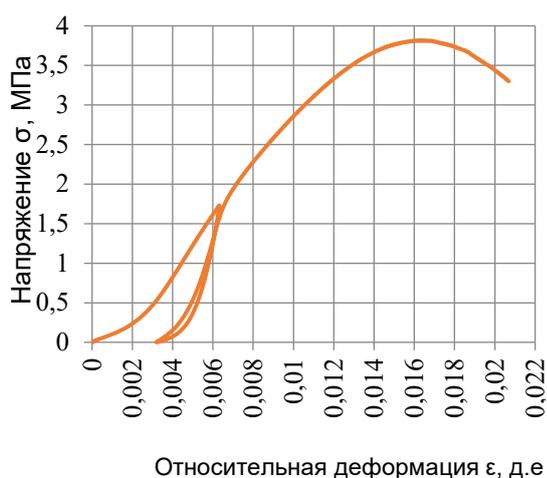


Рисунок 8 – Определение модуля упругости золошлаковой смеси, укрепленной известью 6%
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Determination of the elastic modulus of an ash-slag mixture reinforced with lime 6%
Source: compiled by the authors.



Рисунок 9 – Определение модуля упругости золошлаковой смеси, укрепленной известью 7%
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Determination of the elastic modulus of an ash-slag mixture reinforced with lime 7%
Source: compiled by the authors.

На основе полученных результатов (см. таблицу 4, рисунки 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) построен график зависимости модуля упругости от прочности на сжатие для грунтов, укрепленных портландцементом (рисунок 10).

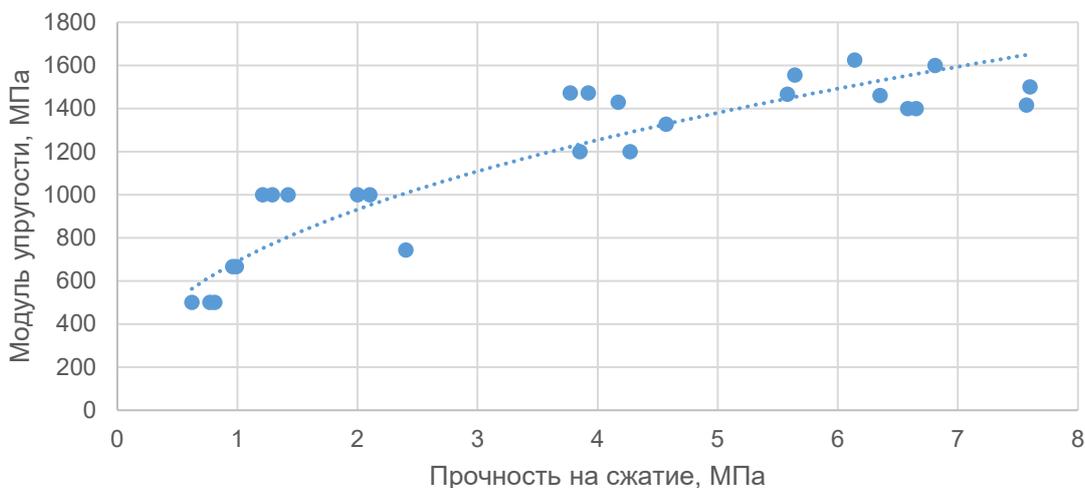


Рисунок 10 – График зависимости модуля упругости от прочности на сжатие грунтов, укрепленных портландцементом
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Graph of elastic modulus dependence on the compressive strength of soils reinforced with Portland cement
Source: compiled by the authors.

