

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



научный рецензируемый журнал

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

“Vestnik SibADI”

Том 22, № 3. 2025
Vol.22, No. 3. 2025

наука
science

creation
творчество

образование
education

innovations
инновации

technology
технологии

tradition
традиции

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

ВЕСТНИК СИБАДИ

THE RUSSIAN AUTOMOBILE AND HIGHWAY INDUSTRY JOURNAL

DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-3

TOM 22, № 3. 2025

VOL. 22, No. 3. 2025



Учредитель и издатель:

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

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ

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

Издается с 2004 года

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

Founder and Publisher:

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

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

EDITORIAL POSTAL ADDRESS

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

Published since 2004
by 6 issues per year

Subscription index is 66000
in the Ural-Press catalog

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

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

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

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

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

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

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

Журнал индексируется и архивируется:

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

Журнал является членом:

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), CrossRef

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Подписано в печать 16.06.2025. Дата выхода в свет 30.06.2025. Формат 60×84 1/8 Гарнитура Arial. Печать оперативная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 27,25 Тираж 500 экз. Заказ 500 экз. Свободная цена. Отпечатано в типографии Издательско-полиграфического комплекса ФГБОУ ВО «СибАДИ», Россия, г. Омск, проспект Мира, д. 5.

Контент доступен под лицензией CC BY.

Поступившие в редакцию материалы не возвращаются.

Гонорары не выплачиваются.

Все статьи публикуются бесплатно.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

The journal is the periodical scientific edition registered as mass media. Certificate of registration media is PI NUMBER FS – 77-73591 dated on 31.08.2018 and is issued by the Federal Service of Supervision in the sphere of information technologies and mass communications (Roskomnadzor). The peer-reviewed scientific The Russian Automobile and Highway Industry Journal is included in the list of leading periodicals and recommended by the Higher Attestation Commission by a decision of the Presidium of the Higher Attestation Commission on 25.02.2011. In accordance with the order of The Ministry of Education and Science of Russia dated by December 28, 2018, No. 90 is included in the new list. Since 2017, all issues and articles of the journal have been assigned by Digital Object Identifiers (DOIs), the data of which are available in electronic version on the vestnik.sibadi.org site. The Editorial Office send submitted materials to reviewing (double-blind reviewing) with the aim of the qualified peer-reviewing and of the manuscripts' verification for plagiarism.

This journal provides direct open access to its content based on the following principle: free open access to research results enhances global knowledge sharing.

The Open Access Policy meets the definition of the Budapest Open Access Initiative (BOAI) and means that articles are available for public access on the Internet, allowing all users to read, download, copy, distribute, print, search or link to the full text of these articles, scan them for indexing, transmit them as data for software or use them for any other lawful purpose without financial, legal or technical barriers, except those that are inseparable from access to the Internet itself. For more information please refer to the Budapest Declaration (<https://www.budapestopenaccessinitiative.org/>).

The journal is indexed and archived:

in Russian Index of Scientific Citations;

Dimensions;

EBSCO;

Ulrichsweb Global Serials Directory;

Google scholar

The European Library;

SOCIONET;

VINITI RAS;

Cyberlenika;

The Directory of Open Access Journals (DOAJ SEAL);

CNKI scholar.

The Journal is a member of

the Association of Scientific Editors and Publishers (ASEP), CrossRef

The Journal's materials are available under the Creative Commons 4.0 License



Signed in print on 16.06.2025. Publication date is 30.09.2025. Format is 60 × 84 1/4.

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

Content is available under license CC BY.

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

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор Жигадло Александр Петрович, д-р пед. наук, канд. техн. наук, проф., член-кор. АВН, ректор Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 57202984669, **ORCID ID** 0000-0002-8883-3167

Транспортное, горное и строительное машиностроение

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

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

Транспорт

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

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

Строительство и архитектура

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

Буриянов 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL TEAM

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

Transport, mining and mechanical engineering

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

Scopus ID 57170706600, **Researcher ID** H-7490-2017,
ORCID 0000-0003-2763-0515

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

Transport

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

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

Construction and architecture

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

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ
МАШИНОСТРОЕНИЕ***В.Д. Габидулин, В.Н. Добромиров***ВЫЯВЛЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПО АКУСТИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ 332***О.Ю. Казаков, А.Г. Савельев***ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УПРУГОДЕФОРМИРУЕМОЙ ЛЕНТЫ
В КОМБИНИРОВАННОМ УПЛОТНЯЮЩЕМ ОБОРУДОВАНИИ
ДЛЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ..... 346***И.В. Лесковец, А.А. Грац, В.Д. Рогожин***ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ГИДРОПРИВОДА АЭРОДРОМНОЙ ТЕХНИКИ 356***А.Б. Пономарев, Д.А. Паскачева, Д.С. Кораблев***ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН
ДЛЯ УСТРОЙСТВА СВАЙНОГО ОСНОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА 368***Р.Ф. Салихов, В.Н. Кузнецова, И.С. Кузнецов***ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОДНОКОВШОВЫХ
ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЭКСКАВАТОРОВ 386***И.С. Тюремнов***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРАЦИОННОГО КАТКА
НА ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ «РАМА-ВАЛЕЦ-ГРУНТ»..... 396****РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ***М.В. Грязнов, П.П. Журавский, Е.А. Тимофеев***ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА СОХРАННОСТЬ ЖИВОЙ ПТИЦЫ
ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ..... 418***А.И. Федотов, О.С. Яньков, А.В. Камнев***ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ДАВЛЕНИЮ ВОЗДУХА В ШИНАХ АВТОМОБИЛЕЙ
ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА РОЛИКОВЫХ СТЕНДАХ..... 434****РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА***В.С. Лесовик, Д.А. Топылин, А.Н. Ряпухин***РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ,
МОДИФИЦИРОВАННЫХ МИНЕРАЛЬНЫМИ И ПЛАСТИФИЦИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ 448***В.В. Сиротюк***НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И СВОЙСТВ ЗОЛОШЛАКА И ЗОЛЫ-УНОСА
ОТ СЖИГАНИЯ ЭКИБАСТУЗСКИХ УГЛЕЙ 460***В.И. Сологеев***ВЛИЯНИЕ КЛИМАТА НА ПРОЦЕССЫ ПОДТОПЛЕНИЯ
И ДРЕНИРОВАНИЯ В ГОРОДСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ 478***Е.В. Ткач, А.Ф. Бурьянов, Ю.С. Филимонова, Г.А. Шусев***МОДИФИЦИРОВАННЫЙ БЕТОН НА ОСНОВЕ АКТИВИРОВАННОГО МЕТАКАОЛИНА
С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ
ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ ТОННЕЛЕЙ 488**

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Vladimir D. Gabidulin, Viktor N. Dobromirov

**DETECTING FAULTS IN ELECTRONIC INTERNAL COMBUSTION ENGINE CONTROL SYSTEMS
BY ACOUSTIC PARAMETERS 333**

Oleg Y. Kazakov, Andrey G. Savelyev

**JUSTIFICATION OF THE USE OF ELASTICALLY DEFORMABLE BELT
IN COMBINED COMPACTION EQUIPMENT FOR ASPHALT CONCRETE MIXTURES..... 347**

Igor' V. Leskovets, Alexandr A. Grats, Vladimir D. Rogozhyn

DIAGNOSTICS OF HYDRAULIC DRIVE OF AIRFIELD EQUIPMENT..... 357

A.B. Ponomarev, D.A. Paskacheva, D.S. Korablev

**PECULIARITIES OF TECHNOLOGICAL IMPACT OF CONSTRUCTION MACHINES USED
FOR PILE FOUNDATION INSTALLATION IN ST. PETERSBURG 369**

Rinat F. Salikhov, Viktoria N. Kuznetsova, Ilya S. Kuznetsov

RESEARCH INTO OPERATION EFFICIENCY OF SINGLE-BUCKET HYDRAULIC EXCAVATORS 387

Ivan S. Tyuremnov

**INVESTIGATION INTO THE INFLUENCE OF VIBRATORY ROLLER DYNAMIC
CHARACTERISTICS ON INTERACTION FEATURES
OF FRAME-DRUM-SOIL SYSTEM ELEMENTS 397**

PART II. TRANSPORT

Mikhail V. Gryaznov, Pavel P. Zhuravskiy, Egor A. Timofeev

**INFLUENCE OF AMBIENT TEMPERATURE ON THE SAFETY
OF LIVE POULTRY DURING AUTOMOBILE TRANSPORTATION 419**

Alexandr I. Fedotov, Oleg S. Yankov, Aleksey V. Kamnev

**JUSTIFICATION OF REQUIREMENTS FOR AIR PRESSURE IN CAR TIRES DURING TESTS
ON ROLLER STANDS 435**

PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Valery S. Lesovik, Daniil A. Tolypin, Alexander N. Ryapukhin

**RHEOLOGICAL PROPERTIES OF CEMENT SYSTEMS MODIFIED WITH MINERAL
AND PLASTICIZING ADDITIVES..... 449**

Viktor V. Sirotyuk

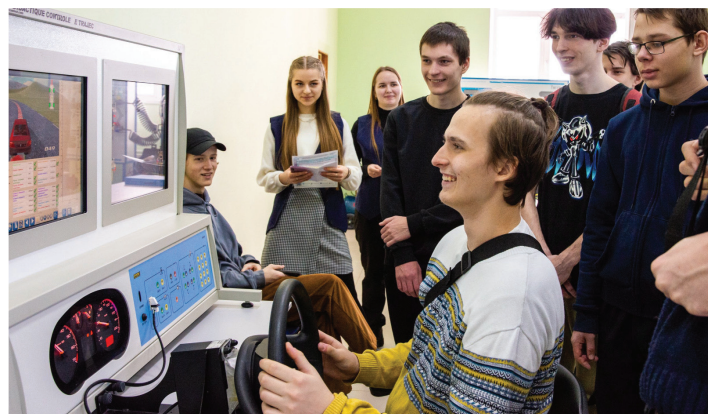
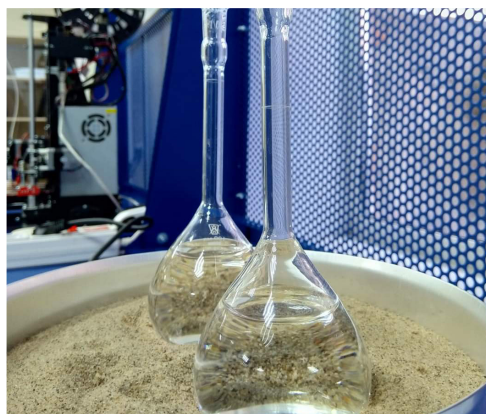
**CLIMATE INFLUENCE ON FLOODING AND DRAINAGE PROCESSES
IN URBAN CONSTRUCTION..... 461**