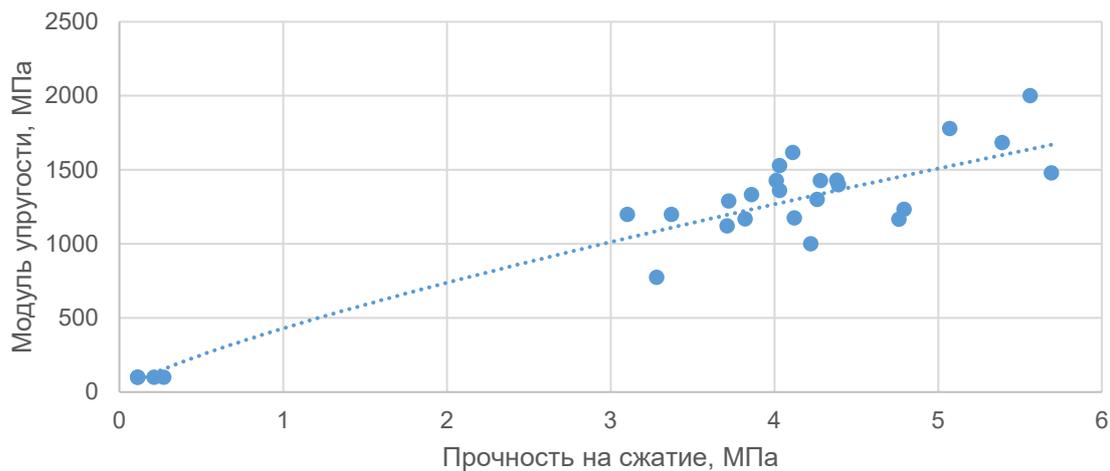


Рисунок 11 – График зависимости модуля упругости от прочности на сжатие грунтов, укрепленных известью
Источник: составлено авторами.

Figure 11 – Graph of elastic modulus dependence on the compressive strength of soils reinforced with lime
Source: compiled by the authors.

$$E = 691,57R_{сж}^{0,4292}, \quad (16)$$

где 691,57 и 4292 – параметры регрессии;

$R_{сж}$ – прочность на сжатие, МПа.

Коэффициент детерминации R^2 составил 0,85.

Зависимость модуля упругости от прочности на сжатие для грунтов, укрепленных известью, приведена на рисунке 11.

На основе полученных результатов построен график зависимости модуля упругости от прочности на сжатие грунтов, укрепленных портландцементом.

$$E = 429,7R_{сж}^{0,7805}, \quad (17)$$

где 429,7 и 0,7805 – параметры регрессии;

$R_{сж}$ – прочность на сжатие, МПа.

Коэффициент детерминации R^2 составил 0,96.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Так же как и прочность на сжатие, модуль упругости является важнейшей характеристикой грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, применяемых в дорожном строительстве.

В практике лабораторных испытаний укрепленных грунтов применяют одноосное, трехосное сжатие и штамповые испытания. При

этом методы лабораторных испытаний модуля упругости продолжительны во времени и трудоемки. Для снижения трудоемкости возможно использование математических формул, определяющих значение модуля упругости от различных параметров (прочности на сжатие, содержания вяжущего и т.д.).

На основе выполненных исследований получены эмпирические зависимости значений модуля упругости от значений прочности на сжатие грунтов, укрепленных портландцементом и известью.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Vakili A.H., Salimi M., Keskin İ., Jamalimoghadam M. A systematic review of strategies for identifying and stabilizing dispersive clay soils for sustainable infrastructure. *Soil and Tillage Research*. 2024. P. 239. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106036>.
2. Слободчикова Н.А., Лофлер М., Плюта К.В. Получение неорганического вяжущего на основе отходов промышленного производства // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость: научный журнал*. 2017. Том 7, № 2. С. 62–67.
3. Слободчикова Н.А., Лофлер М. Методики подбора составов грунтов, укрепленных известью, для дорожного строительства // *Известия вузов инвестиций. Строительство. Недвижимость*. 2018. Том 8, № 2. С.141–147.
4. Tanyıldızı M., Uz V.E., Gökalp İ. Utilization of waste materials in the stabilization of expansive pavement subgrade: An extensive review. *Construc-*

tion and Building Materials. 2023. P. 398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132435>.

5. Ahmad S., Ghazi M.S.A., Syed M., Al-Osta M.A. Utilization of fly ash with and without secondary additives for stabilizing expansive soils: A review. *Results in Engineering* 2024. P. 22. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102079>.

6. Laguna-Torres, C.A., González-López, J.R., Guerra-Cossío, M.Á., Guerrero-Baca, L.F., Chávez-Guerrero, L., Figueroa-Torres, M.Z., Zaldívar-Cadena, A.A. Effect of physical, chemical, and mineralogical properties for selection of soils stabilized by alkaline activation of a natural pozzolan for earth construction techniques such as compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*. – 2024. P. 419.

7. Safi W., Singh S. Efficient & effective improvement and stabilization of clay soil with waste materials. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Part 1. Pp. 947–955.

8. Mishra A., Dixit A., Singh A.K., Das S.K. Strength, deformation, and environmental impact assessment of cement stabilized mine overburden soil. *Journal of Cleaner Production*. 2024. P. 447. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141475>.

9. Espinosa A.B., López-Ausín V., Fiol F., Serano-López R., Ortega-López V. Analysis of the deformational behavior of a clayey foundation soil stabilized with ladle furnace slag (LFS) using a finite element software. *Materials Today: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.721>.

10. Balagosa J., Navea I.J., Lee M.J., Choo Y.W., Kim H.-S., Kim J.-M. Dynamic property growth of weathered granite soils stabilized with wood pellet fly ash based binders. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2024. P. 180. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108627>.

11. Zhang J., Wang S., Cui J., Chu H. Simultaneous determination of cement stabilized macadam's dynamic resilient modulus in compression and tension by bending beam test. *Case Studies in Construction Materials*. 2024. P. 20. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03008>.

12. Puppala A.J., Hoyos L.R., Potturi A.K. Resilient moduli response of moderately cement-treated reclaimed asphalt pavement aggregates. *J. Mater. Civ. Eng.*, 23 (2011), pp. 990–998

13. George A. M., Banerjee A., Puppala A.J., Saladhi M. Performance evaluation of geocell-reinforced reclaimed asphalt pavement (RAP) bases in flexible pavements. *Int. J. Pavement Eng.* 2021. 22 (2), Pp. 181–191.

14. Deng C., Jiang Y., Tian T. Resilient modulus and influencing factors of vertical vibration compacted cement-stabilized macadam. *Int. J. Pavement Eng.* 2021. 22 (11). pp. 1435–1445

15. Gajewska B., Kraszewski C., Rafalski L. Significance of cement-stabilized soil grain size distribution in determining the relationship between strength and resilient modulus. *Road. Mater. Pavement Des.* 2018. 19 (7). pp. 1692–1701

16. Mahmood A., Hassan R., Fouad A. An assessment of lime-cement stabilization on the elastic and resilient moduli of a clayey soil.

Int. J. Pavement Eng. 2021. 23 (6). P. 1–14. DOI: 10.1080/10298436.2021.1921772.

17. Fedrigo W., Núñez W.P., López M.A.C. A study on the resilient modulus of cement-treated mixtures of RAP and aggregates using indirect tensile, triaxial and flexural tests. *Constr. Build. Mater.* 2018. 171. pp. 161–169

18. Kavussi A., Modarres A. A model for resilient modulus determination of recycled mixes with bitumen emulsion and cement from ITS testing results. *Constr. Build. Mater.* 2010. 24. pp. 2252–2259.

19. Pericleous M.I., Metcalf J.B. Resilient modulus of cement-stabilized phosphogypsum. *J. Mater. Civ. Eng.* 1996, 8(1). pp. 7–10

20. Chindaprasirt P., Sriyortach A., Arngbunta A., Chetchotisak P., Jitsangiam P., Kampala A. Estimation of modulus of elasticity of compacted loess soil and lateritic-loess soil from laboratory plate bearing test. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. P. 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00837>

21. Виноградов А.Ю., Каширский В.И., Лободенко И.Ю., Зубова О.В., Виноградов И.А., Парфенов Е.А., Кучмин А.В., & Платонов А.П. Модуль деформации как основная характеристика деформационной способности грунтов при проектировании сооружений лесного комплекса // *Гидросфера. Опасные процессы и явления*. № 4(1). С. 52–67. <https://doi.org/10.34753/HS.2022.4.1.52>

22. Jabar M. Rasul, Michael P.N. Burrow, Gurmel S. Ghataora. Consideration of the deterioration of stabilised subgrade soils in analytical road pavement design. *Transportation Geotechnics*. 2016. Pp. 96–109. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.08.002>

23. Gerald A. Miller, Amy B. Cerato, Donald R. Snethen, Eric Holderby, Parnaz Boodagh. Empirical method for predicting time-dependent strength and resilient modulus of chemically treated soil. *Transportation Geotechnics*. 2021. P. 29. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100551>.

24. Лазарев Ю.Г., Слободчикова Н.А., Плюта К.В., Кузнецова И.О., Гасанов Д.Х., Дудурич Б.Б. Прогнозирование прочностных характеристик укрепленных золошлаковых смесей ТЭЦ неорганическими вяжущими материалами // *Путевой Навигатор*. 2024. № 59 (85). С.52–57.