Valery I. Sologaeв

**INFLUENCE OF CLIMATE ON UNDERFLOODING
AND DRAINAGE PROCESSES IN URBAN CONSTRUCTION..... 479**

Evgeniya V. Tkach, Alexander F. Buryanov, Yulia S. Filimonova, Georgy A. Shusev

**MODIFIED CONCRETE BASED ON ACTIVATED METAKAOLIN
FOR TUNNEL STRUCTURES WITH INCREASED PERFORMANCE PROPERTIES 489**



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



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

Научная статья

УДК 621.4

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-332-345>

EDN: VPQLKJ



ВЫЯВЛЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПО АКУСТИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

В.Д. Габидулин ✉, **В.Н. Добромиров***Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия**✉ ответственный автор
toymail_2014@mail.ru*

АННОТАЦИЯ

Введение. Процесс обеспечения работоспособности транспортно-технологических машин (ТТМ) предполагает проведение регулярного контроля их технического состояния путем диагностирования различных агрегатов, узлов и систем, в том числе электронных систем контроля и управления функционированием двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Однако в реальной эксплуатации могут возникать ситуации, в которых проведение оперативного диагностирования силовых установок является проблематичным. К таким ситуациям можно отнести, например, работу ТТМ в труднодоступных слабо освоенных регионах при отсутствии близкорасположенных центров технического обслуживания.

Материалы и методы. Одним из ключевых направлений развития современных силовых установок является внедрение автоматизированных систем управления и контроля, основанных на использовании электронных и микропроцессорных технологий. Такие системы значительно повышают эффективность работы двигателя, однако ввиду их сложности и конструктивных особенностей увеличивается количество потенциально возможных неисправностей ДВС, что требует разработки и реализации специальных подходов к их диагностированию и обслуживанию. Одним из решений проблемы оперативного диагностирования электронных систем управления ДВС является оценка работоспособного состояния двигателя по издаваемому им акустическому шуму, регистрируемому при помощи портативного прибора, обрабатываемому и анализируемому с использованием специализированного программного обеспечения. Преимущество метода состоит в простоте и возможности проведения диагностирования в полевых условиях, непосредственно в местах применения машин. Целью данного исследования являлась экспериментальная оценка принципиальной возможности идентификации неисправностей электронных систем управления ДВС путем сравнения акустических характеристик при нормальном режиме функционирования и в условиях ограниченной функциональности, вызванной отказами в электронных системах управления его работой. В качестве объекта исследования использован бензиновый двигатель, являющийся элементом обучающего стенда фирмы GNFA, предназначенного для изучения электронных систем управления работой ДВС. В ходе исследования на стенде задавались различные возможные неисправности электронных систем управления работой двигателя, вызывающие переход его работы в режим ограниченной функциональности, и при этом замерялись и анализировались шумовые параметры в сравнении с параметрами исправного ДВС.

Результаты. В работе проанализированы различного рода неисправности электронных систем управления ДВС, из них выделены такие, при которых двигатель, сохраняя свою работоспособность, переходит в режим ограниченной функциональности, т.е. работает с перебоями, со снижением мощности, увеличением расхода топлива и т.п. Проведен сравнительный анализ акустических параметров работы исправного двигателя в условиях наличия таких неисправностей, с последующим спектральным разложением для обоснования правил их идентификации.

Обсуждение и заключение. Результаты проведенного исследования могут служить основой для разработки метода оперативного акустического диагностирования электронных систем управления работой силовых установок с использованием мобильного портативного оборудования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: двигатель внутреннего сгорания, электронные системы управления и контроля, акустическое диагностирование, звуковое излучение, метод быстрого преобразования Фурье, спектральный анализ

© Габидулин В.Д., Добромиров В.Н., 2025

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Статья поступила в редакцию 23.03.2025; одобрена после рецензирования 15.04.2025; принята к публикации 16.06.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Габидулин В.Д., Добромиров В.Н. Выявление неисправностей электронных систем управления двигателем внутреннего сгорания по акустическим параметрам // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 3. С. 332-345. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-332-345>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-332-345>

EDN: VPQLKJ

DETECTING FAULTS IN ELECTRONIC INTERNAL COMBUSTION ENGINE CONTROL SYSTEMS BY ACOUSTIC PARAMETERS

Vladimir D. Gabidulin ✉, Viktor N. Dobromirov

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia

✉ corresponding author
moymail_2014@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The process of ensuring the operability of transport and technological machines (TTM) presupposes regular checking of its technical condition by diagnosing various units, assemblies and systems, including electronic systems for monitoring and controlling the functioning of the internal combustion engine (ICE). However, in real operation, there may arise situations in which conducting operational diagnostics of power plants is problematic. Such situations contain, for example, the work of transport and technological machines in hard-to-reach poorly developed regions with the absence of maintenance centers nearby.

Materials and methods. One of the key evolution areas of modern power plants is the introduction of automated control and monitoring systems based on the use of electronic and microprocessor technologies. Such systems significantly increase the efficiency of the engine, however, due to their complexity and design features, the number of potentially possible internal combustion engine malfunctions increases, which requires the development and implementation of special approaches to their diagnosis and maintenance. One of the solutions to the problem of electronic control systems' operational diagnostics of an internal combustion engine is to assess the operational condition by the acoustic noise it produces, recorded with the use of a portable device, processed and analyzed by specialized software. The advantage of this method is in its simplicity and the possibility of conducting diagnostics in the field, directly at places where the machines are being used. The purpose of this study was an experimental assessment of the fundamental possibility of identifying malfunctions of electronic control systems of an internal combustion engine by comparing acoustic characteristics in normal operation and in conditions of limited functionality caused by failures in electronic control systems of its operation. A gasoline engine was used as an object of research, which is an element of the GNFA training stand designed to study electronic control systems for internal combustion engines. During the study, various possible malfunctions of the electronic control systems of the engine were set at the stand, causing its operation to switch to the mode of limited functionality, and noise parameters were measured and analyzed in comparison with the parameters of a serviceable internal combustion engine.

Results. Various kinds of malfunctions of the electronic control systems of the internal combustion engine have been analyzed and some have been identified in which the engine switches to a mode of limited functionality while maintaining its operability, i.e. it operates intermittently, with reduced power, increased fuel consumption, etc. A comparative analysis of the acoustic parameters of a serviceable engine in the presence of such malfunctions, followed by spectral decomposition to substantiate the rules for their identification.

Discussions and conclusions. The results of the conducted research can serve as a basis for the development of the method for rapid acoustic diagnostics of electronic control systems for power plants with the use of mobile portable equipment.

© Gabidulin V.D., Dobromirov V.N., 2025



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

KEYWORDS: *internal combustion engine, electronic control and monitoring systems, acoustic diagnostics, sound radiation, spectral analysis, fast Fourier transform method, spectral analysis*

The article was submitted: March 23, 2025; **approved after reviewing:** April 15, 2025; **accepted for publication:** June 16, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Gabidulin V.D., Dobromirov V.N. Detecting faults in electronic combustion engine control systems by acoustic parameters. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (3): 332-345. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-332-345>

ВВЕДЕНИЕ

Активное развитие в современной России дорожного строительства, создание транспортной инфраструктуры в труднодоступных, в т.ч. в полярных регионах, ужесточение государственной политики в сфере безопасного содержания дорожных сетей выдвигает актуальные требования в части обеспечения строительных работ, дорожного строительства и содержания улично-дорожных сетей современными наземными транспортно-технологическими машинами (НТТМ). Одним из активно развивающихся направлений конструктивного совершенствования НТТМ является автоматизация процессов управления и контроля их технического состояния, основанная на широком использовании электронных микропроцессорных систем. В связи с этим к традиционным задачам и методам поддержания в эксплуатации работоспособного состояния транспортных и транспортно-технологических машин добавляются задачи контроля функционирования и обеспечения работоспособности таких электронных систем. В полной мере это относится к силовым установкам НТТМ, обеспечивающим функционирование как ходового, так и рабочего оборудования. Одним из этапов реализации такой задачи является диагностирование ДВС. Диагностирование ДВС в современных условиях реализуется различными методами, но приоритет отдается методам неразрушающего контроля [1]. В сложных условиях эксплуатации ТТМ [2] при значительной удаленности от пунктов размещения стационарных средств контроля, технического обслуживания и ремонта, реализация существующих методов диагностирования современных двигателей, оснащенных электронными системами управления, оказывается проблематичной, а потребность в их применении существенно возрастает. В связи с этим отечественными специалистами [3, 4], а также специалистами за рубежом [5] активно ведется работа по совершенствованию мето-

дов диагностирования современных силовых установок НТТМ. Аналогичные исследования проводятся и в отношении силовых установок авиа- и водного транспорта [6]. Реализуемые сегодня методы ориентированы на анализ показаний встроенных датчиков, однако их восприимчивость к факторам окружающей среды (пыль, влага и т.п.) и связанная с этим достаточно высокая вероятность отказов ограничивают эффективность таких методов. Стоит также отметить, что далеко не во всех случаях для контроля узлов и систем ТТМ представляется конструктивная возможность установки датчиков контроля диагностических параметров, что ограничивает возможности безразборной диагностики, основанной на изложенном подходе. Диагностирование на основе контроля структурных параметров технического состояния машин требует выполнения большего объема вспомогательных разборочно-сборочных работ, требующих значительных временных и экономических ресурсов, что непозволительно с точки зрения проведения оперативного технического контроля. Решение данных проблем видится в более широком внедрении методов акустического диагностирования ДВС, относящихся к неразрушающим методам контроля [7, 8]. В настоящее время активно исследуется пассивный акустический метод, основанный на эффекте акустической эмиссии [9]. В научной литературе представлены работы по оптимизации обработки акустических сигналов [10], созданию диагностических устройств, оценке состояния ДВС с помощью оптико-акустических приборов [11]. Активно ведутся исследования по обнаружению неисправностей систем питания двигателя с использованием датчиков акустических импульсов [12], а также по акустическому контролю состояния поверхностей трения в сопряжениях ДВС [13]. Значительный интерес к акустическому диагностированию демонстрируется зарубежными исследованиями [14]. Иностранные специалисты изучают такие вопросы, как акустическая оценка состояния топливного насоса высокого