25. Ермошин Н.А., Романчиков С.А., Аверьянов Д.А. Имитационное моделирование риска разрушения дорожных конструкций в межремонтный период // *Путевой Навигатор*. 2022. № 50 (76). С.30–42.

26. Башкарев А.А. Развитие транспортной инфраструктуры как одна из приоритетных задач многонационального государства // *Путевой Навигатор*. 2022. № 52 (78). С.52–61.

REFERENCES

1. Vakili A.H., Salimi M., Keskin İ., Jamalimoghadam M. A systematic review of strategies for identifying and stabilizing dispersive clay soils for sustainable infrastructure. *Soil and Tillage Research*. 2024. P. 239. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106036>.

2. Slobodchikova N.A., Lofler M., Pluta K.V. Obtaining an inorganic binder based on industrial waste.

Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost. 2017; Volume 7. No. 2: 62–67. (In Russ.)

3. Slobodchikova N.A., Lafleur M. Methods of selecting compositions of soils reinforced with lime for road construction. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost.* 2018. Volume 8. No. 2: 141–147. (In Russ.)

4. Tanyıldızı M., Uz V.E., Gökalp İ. Utilization of waste materials in the stabilization of expansive pavement subgrade: An extensive review. *Construction and Building Materials.* 2023: 398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132435>.

5. Ahmad S., Ghazi M.S.A., Syed M., Al-Osata M.A. Utilization of fly ash with and without secondary additives for stabilizing expansive soils: A review. *Results in Engineering* 2024: 22. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102079>.

6. Laguna-Torres, C.A., González-López, J.R., Guerra-Cossío, M.Á., Guerrero-Baca, L.F., Chávez-Guerrero, L., Figueroa-Torres, M.Z., Zaldívar-Cadena, A.A. Effect of physical, chemical, and mineralogical properties for selection of soils stabilized by alkaline activation of a natural pozzolan for earth construction techniques such as compressed earth blocks. *Construction and Building Materials.* 2024: 419.

7. Safi W., Singh S. Efficient & effective improvement and stabilization of clay soil with waste materials. *Materials Today: Proceedings.* 2022. Part 1: 947-955.

8. Mishra A., Dixit A., Singh A.K., Das S.K. Strength, deformation, and environmental impact assessment of cement stabilized mine overburden soil. *Journal of Cleaner Production.* 2024: 447. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141475>.

9. Espinosa A.B., López-Ausín V., Fiol F., Serano-López R., Ortega-López V. Analysis of the deformational behavior of a clayey foundation soil stabilized with ladle furnace slag (LFS) using a finite element software. *Materials Today: Proceedings.* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.721>.

10. Balagosa J., Navea I.J., Lee M.J., Choo Y.W., Kim H.-S., Kim J.-M. Dynamic property growth of weathered granite soils stabilized with wood pellet fly ash based binders. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering.* 2024: 180. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108627>.

11. Zhang J., Wang S., Cui J., Chu H. Simultaneous determination of cement stabilized macadam's dynamic resilient modulus in compression and tension by bending beam test. *Case Studies in Construction Materials.* 2024: 20. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03008>.

12. Puppala A.J., Hoyos L.R., Potturi A.K. Resilient moduli response of moderately cement-treated reclaimed asphalt pavement aggregates. *J. Mater. Civ. Eng.*, 23 (2011): 990-998.

13. George A. M., Banerjee A., Puppala A.J., Saladhi M. Performance evaluation of geocell-reinforced reclaimed asphalt pavement (RAP) bases in flexible pavements. *Int. J. Pavement Eng.* 2021; 22 (2): 181-191.

14. Deng C., Jiang Y., Tian T. Resilient modulus and influencing factors of vertical vibration compacted

cement-stabilized macadam. *Int. J. Pavement Eng.* 2021; 22 (11): 1435–1445.

15. Gajewska B., Kraszewski C., Rafalski L. Significance of cement-stabilized soil grain size distribution in determining the relationship between strength and resilient modulus. *Road. Mater. Pavement Des.* 2018; 19 (7): 1692–1701

16. Mahmood A., Hassan R., Fouad A. An assessment of lime-cement stabilization on the elastic and resilient moduli of a clayey soil. *Int. J. Pavement Eng.* 2021; 23 (6): 1–14. DOI: 10.1080/10298436.2021.1921772.

17. Fedrigo W., Núñez W.P., López M.A.C. A study on the resilient modulus of cement-treated mixtures of RAP and aggregates using indirect tensile, triaxial and flexural tests. *Constr. Build. Mater.* 2018; 171: 161–169

18. Kavussi A., Modarres A. A model for resilient modulus determination of recycled mixes with bitumen emulsion and cement from ITS testing results. *Constr. Build. Mater.* 2010; 24: 2252-2259.

19. Pericleous M.I., Metcalf J.B. Resilient modulus of cement-stabilized phosphogypsum. *J. Mater. Civ. Eng.* 1996; 8(1): 7–10

20. Chindaprasirt P., Sriyorch A., Arngbunta A., Chetchotisak P., Jitsangiam P., Kampala A. Estimation of modulus of elasticity of compacted loess soil and lateritic-loess soil from laboratory plate bearing test. *Case Studies in Construction Materials.* 2022: 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00837>

21. Vinogradov A.Yu., Kashirsky V.I., Lobodenko I.Yu., Zubova O.V., Vinogradov I.A., Parfenov E.A., Kuchmin A.V., & Platonov A.P. Deformation modulus as the main characteristic of the deformation ability of soils in the design of structures of the forest complex. *The hydrosphere. Dangerous processes and phenomena.* 2022; 4(1): 52-67. <https://doi.org/10.34753/HS.2022.4.1.52>. (In Russ.)

22. Jabar M. Rasul, Michael P.N. Burrow, Gurmehel S. Ghataora. Consideration of the deterioration of stabilised subgrade soils in analytical road pavement design. *Transportation Geotechnics.* 2016: 96–109. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.08.002>

23. Gerald A. Miller, Amy B. Cerato, Donald R. Snethen, Eric Holderby, Parnaz Boodagh. Empirical method for predicting time-dependent strength and resilient modulus of chemically treated soil. *Transportation Geotechnics.* 2021: 29. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100551>.

24. Lazarev Yu.G., Slobodchikova N.A., Plyuta K.V., Kuznetsova I.O., Gasanov D.Kh., Dudurich B.B., Forecasting the strength characteristics of reinforced ash and slag mixtures of thermal power plants with inorganic binders. *Travel Navigator.* 2024; 59 (85): 52–57. (in Russ.)

25. Ermoshin N.A., Romanchikov S.A., Averyanov D.A. Simulation modeling of the risk of destruction of road structures during the inter-repair period. *Travel Navigator.* 2022; 50 (76): 30–42. (in Russ.)

26. Bashkarev A. A. Development of transport infrastructure as one of the priority tasks of a multinational state. *Travel Navigator.* 2022; 52 (78): 52–61. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Слободчикова Н.А. Статистическая обработка данных, разработка регрессионных моделей, подготовка текста статьи.

Клюев С.В. Общая организация работы, подготовка текста статьи.

Плюта К.В. Определение физико-механических характеристик материалов и грунтов, статистическая обработка данных, подготовка текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Slobodchikova N.A. Statistical data processing, development of regression models, text preparation.

Klyuev S.V. General work organization, text writing.

Plyuta K.V. Determination of the physical and mechanical characteristics of materials and soils, statistical data processing, work with the text material.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Слободчикова Надежда Анатольевна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автомобильные дороги» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7845-2969>, **SPIN-code:** 5582-8750, e-mail: NSlobodchikova@rambler.ru

Клюев 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

Плюта Ксения Викторовна – эксперт ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-7028-7427>, **SPIN-code:** 4769-9063, e-mail: kv_plyuta@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Slobodchikova Nadezhda A. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Highway Department, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov str., Irkutsk, 664074), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7845-2969>, **SPIN-code:** 5582-8750, e-mail: NSlobodchikova@rambler.ru

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

Plyuta Kseniya V. – Expert of the Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov str., Irkutsk, 664074), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-7028-7427>, **SPIN-code:** 4769-9063, e-mail: kv_plyuta@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются рукописи по направлениям: Транспорт. Транспортные и технологические машины; Строительство. Строительные материалы и изделия; Редакция принимает к рассмотрению **оригинальные научные статьи** объемом 8–10 стр. машинописного текста через 1 интервал, 5–8 рисунков и (или) таблиц, 20–40 ссылок; **обзорные статьи** – (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – от 10 и более страниц, от 5 и более рисунков, до 80 ссылок.