давления [15], системы впрыска топлива [16], а также процесса его сгорания [17]. Необходимо отметить успешность практического внедрения методов акустического контроля на железнодорожном транспорте, в частности при диагностировании силовых трансформаторов железных дорог [18, 19], в авиационной отрасли как отечественными специалистами [20, 21], так и зарубежными [22, 23]. Таким образом, исходя из анализа научных исследований, можно сделать вывод о повышенном интересе к изучению возможностей акустического диагностирования, что свидетельствует о его актуальности. Отображенные в современной научно-технической литературе результаты исследований затрагивают в основном акустическую оценку механических систем двигателя – износ трущихся поверхностей цилиндрико-поршневой группы, кривошипно-шатунного механизма, системы впрыска топлива и т.п. Целенаправленных исследований по влиянию на акустический шум ДВС отказов его электронных систем не выявлено. В настоящее время основным методом диагностирования электронных систем считается метод сканирования, основанный на извлечении информации из бортового компьютера транспортного средства. Однако у данного метода имеется ряд недостатков [24], основным из которых является его зависимость от возможностей электронного блока управления (ЭБУ), наличия и фактического состояния встроенных датчиков. Функцией сканирования является обмен данными с ЭБУ, поэтому невозможно получить больше первичной информации, чем содержится в электронном блоке. Переход датчиков в неработоспособное состояние от воздействия внешних физических факторов вызывает накопление в ЭБУ недостоверной информации. Зачастую для диагностирования электронных систем НТТМ требуется использование фирменных сканеров, доступность которых в специфических условиях эксплуатации ограничивается условиями производителя по организации фирменного сервисного обслуживания. В таких случаях возникает необходимость проведения ручного поиска и идентификации ошибки, что требует особых навыков и высокой квалификации персонала, выполняющего сканирование. Метод акустического диагностирования позволяет обойти указанные ограничения.

Для реализации замысла исследования необходимо выявить неисправности в элек-

тронных системах двигателя, нарушающие стабильность его работы при сохранении работоспособности в режиме ограниченной функциональности, не обеспечивающем получения нормированных выходных параметров. По выявленному перечню неисправностей необходимо зафиксировать и оценить акустический шум ДВС при нестабильном режиме работы, произвести его всесторонний анализ и установить идентификационные акустические признаки неисправности. В данной статье изложена методика проведения такого эксперимента, а также представлены его результаты.

Цель исследования

Определить и сопоставить акустические параметры исправного двигателя и двигателя с ограниченным режимом функциональности из-за неисправностей электронных систем, влияющих на его работу. Выявить идентификационные акустические признаки таких неисправностей.

Задачи эксперимента

Выявить возможные неисправности электронных систем управления ДВС, переводящие его работу в режим ограниченной функциональности. Оценить их влияние на акустический шум двигателя.

Обосновать, разработать и провести апробацию инструментального и программного обеспечения эксперимента.

Установить на основе спектрального анализа зависимости частоты и уровня шума звуковых параметров от технического состояния двигателя.

Выявить идентификационные акустические признаки исследованных неисправностей.

Важность проведенного исследования

Проведенное исследование является полезным и важным опытом для практического применения метода акустического диагностирования при оценке технического состояния электронных систем управления работой ДВС.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования выступает бензиновый двигатель внутреннего сгорания TU5JP4 производства PSA, входящий в состав комплектации обучающего стенда фирмы GNFA для исследования электронных систем управления работой ДВС. Стенд представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Стендовый бензиновый двигатель внутреннего сгорания TU5JP4 производства PSA
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The TU5JP4 bench-type gasoline internal combustion engine, manufactured by PSA.
Source: compiled by the author.

Стенд обладает возможностью задавать различные неисправности электронных систем управления работой двигателя путем «разрыва» электрических цепей в блоке предохранителей (рисунок 2).

На рисунке 3 представлена электрическая схема систем управления работой двигателя, отдельные цепи которой можно разорвать, тем самым задав неисправность той или иной электронной системы.

Для анализа звуковых сигналов, издаваемых двигателем, проводилось преобразование аудиосигнала из временной области в частотную. Для выполнения этой задачи использовался программный комплекс, работа которого основана на методе быстрого преобразования Фурье (БПФ) [25], который активно применяется для решения задач акустического диагностирования [26]. Для анализа исходных данных был использован математический метод обработки звуковых сигналов:

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-j \frac{2\pi kn}{N}}. \quad (1)$$

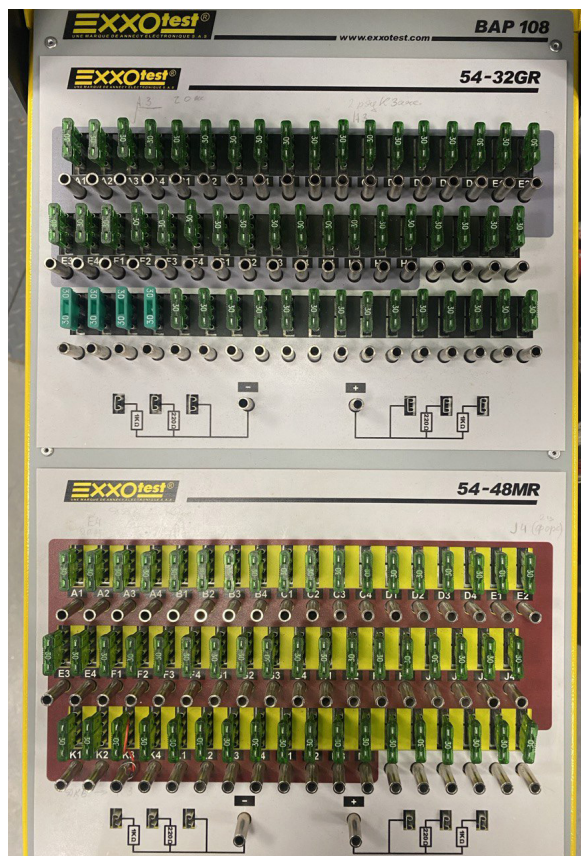


Рисунок 2 – Блок предохранителей
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Fuse box
Source: compiled by the author.

где $X(n)$ – измеренные значения сигнала в дискретных временных точках;

N – количество значений сигнала, измеренных за период;

$x(k)$ – комплексные амплитуды синусоидальных сигналов, составляющих исходные сигналы;

k – частота k -й синусоиды, измеренная в колебаниях за период;

$n = 0, \dots, N-1$.

Параметром сравнения будет уровень звука (дБ), отложенный по оси ординат на определенных частотах. Инструментальное обеспечение эксперимента – микрофон и звукозаписывающее устройство.

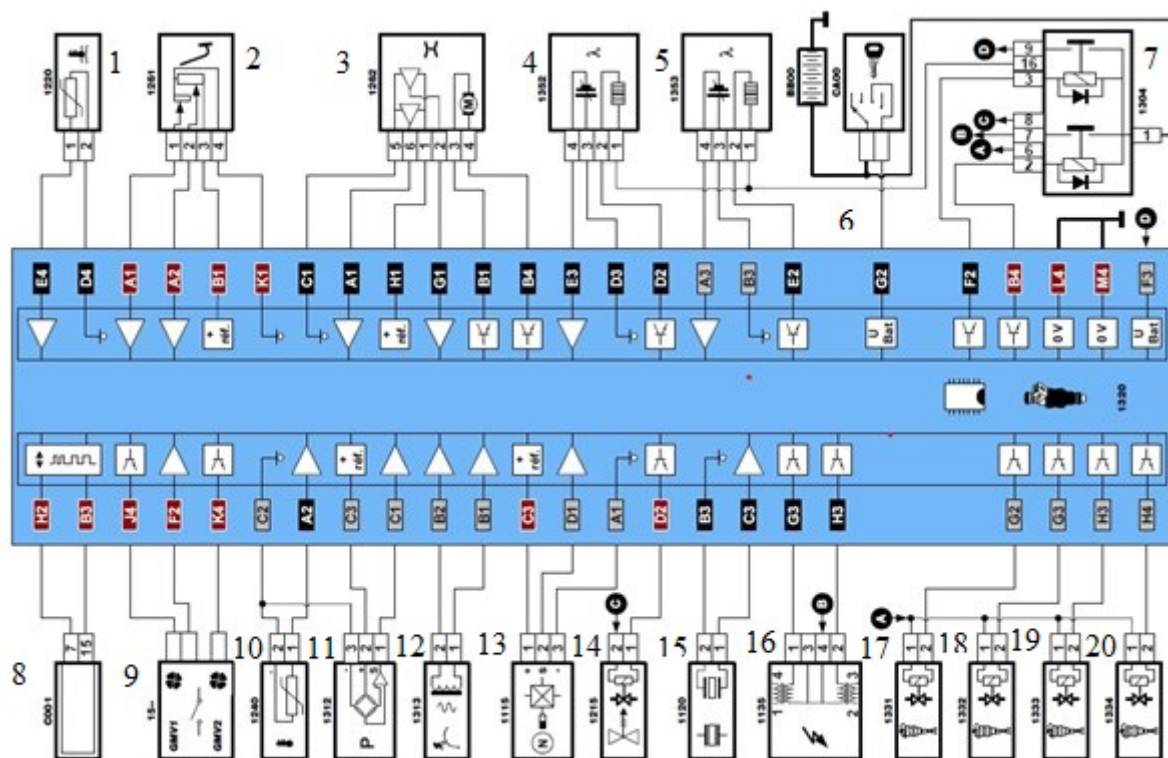


Рисунок 3 – Электрическая схема систем управления работой двигателя:
 1 – датчик температуры охлаждающей жидкости; 2 – датчик положения педали акселератора;
 3 – датчик положения дроссельной заслонки; 4 – датчик кислорода (верхний);
 5 – датчик кислорода (нижний); 6 – замок зажигания; 7 – двойное реле контроля двигателя;
 8 – диагностический разъем; 9 – электровентиляторы; 10 – датчик температуры и давления масла;
 11 – датчик абсолютного давления воздуха; 12 – датчик частоты вращения коленчатого вала;
 13 – датчик фазы; 14 – электроклапан продувки адсорбера; 15 – датчик детонации; 16 – блок катушки зажигания;
 17 – форсунка № 1; 18 – форсунка № 2; 19 – форсунка № 3; 20 – форсунка № 4
 Источник: Интернет-ресурс¹.