Статья должна быть неопубликованной ранее в других изданиях, написана в контексте современной литературы, обладать новизной и соответствовать профилю журнала. Автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирования и ссылок на официальные документы и другие источники. Редакция принимает на себя обязательство ограничить круг лиц, имеющих доступ к присланной в редакцию рукописи, сотрудниками редакции, членами редколлегии, а также рецензентами данной работы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий статья будет **ретрагирована** (отозвана из печати).

Следует уделить особенное внимание качеству перевода. Недопустимо при переводе пользоваться машинами-переводчиками. Перевод должен быть выполнен профессиональными переводчиками, а лучше – носителем английского языка. Необходимо учесть, что законодательство охраняет права переводчиков авторским правом наравне с правами авторов оригинальных произведений. Перевод текста – творческий процесс, производный объект авторского права, т.е. переводчик – соавтор нового произведения.

1 УДК. На первой странице, слева в верхнем углу без отступа, указываются индекс по универсальной десятичной классификации (УДК) (размер шрифта 10 пт).

2. Заглавие статьи. Заголовок (максимально 10-12 слов) должен быть информативным, лаконичным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы. Приводится на русском и английском языках, по центру полужирным шрифтом размером 12 пт. прописными буквами.

3. Фамилии авторов. Количество авторов не должно превышать четырех. Для англоязычных метаданных важно соблюдать вариант написания сведений об авторе в последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия (Anna V. Ivanova). При латинизации фамилии можно воспользоваться системой 1 BSI – Британский Институт Стандартов (British Standards Institution) транслитерации на сайте <https://translit.ru>, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи обычным шрифтом (размер шрифта 12 пт.).

4. Аннотация. Аннотация включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе научная статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению, объем от 200 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Приводится на русском и английском языках. Начинается словом «Аннотация» с прописной буквы (шрифт полужирный, курсив, 10 пт); точка; затем с прописной буквы текст (курсив, 10 пт).

5. Ключевые слова служат ориентиром для читателя и используются для поиска статей в электронных базах, поэтому должны отражать дисциплину (область науки, в рамках которой написана статья), тему, цель и объект исследования. Рекомендуемое количество ключевых слов – 10–12, количество слов внутри ключевой фразы – не более трех. Размещаются после аннотации, на русском и английском языках.

6. Благодарности. Раздел включен в требования всеми крупными издательствами. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

7. Основные положения. Отражают ключевые результаты исследования, основное содержание статьи, изложенные тезисно и оформленные в виде 3–5 пунктов маркированного списка.

8. Основной текст статьи излагается на русском или английском языках, в электронном и бумажном виде (шрифт «Arial» (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный), в следующей последовательности:

Введение (1–4 стр.) В этом разделе описываются общая тема исследования, цели и задачи планируемой работы, теоретическая и практическая значимость, приводятся наиболее известные и авторитетные публикации по изучаемой теме, обозначаются нерешенные проблемы. Данный раздел должен содержать обоснование необходимости и актуальности исследования. Информация во Введении должна быть организована по принципу «от общего к частному».

Подразделы введения представлены на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Методы и материалы (от 2 стр. и более) В этом разделе в деталях описываются методы, которые использовались для получения результатов. Обычно сначала дается общая схема экспериментов/исследования, затем они представляются настолько подробно и с таким количеством деталей, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, организационных или структурных диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. Если было получено много похожих зависимостей, представляемых в виде графиков, то приведите только один типичный график, а данные об имеющихся количественных отличиях между ними, представьте в таблице.

Способы представления результатов представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Обсуждение и заключение. Раздел содержит интерпретацию полученных результатов исследования, предположения о полученных фактах, сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

9. Список источников (References)

В список источников включаются только те источники, которые автор использовал при подготовке статьи. Оформление библиографического списка регламентируется ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 20–40 источников, но не более 50. Из них за последние 3 года – рекомендуется указать не менее 20, иностранных – не менее 15. Важно правильно оформить ссылку на источник.

Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет.

Источники указываются в конце статьи в алфавитном порядке либо в порядке упоминания в тексте статьи.

Приводится на русском языке и в латинице по образцу, представленному на сайте журнала.

Аффилиация. Фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, ORCID i, Scopus Author ID, ResearcherID, далее указать все места работы, должность, название организации, служебный адрес, электронная почта, телефон, e-mail. Приводится на русском и английском языках.

Технические требования к оформлению.

Формат А4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом употреблении должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подрисунковой 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 – подрисунковые подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть яркими 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.