Figure 3 – Electrical scheme of engine control systems:
 1 – Coolant fluid temperature sensor, 2 – Accelerator pedal position sensor,
 3 – Throttle position sensor, 4 – Upper oxygen sensor,
 5 – Lower oxygen sensor, 6 – Ignition switch, 7 – Dual engine monitoring relay,
 8 – Diagnostic connector, 9 – Electric fans, 10 – Oil temperature and pressure sensor,
 11 – Absolute air pressure sensor, 12 – Crankshaft speed sensor,
 13 – Phase sensor, 14 – Adsorber purge solenoid valve, 15 – Knock sensor, 16 – Ignition coil unit,
 17 – Injector №1, 18 – Injector №2, 19 – Injector №3, 20 – Injector №4.
 Source: Internet resource¹.

¹ «Общее устройство и возможности учебного стенда». Учебный портал ФГБОУ ВО «СибАДИ». Дата обращения: 01.03.2025. Доступно: <https://portal.sibadi.org/course/view.php?id=701#section-0>

Алгоритм проведения исследования

Блок-схема алгоритма проведения исследования представлена на рисунке 4.

Этапы экспериментальных исследований

Первый этап – классификация неисправностей в электронной системе управления двигателем по принципу ограничения его работоспособного состояния.

Под ограниченной работоспособностью подразумевается режим работы двигателя, при котором наблюдаются характерные признаки проявления его нестабильной работы – интенсивные колебания, повышенные вибрации, посторонние шумы и т.п.

На этом этапе задавались различные неисправности электронной системы. Двигатель при этом работал на холостом ходу с частотой вращения коленчатого вала 1200 об/мин). Путем отключения в блоке предохранителей той или иной подсистемы происходило размыкание электрической цепи, в результате чего имитировались отказы электронных подсистем управления. После введения неисправности производился пуск двигателя, и определялась его работоспособность по трем признакам поведения:

- двигатель не запускается;
- двигатель работает исправно;
- двигатель работает с нарушенным режимом функционирования.

На рисунке 5 представлена сформированная схема режимов работы двигателя при введении различных неисправностей.

Как видно из схемы, двигатель не функционирует при глобальных неисправностях, таких как отключение АКБ, отключение ЭБУ или замка зажигания. Стоит отметить, что при отключении датчика частоты вращения коленчатого вала двигатель также не запускается. При отключении трех или четырех форсунок двигатель сразу же «глохнет».

Двигатель работает исправно при отключении диагностического разъема, датчика положения педали акселератора, положения дроссельной заслонки и температуры охлаждающей жидкости. Данные неисправности влияют на информационное обеспечение водителя и не вызывают сбоев в режиме работы двигателя.

При отключении одной или двух форсунок, катушки зажигания или датчика детонации двигатель начинает работать с перебоями, повышенными вибрациями и нехарактерным

акустическим фоном в сравнении с исправным режимом работы.

Таким образом, для регистрации акустических параметров работы двигателя в режиме ограниченной функциональности рассматривались четыре неисправности:

- отключение одной форсунки;
- отключение двух форсунок;
- отключение блока катушки зажигания;
- отключение датчика детонации.

При этих неисправностях шум работающего двигателя в дальнейшем подвергался акустическому анализу.

Второй этап – регистрация акустического шума, издаваемого двигателем.

На данном этапе производилась запись шума, издаваемого двигателем при той или иной неисправности. Предварительно перед этим измерялись акустические параметры исправно работающего двигателя. Запись производилась в изолированном помещении через микрофон на звукозаписывающее устройство. Стоит отметить, что в перспективе необходимо использовать микрофоны с пассивным шумоподавлением для отсеивания посторонних шумов, которые могут возникнуть при работе в полевых условиях.

Третий этап – спектральное разложение полученных данных.

При анализе звуковых сигналов при помощи БПФ представляется возможным рассмотрение картины в частотной форме. Каждый записанный файл был обрезан до пятисекундного отрезка времени. При спектральном разложении сформированы графики. По оси X представлен промежуток времени, по оси Y – частоты. На самом графике цветом отображен уровень шума в дБ. Для обработки данных использовалось программное обеспечение Sonic Visualiser, которое является универсальным средством для записи и анализа поступающего на вход звуковой карты сигнала. Программа использует метод нормализации, устанавливающий, что самый громкий пик в аудиофайле принимается за 0 дБ, а все остальные уровни шума выражаются относительно данного пика. Чем тише звук, тем больше по модулю будет значение уровня шума со знаком минус.

На рисунке 6 представлена спектрограмма исправно работающего двигателя. Средний уровень шума составляет – 24 дБ на частотах 43...53 Гц. Спектр имеет плавный и непрерывный характер, пиковые значения совпадают со средним значением на этих частотах.

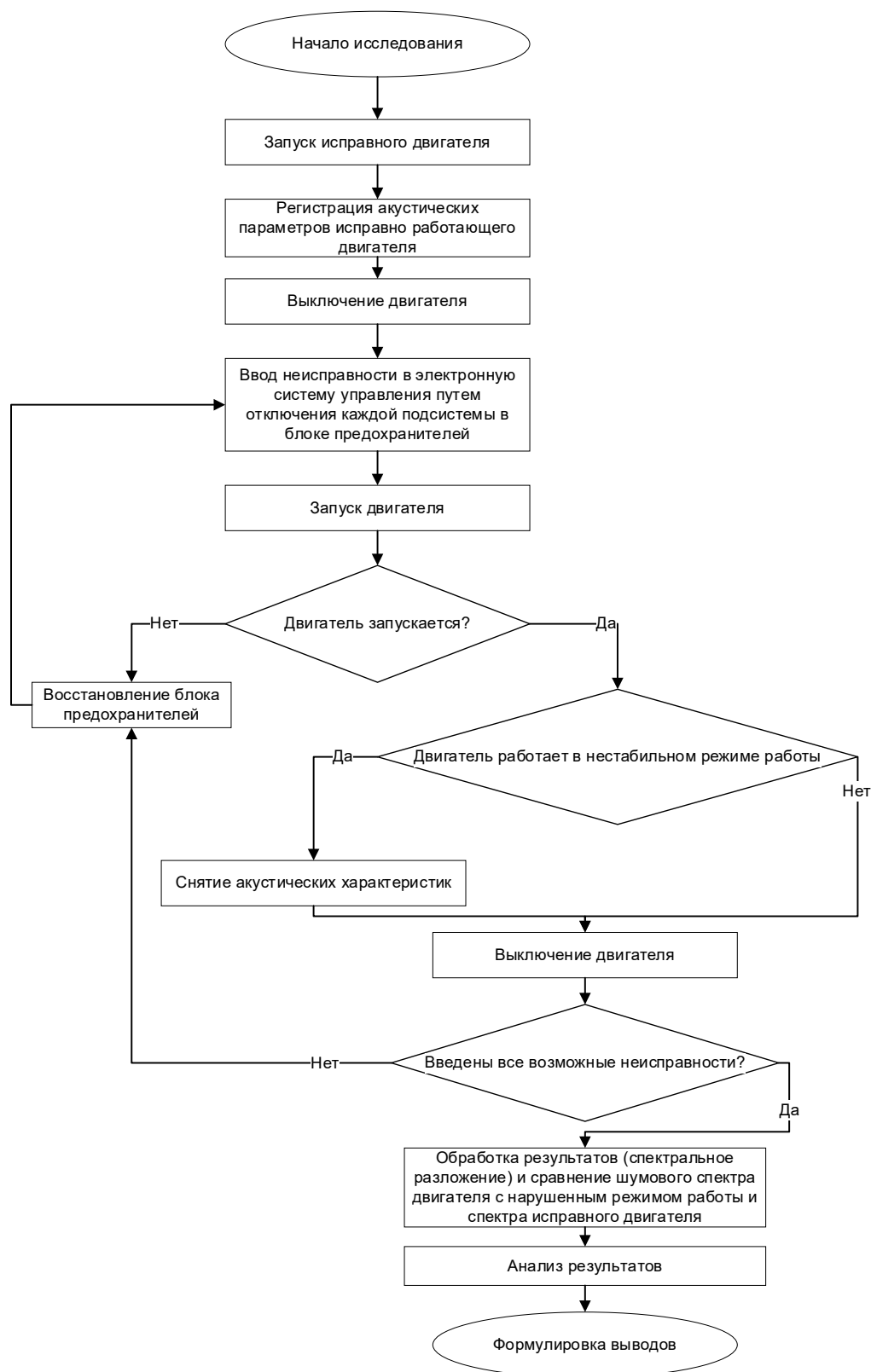


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма проведения исследования
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Experiment conduction algorithm flow chart
Source: compiled by the author.

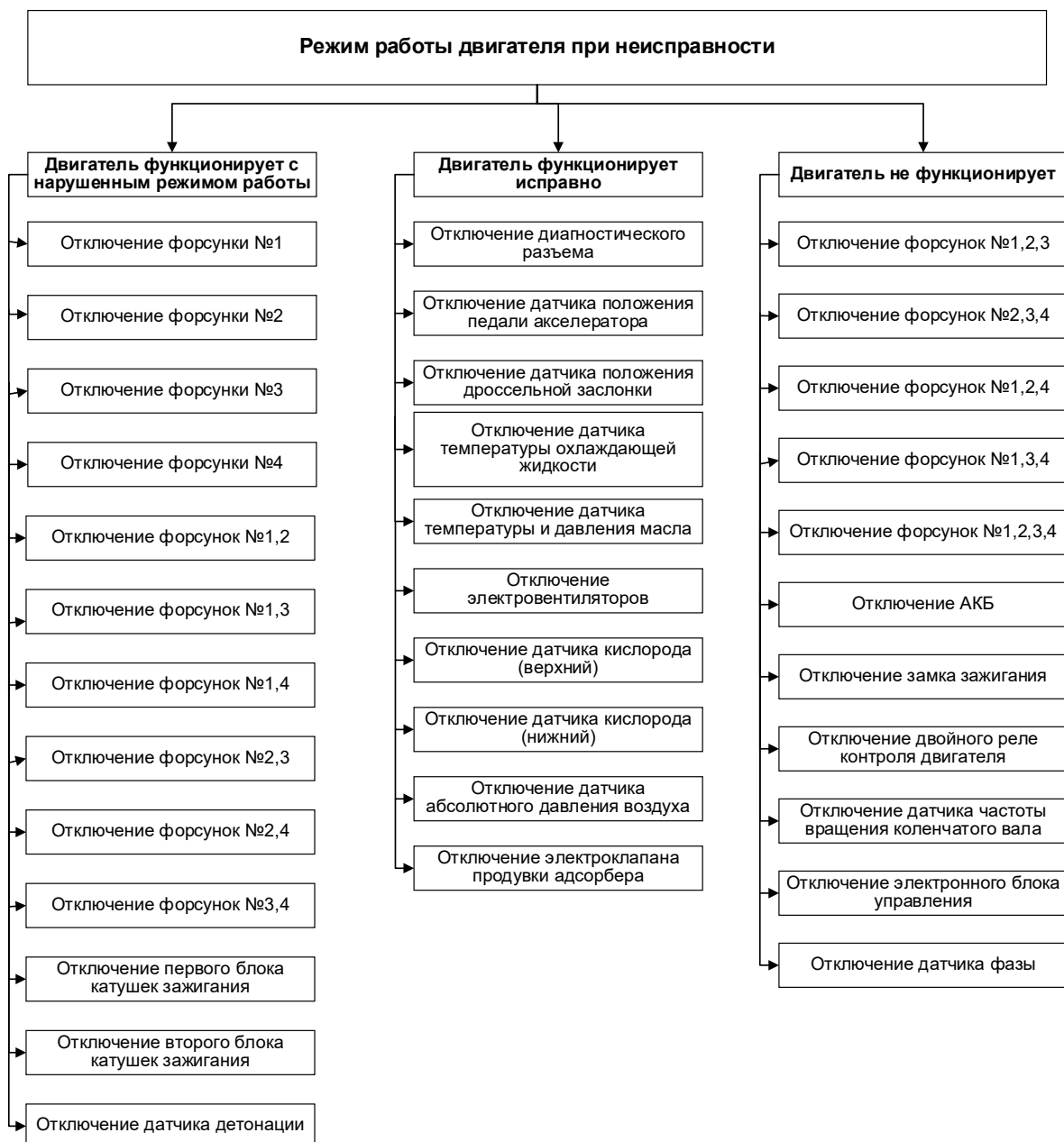


Рисунок 5 – Схема режимов работы двигателя при введении неисправностей
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Scheme of engine operating modes with introduced faults.
Source: compiled by the author.

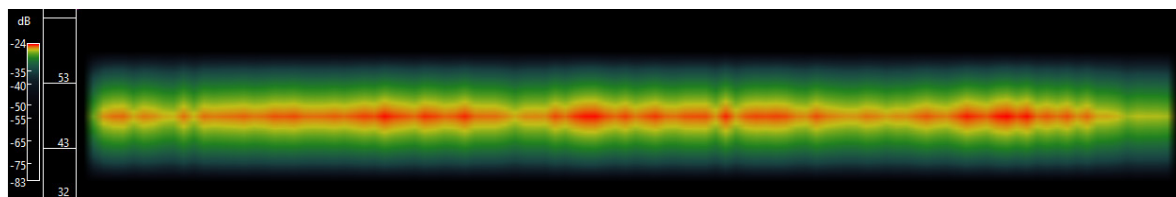


Рисунок 6 – Спектрограмма исправно работающего двигателя
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Spectrogram of the properly functioning engine
Source: compiled by the author.

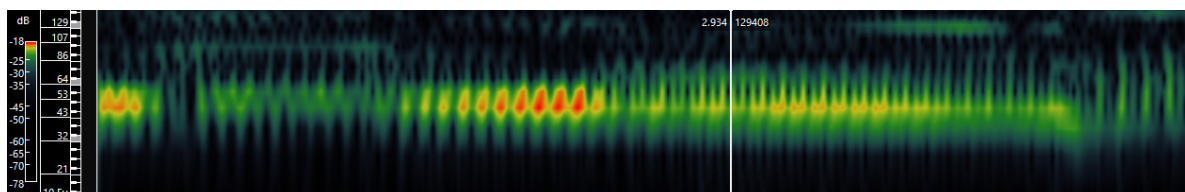


Рисунок 7 – Спектрограмма двигателя, работающего с одной отключенной форсункой
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Spectrogram of the engine running with one disconnected injector
Source: compiled by the author.

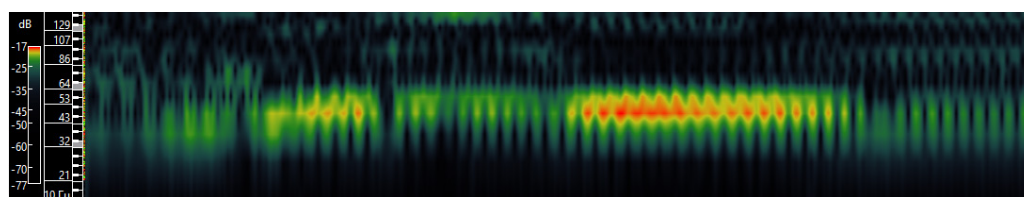


Рисунок 8 – Спектрограмма двигателя, работающего с двумя отключенными форсунками
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Spectrogram of the engine running with two disconnected injectors
Source: compiled by the author.

На рисунке 7 представлена спектрограмма двигателя, работающего с одной отключенной форсункой. Спектр шума имеет минимальные различия вне зависимости от номера отключенной форсунки (№ 1...4). Как видно, на отрезке времени замера наблюдаются обрывы уровня шума. Пиковые значения уровня шума составляют -18 дБ на частотах 43...53 Гц. При этом в указанном диапазоне преимущественный уровень шума -21 дБ. Пиковый уровень шума стал громче в сравнении с исправным двигателем. Это связано с тем, что при отключенной форсунке двигатель начинает «тро-

ить», вызывая сильные колебания корпуса двигателя, в результате чего возникает дополнительный шум от крепежных узлов двигателя.

На рисунке 8 представлена спектрограмма двигателя, работающего с двумя отключенными форсунками. На отрезке времени замера также наблюдаются обрывы уровня шума. Пиковые значения уровня шума составляют -17 дБ на частотах 43...53 Гц. Преимущественный уровень шума в указанном диапазоне составляет также -21 дБ. Картина имеет минимальные отличия от шумового спектра двигателя, работающего с одной отключенной форсункой.

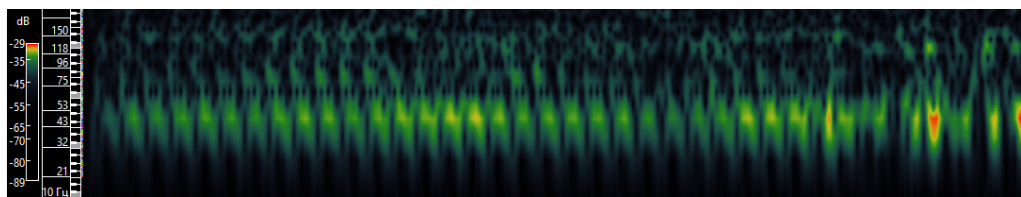


Рисунок 9 – Спектрограмма двигателя, работающего с отключенным датчиком детонации
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Spectrogram of the engine running with the disconnected knock sensor
Source: compiled by the author.

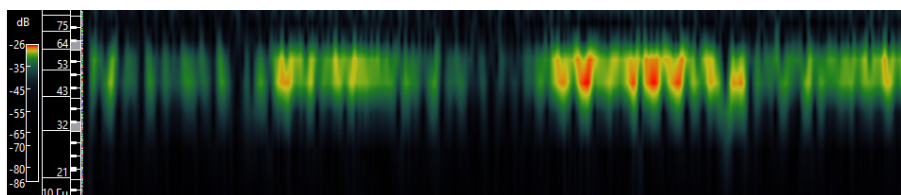


Рисунок 10 – Спектрограмма двигателя, работающего с отключенным блоком катушки зажигания
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Spectrogram of the engine running with the disconnected ignition coil unit
Source: compiled by the author.

На рисунке 9 представлена спектрограмма двигателя, работающего с отключенным датчиком детонации. Преимущественный уровень шума составляет -33 дБ на частотах 43...53 Гц. При отключенном датчике детонации двигатель работает тише в сравнении с отключенными форсунками. Пиковое значение уровня шума в этом диапазоне частот составляет -29 дБ.

На рисунке 10 представлена спектрограмма двигателя, работающего с отключением блока катушки зажигания. Преимущественный уровень шума составляет -31 дБ на частотах 43...53 Гц. Имеются пиковые промежутки, при которых уровень шума достигает -26 дБ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При обработке и анализе полученных результатов установлено:

- диапазон частот акустического шума двигателя при работе на оборотах холостого хода составляет вне зависимости от наличия неисправностей, ограничивающих его функциональность, 43...53 Гц;

- исправно работающий двигатель дает равномерный шумовой спектр со средним уровнем шума -24 дБ;

- при отключении форсунок наблюдаются разрывы шумового спектра по временной шкале, пиковые значения уровня шума достигают – 17...-18 дБ при преимущественном уровне -21 дБ;

- при отключении датчика детонации пиковое значение уровня шума составляет -29 дБ при преимущественном уровне -33 дБ;

- при отключении модуля катушки зажигания пиковое значение уровня шума составляет -26 дБ при преимущественном уровне -31 дБ.

На основе полученных результатов можно сформировать признаки неисправностей в электронной системе управления работой исследованного бензинового двигателя, работающего в режиме ограниченного функционирования (таблица).

Таблица

**Идентификационные признаки неисправностей элементов
электронной системы управления работой бензинового двигателя**
Источник: составлено автором.

Table 1

**Identification signs of malfunctions of the electronic control system elements
of the gasoline engine operation**
Source: compiled by the author.

Рассматриваемый диапазон частот	Среднее значение шума, дБ	Пиковые значения, дБ	Вывод о неисправности
43 Гц- 53 Гц	-24	-24	Двигатель исправный
	-21	-17, -18	Неисправны форсунки двигателя
	-33	-29	Неисправен датчик детонации
	-31	-26	Неисправен модуль катушки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования были выявлены неисправности электронных систем управления работой бензинового ДВС, влияющие на его работу путем перевода в режим ограниченной функциональности. К таким неисправностям относятся неработоспособность датчика детонации, блока катушек зажигания, неисправность форсунок. Были записаны акустические параметры двигателя при работе в режиме ограниченной функциональности из-за введения вышеперечисленных неисправностей. По результатам записей были построены и проанализированы спектральные графики, характеризующие ту или иную неисправность. Полученные графики имеют уникальный характер для каждого вида отказа, в результате чего возможно идентифицировать ту или иную неисправность в электронной системе управления работой ДВС. Проведенное исследование является одним из локальных этапов разработки метода оперативного акустического диагностирования электронных систем управления работой силовых установок с использованием мобильного портативного оборудования. Дальнейшим этапом предполагается исследование возможности реализации метода в полевых условиях при наличии активных посторонних шумов. Полученные при этом результаты позволят оценить целесообразность проведения большого объема испытаний по формированию базы данных акустических спектров исправных силовых установок, применяемых на различных НТТМ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федосов А.В., Гайнуллина Л.А. Методы неразрушающего контроля // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. Т. 11, № 2. С. 73–78.
2. Острецов Д.А. Проблемы грузоперевозок в России и пути их решения // Наука без границ. 2016. № 1 (1). С. 27–30.
3. Диагностика современного автомобиля / Ю.Н. Храпов, И.А. Успенский, Г.Д. Кокорев [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 118. С. 1001–1025.
4. Гончаров А.А., Гончаров Н.С. Совершенствование методики диагностирования датчика кислорода автомобильных двигателей // Вестник Оренбургского государственного университета. 2014. № 10 (171). С. 236–240.
5. Deptuła A., Osiński P., Radziwanowska U. Decision Support System for Identifying Technical Condition of Combustion Engine // Archives of Acoustics. 2016. Vol. 41. No 3. P. 449–460.
6. Батялов А.А., Гордеев В.И. Системы технического диагностирования двигателей // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2003. № 5. С. 67–77.
7. Горбаш В.Г., Делендик М.Н., Павленко П.Н. Неразрушающий контроль в промышленности. Акустический контроль // Неразрушающий контроль и диагностика. 2011. № 4. С. 35–51.
8. Рыбочкин А.Ф., Савельев С.В., Смирнов А.В. Диагностирование состояния работающего автомобильного двигателя на основе анализа издаваемого им акустического шума // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2014. № 16 (156). С. 61–77.
9. Лузина М.П. Анализ результатов контроля технических изделий методом акустической

эмиссии // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 3 (73). С. 78–83.

10. Дрейзин В.Э., Касем М.М. Возможности диагностики автомобильных двигателей путём анализа шума работающего двигателя // Известия Курского государственного технического университета. 2009. № 2 (27).

11. Горбачев А.А. Диагностика двигателя внутреннего сгорания автомобиля по акустическому излучению двигателя // Теория и практика современной науки. 2016. № 6-1 (12). С. 275–291.

12. Уваров Г.А. Совершенствование акустического метода диагностирования автомобильных бензиновых двигателей // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. 2014. № 3. С. 95–98.

13. Деев А.А. Акустические колебания в фрикционном контакте как способ контроля поверхностей трения на этапе приработки двигателей внутреннего сгорания // Вестник Рязанского государственного университета им. С.А. Есенина. 2010. № 29. С. 132–148.

14. Mathew S.K., Zhang Y. Acoustic-Based Engine Fault Diagnosis Using WPT, PCA and Bayesian Optimization // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. № 19. P. 68–90.

15. Albarbar A., Gu F., Ball A. D., Starr A. Acoustic monitoring of engine fuel injection based on adaptive filtering techniques // Applied Acoustics. 2010. Vol. 71. № 12. P. 1132–1141.

16. Albarbar A., Gu F., Ball A.D. Diesel engine fuel injection monitoring using acoustic measurements and independent component analysis // Measurement. 2010. Vol. 43. № 10. P. 1376–1386.

17. Broatch A., Novella R., García-Tíscar J. [et al.] Analysis of combustion acoustic phenomena in compression-ignition engines using large eddy simulation // Physics of Fluids. 2020. Vol. 32. № 8. P. 085101.

18. Волчанина М.А. Статистические исследования сигналов акустического контроля при диагностировании силовых трансформаторов // Известия Транссиба. 2022. № 3 (51). С. 80–89.

19. Черемисин В.Т., Кузнецов А.А., Волчанина М.А., Горлов А.В. Измерение параметров акустических сигналов имитатора дефектов силовых трансформаторов // Инновационные транспортные системы и технологии. 2020. Т. 6, № 4. С. 161–171.

20. Виноградов В.Ю., Сайфуллин А.А. Контроль технического состояния авиационных ГТД по акустическим параметрам, измеренным на срезе сопла двигателя // Контроль. Диагностика. 2013. № 3. С. 53–57.

21. Никитина Н.Е., Мотова Е.А. (Шабанова), Тарасенко Ю.П. Неразрушающий контроль рабочих компрессорных лопаток авиационного двигателя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. 2012. № 3-1 (34). С. 291–295.

22. Umair A., Fakhre A., Jennions I. Acoustic monitoring of an aircraft auxiliary power unit // ISA Transactions. 2023. Vol. 137. P. 670–691.

23. Waligórski M., Batura K., Kucal K., Merksiz J. Research on airplanes engines dynamic processes with modern acoustic methods for fast and accurate diagnostics and safety improvement // Measurement. 2019. Т. 154. P. 107460.

24. Сургутсков К.Н., Трегубова И.М. (Титла) Проблемы компьютерной диагностики современных автомобильных двигателей // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1 (52). С. 25.

25. Терехов А.В., Гужаковская К.П. Анализ спектра звукового сигнала // NBI-technologies. 2020. Т. 14, № 1. С. 23–28.

26. Mayuraj E., Rohan S., Saurabh K. The condition monitoring of I.C. engine using acoustic signal analysis. 2022. Vol. 09. № 06.

REFERENCES

1. Fedosov A.V., & Gainullina L.A. Methods of non-destructive testing. *Electrical and data processing facilities and systems*. 2015; 11(2): 73-78. (In Russ.)

2. Ostretsov D.A. Problems of freight transportation in Russia and ways to solve them. *Science Without Borders*. 2016; 1(1): 27-30. (In Russ.)

3. Khrapov Y.N., Uspensky I.A., Kokorev G.D., et al. Diagnostics of modern vehicles. *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University*. 2016; 118: 1001–1025. (In Russ.)

4. Goncharov A.A., Goncharov N.S. Improving the methodology for diagnosing oxygen sensors in automotive engines. *Vestnik of the Orenburg State University*. 2014; 10(171): 236–240. (In Russ.)

5. Deptuła A., Osiński P., Radziwanowska U. Decision support system for identifying technical condition of combustion engine. *Archives of Acoustics*. 2016; 41(3): 449–460.

6. Batyalov A.A., Gordeev V.I. Systems for technical diagnostics of engines. *Bulletin of VSAWT*. 2003; 5: 67-77. (In Russ.)

7. Gorbash V.G., Delendik M.N., Pavlenko P.N. Non-destructive testing in industry. Acoustic testing. *Non-Destructive Testing and Diagnostics*. 2011; 4: 35–51. (In Russ.)

8. Rybochkin A., Saveliev S., Smirnov A. Diagnosis of Automobile Engine Condition Based on the Analysis of Acoustic Noise. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*. 2014; (16): 61–77. (In Russ.)

9. Luzina M.P. Analysis of the results of testing technical products by the acoustic emission method. *Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State University of Information Technologies. Mechanics and Optics*. 2011; 3(73): 78–83. (In Russ.)

10. Dreyzin, V. E., & Kasem, M. M. (2009). Possibilities of diagnosing automotive engines by analyzing the noise of a running engine. *Proceedings of Kursk State Technical University*, 2(27). (In Russ.)

11. Gorbachev A.A. Diagnostics of internal combustion engines based on the acoustic radiation of the engine. *Theory and Practice of Modern Science*. 2016; 6-1(12): 275–291. (In Russ.)

12. Uvarov G.A. Improvement of the acoustic method for diagnosing automotive gasoline engines.

Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki. 2014; 3: 95–98. (In Russ.)

13. Deev A.A. Acoustic vibrations in frictional contact as a method for monitoring friction surfaces during the running-in of internal combustion engines. *The Bulletin of the Ryazan State University named for S.A. Yesenin.* 2010; 29: 132–148. (In Russ.)

14. Mathew S.K., Zhang Y. Acoustic-based engine fault diagnosis using WPT, PCA, and Bayesian optimization. *Applied Sciences.* 2020; 10(19): 68–90.

15. Albarbar A., Gu F., Ball A.D., Starr A. Acoustic monitoring of engine fuel injection based on adaptive filtering techniques. *Applied Acoustics.* 2010; 71(12): 1132–1141.

16. Albarbar A., Gu F., Ball A.D. Diesel engine fuel injection monitoring using acoustic measurements and independent component analysis. *Measurement.* 2010; 43(10): 1376–1386.

17. Broatch A., Novella R., García-Tíscar J., et al. Analysis of combustion acoustic phenomena in compression-ignition engines using large eddy simulation. *Physics of Fluids.* 2020; 32(8): 085101.

18. Volchanina M.A. Statistical investigations of acoustic control signals in diagnostic of power transformers. «*Izvestia Transsiba*» (Journal of *Transsib Railway Studies*). 2022; 3(51): 80–89. (In Russ.)

19. Cheremisin V.T., Kuznetsov A.A., Volchanina M.A., Gorlov A.V. Measuring the acoustic signals parameters of the defect simulator of power transformers. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2020; 6(4): 161–171. (In Russ.)

20. Vinogradov V.Y., Saifullin A.A. Monitoring the technical condition of aircraft gas turbine engines based on acoustic parameters measured at the engine nozzle exit. *Kontrol'. Diagnostika (Testing. Diagnostics).* 2013; 3: 53–57. (In Russ.)

21. Nikitina N.E., Motova (Shabanova), E.A., Tarasenko Y.P. Non-destructive testing of working compressor blades of an aircraft engine. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering.* 2012; 3-1(34): 291–295. (In Russ.)

22. Umair A., Fakhre A., Jennions I. Acoustic monitoring of an aircraft auxiliary power unit. *ISA Transactions.* 2023; 137: 670–691.

23. Waligórski M., Batura K., Kucal K., & Merksiz J. Research on airplanes engines dynamic processes with modern acoustic methods for fast and accurate diagnostics and safety improvement. *Measurement.* 2019; 154: 107460.

24. Surgutskov K.N., Tregubova I.M. (Titla). Problems of computer diagnostics of modern automobile engines. *Engineering Bulletin of the Don.* 2019; 1(52): 25.

25. Terekhov A.V., Guzhakovskaya K.P. Spectral analysis of audio signal. *NBI-Technologies.* 2020; 14(1): 23–28. (In Russ.)

26. Mayuraj E., Rohan S., Saurabh K. The condition monitoring of I.C. engine using acoustic signal analysis. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research.* 2022; 9(6).

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Габидулин В.Д. Анализ состояния вопроса, планирование и проведение экспериментальных исследований, снятие спектрограмм и спектральный анализ акустических параметров двигателя, оформлении статьи.

Добромиров В.Н. Разработка замысла научного исследования, участие в экспериментальных исследованиях, анализ полученных результатов, формулировка выводов, общее редактирование статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

V.D. Gabidulin Analysis of the problem status, planning and conducting experimental studies, recording spectrograms, performing spectral analysis of engine acoustic parameters, design of the article.

V.N. Dobromirov Development of the scientific research plan, participation in experimental studies, analysis of the obtained results, formulation of conclusions, general editing of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Габидулин Владимир Дмитриевич – аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические машины» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0565-5440>,

SPIN-код: 1960-0168,

e-mail: moy@mail_2014@mail.ru

Добромиров Виктор Николаевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Наземные транспортно-технологические машины» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7803-4049>,

SPIN-код: 4389-7998,

e-mail: viktor.dobromirov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir D. Gabidulin – Postgraduate Student, Department of Ground Transport and Technological Machines, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2-nd Krasnoarmeyskaya Street, St. Petersburg, 190005).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0565-5440>,

SPIN-code: 1960-0168,

e-mail: moy@mail_2014@mail.ru

Viktor N. Dobromirov – Dr. of Sci. (Eng.), Professor, Department of Ground Transport and Technological Machines, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2-nd Krasnoarmeyskaya Street, St. Petersburg, 190005).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7803-4049>,

SPIN-code: 4389-7998,

e-mail: viktor.dobromirov@mail.ru

Научная статья
УДК 625.084
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-346-355>
EDN: YMZNVТ



ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УПРУГОДЕФОРМИРУЕМОЙ ЛЕНТЫ В КОМБИНИРОВАННОМ УПЛОТНЯЮЩЕМ ОБОРУДОВАНИИ ДЛЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

О.Ю. Казаков¹ ✉, А.Г. Савельев²

¹Конструкторское бюро точного машиностроения им. А.Э. Нудельмана,
г. Москва, Россия

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

✉ ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Процесс уплотнения асфальтобетона является одним из важнейших при строительстве дорожного покрытия. Традиционные методы уплотнения включают в себя воздействие со стороны отряда катков с гладкими или вибрационными вальцами. Как альтернатива предложен вариант для непрерывного уплотнения в виде комбинированного уплотняющего оборудования. Основным рабочим органом является валец со смещённой осью вращения, оказывающий многократное воздействие на уплотняемый материал. Этот процесс является комплексным, поэтому в статье рассматривается гипотеза обоснования целесообразности использования упругодеформируемой ленты в комбинированном уплотняющем оборудовании для асфальтобетонных смесей.

Материалы и методы. Для проведения экспериментальных исследований сконструирован лабораторный стенд, составлена методика проведения экспериментов, показывающих влияние наличия упругодеформируемого ленточного элемента на качество готового покрытия. В качестве показателя выбрана величина призмы выброса материала перед рабочим органом, значение которой влияет на равномерность уплотнения и целостность структуры материала.

Результаты. Полученные в процессе экспериментов данные были зафиксированы, систематизированы и проанализированы для последующего анализа, показавшего следующее: в случае наличия прослойки между рабочим органом и уплотняемым материалом упругодеформируемого ленточного элемента заметно уменьшается величина призмы материала перед вальцом, что повышает качество готового покрытия.

Закключение. В результате исследования была доказана гипотеза о необходимости наличия упругодеформируемого ленточного элемента в конструкции комбинированного уплотняющего оборудования для повышения качества готового дорожного покрытия из асфальтобетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: уплотнение, асфальтобетонная смесь, асфальтобетонное покрытие, дорожное полотно, лабораторный стенд, исследование, эксперимент, упругодеформируемый ленточный элемент

БЛАГОДАРНОСТИ: Кустареву Геннадию Владимировичу за ценный вклад в предложение к реализации конструкции комбинированного уплотняющего оборудования и идею к эксперименту. Пахомовой Наталье Константиновне за поддержку в популяризации научных исследований и помощь в редактировании материалов статьи. Анонимным рецензентам и редакции Вестника СибАДИ за труд над данной статьёй.

Статья поступила в редакцию 20.04.2025; одобрена после рецензирования 03.06.2025; принята к публикации 16.06.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Казаков О.Ю., Савельев А.Г. Обоснование использования упругодеформируемой ленты в комбинированном уплотняющем оборудовании для асфальтобетонных смесей // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 3. С. 346-355. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-346-355>

© Казаков О.Ю., Савельев А.Г., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-346-355>

EDN: YMZNVT

JUSTIFICATION OF THE USE OF ELASTICALLY DEFORMABLE BELT IN COMBINED COMPACTION EQUIPMENT FOR ASPHALT CONCRETE MIXTURES

Oleg Y. Kazakov¹ ✉, Andrey G. Savelyev²

¹A.E. Nudelman Precision Engineering Design Bureau,
Moscow, Russian

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

✉ corresponding author
4informatika@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The process of asphalt concrete compaction is one of the most important in the construction of road surfaces. Traditional compaction methods include the impact of a row of rollers with smooth or vibrating drums. As an alternative, a variant for continuous compaction in the form of combined compaction equipment is proposed. The main working element of which is a drum with an offset axis of rotation, which has a multiple effect on the compacted material. This process is a complex, therefore, the article considers the hypothesis of substantiating the feasibility of using an elastic-deformable belt in combined compaction equipment for asphalt concrete mixtures.

Materials and methods. A laboratory stand was designed to conduct experimental studies, and a methodology for carrying out experiments demonstrating the effect of the presence of an elastically deformable belt element on the quality of the finished coating was developed. The size of the prism of the material ejection in front of the working element was chosen as a quality indicator, the value of which affects the uniformity of compaction and the integrity of the material structure.

Results. The data obtained by the experiments were recorded, systematized and analyzed for subsequent study, which showed the following: in the case of the presence of a layer between the working element and the compacted material - elastically deformable belt element, the size of the material prism in front of the roller is noticeably reduced, which shows an increase in the quality of the finished coating. **Conclusion.** As a result of the survey, the hypothesis about the necessity of the elastically deformable belt element in the design of combined compaction equipment for improving the quality of the finished asphalt concrete road surface was proven.

KEYWORDS: compaction; asphalt concrete mixture; asphalt concrete pavement; road surface; laboratory stand; research; experiment; elastically deformable belt element

ACKNOWLEDGMENTS: The authors express their gratitude to Gennadiy Vladimirovich Kustarev for his valuable contribution to the development of the design of combined compaction equipment and the idea for the experiment. The authors are very grateful to Pakhomova Natal'ya Konstantinovna for her support in popularization of scientific researches and her help in editing article materials. The authors would like to thank anonymous reviewers and the editorial board of the SibADI Bulletin for their work on this article.

The article was submitted: April 20, 2025; approved after reviewing: June 18, 2025; accepted for publication: June 16, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Kazakov O.Yu., Savelyev A.G. Justification of the use of elastically deformable belt in combined compaction equipment for asphalt concrete mixtures. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (3): 346-355. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-346-355>

© Kazakov O.Yu., Savelyev A.G., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Уплотнение асфальтобетонных смесей при помощи катков является важным процессом устройства покрытия дорожной сети [1, 2]. Классический метод повышения плотности асфальтобетона при помощи циклического укатывания гладким металлическим и вибрационным вальцами уплотнения широко применяется долгое время по всему миру. А новые научные изыскания расширяют знания о физико-химических, структурно-механических и прочих свойствах асфальта [3].

С целью повышения качества покрытия и скорости укладки, специалисты в области дорожного строительства предлагают альтернативные подходы. Так, кафедра дорожно-строительных машин Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) предложила новый подход для скоростной укладки асфальтобетонного покрытия, основным отличием которого от классического подхода была непрерывная выгрузка смеси в виде валика с последующей загрузкой перегружателем в асфальтоукладчик.

Для развития и модернизации данного подхода было разработано и запатентовано¹ новое комбинированное уплотняющее оборудование для асфальтобетонных смесей (рисунок 1).

Одним из отличий данного оборудования от классического катка является непрерывность работы [4]. Отсутствие циклического возвратно-поступательного движения вдоль дорожного покрытия является фактором образования дефектов [5, 6]. Основным рабочим органом выступает валец со смещенной осью вращения, расположенные определенным образом на расстояниях $K_{1...3}$ и $T_{1...4}$. За счёт определенных заранее заданных параметров расположения данной оси по отношению к уплотняющему материалу под углом β и многократных ударных воздействий производится повышение плотности и формирование более прочной структуры смеси. Уплотнение выполняется несколькими рабочими органами с учетом предварительного и окончательного уплотнения опорными вальцами. В результате осадки толщина слоя материала меняется с H_1 на H_2 .

Конструкция включает в себя упругодеформируемый ленточный элемент, посредством которого вращающиеся вальцы оказывают воздействие на материал. В научной работе по исследованию влияния ленточного элемента на процесс возвратно-поступательного укатывания материала было выяснено, что его наличие позволяет [7, 8]:

- снизить деформации вдоль направления движения рабочего органа на 10%;
- снизить поперечные деформации на 5%;
- снизить величину деформации по глубине на 40%.

Это позволяет сформулировать гипотезу, состоящую в том, что применение ленточного элемента в конструкции комбинированного уплотняющего оборудования положительно скажется на качестве готового покрытия. С целью обоснования данного предположения проведено соответствующее экспериментальное исследование, учитывая опыт проведения подобных экспериментов [9, 10].

Объектом исследования является уплотнение материала при помощи вальца многократного воздействия посредством упругодеформируемого ленточного элемента.

Предметом исследования выбрана величина волнообразования перед рабочим органом. Чем больше материала выталкивается перед вальцом, тем больше разрушается структура асфальтобетона, что может привести к появлению дефектов (в т.ч. продольные и поперечные трещины) и нарушениям ровности и гладкости готового дорожного покрытия (из-за неравномерности волнообразования и последующей укатки неравномерно распределенного материала).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Местом проведения эксперимента выбрана лаборатория на материальной базе и с участием научных специалистов ООО «ФИЗЛАБПРИБОР». В качестве лабораторного стенда для исследований работы вальца со смещенной осью вращения использовалось специальное разработанное и изготовленное оборудование (рисунок 2) [11].

¹ Устройство для уплотнения горячих асфальтобетонных смесей и грунтов: Патент РФ № 194303. № 2019122624; заявл. 18.07.2019; опубл. 05.12.2019, Бюл. № 34. 4 с.

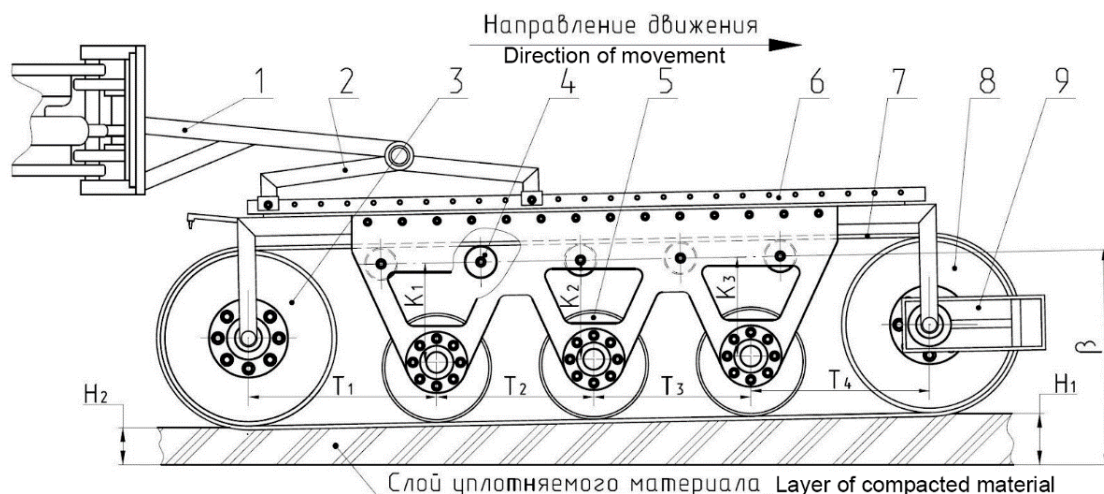


Рисунок 1 – Комбинированное уплотняющее оборудование и основные элементы:
 1 – толкающий брус машины-носителя; 2 – крепёж-балансир; 3 – ведомый опорный валец;
 4 – вспомогательный валец для поддержания ленты; 5 – рабочий уплотняющий орган в виде вальца многократного воздействия; 6 – рама; 7 – упругодеформируемый ленточный элемент;
 8 – ведущий опорный валец; 9 – механизм натяжения ленточного элемента
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Combined compaction equipment and main elements:
 1 – pushing beam of the carrier machine; 2 – balancer fastener; 3 – driven support roller;
 4 – auxiliary roller for supporting the belt; 5 – working compaction element in the form of a multiple action roller;
 6 – frame; 7 – elastically deformable belt element; 8 – leading support roller;
 9 – belt element tensioning mechanism
 Source: compiled by the authors.

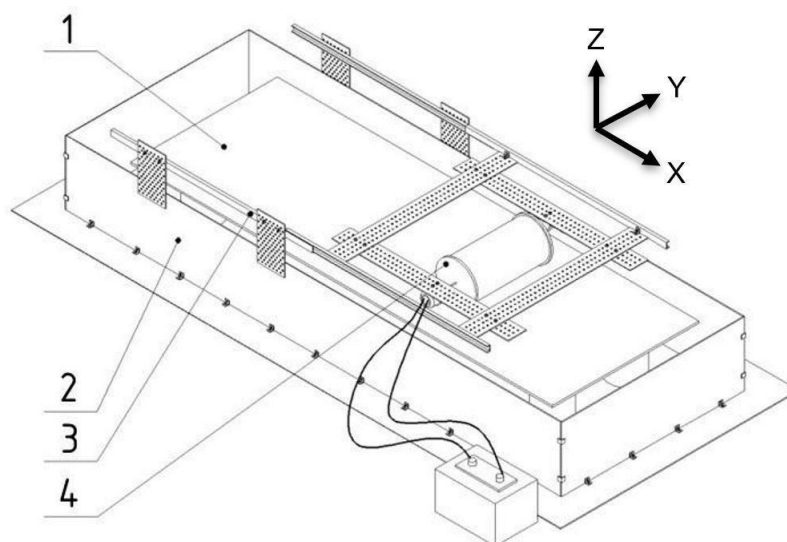


Рисунок 2 – Принципиальная схема и основные узлы лабораторного стенда:
 1 – основание для размещения емкости с уплотняемым материалом;
 2 – корпус лабораторного стенда; 3 – выдвижная конструкция;
 4 – рабочий орган в виде вальца со смещенной осью вращения
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Schematic diagram and main units of the laboratory stand:
 1 – base for placing a container with compacted material; 2 – body of the laboratory stand;
 3 – retractable structure; 4 – working element in the form of a roller with an offset axis of rotation
 Source: compiled by the authors.

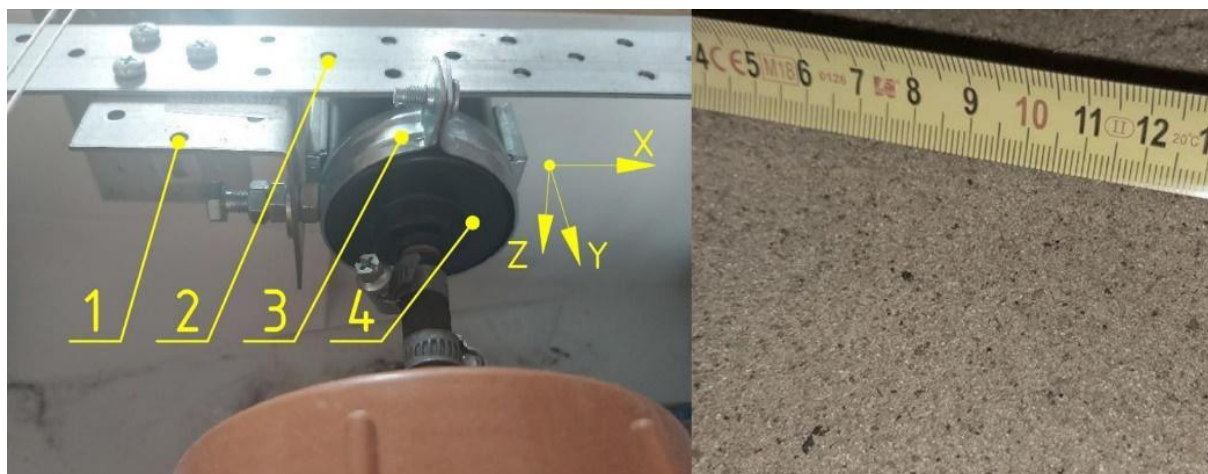


Рисунок 3 – Иллюстрации элементов лабораторного стенда (авторские фотографии): слева – метод монтажа к выдвижной конструкции 2-го рабочего органа, электромотора 4 при помощи кронштейна 1 и крепежа 3; справа – уплотняемый материал, моделирующий холодную песчаную асфальтобетонную смесь типа Гх
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Illustrations of laboratory stand elements (author's photographs): on the left – the method of mounting to the retractable structure the 2-nd working element, electric engine 4 using bracket 1 and fasteners 3; on the right – the compacted material simulating a cold sand asphalt concrete mixture of type Gx
Source: compiled by the authors.

Особенности крепления рабочего органа к выдвижной конструкции и уплотняемый материал показаны на рисунке 3. Особое внимание было уделено прочностным расчетам с учетом зарубежного опыта [12, 13], что позволило снизить погрешность по вине оборудования из-за люфтов, колебаний и т.п.

В качестве уплотняемого материала для моделирования холодной песчаной асфальтобетонной смеси [14, 15] типа Гх при проведении экспериментальных исследований применялась смесь кварцевого песка и масла, обладающего следующими параметрами: сцепление материала от 0,7 до 0,8 кг/см²; число ударов ударника ДОРНИИ от 8 до 9 раз; угол внутреннего трения от 28 до 32°; угол внешнего трения от 18 до 21°; объемный вес 2 г/см³. Это обосновывает достаточную степень сходства с моделируемым материалом [16, 17, 18].

Исследование проводится для подтверждения необходимости применения упругодеформируемого ленточного элемента в комбинированном уплотняющем оборудовании для увеличения эффективности процесса уплотнения в виде снижения величины призмы волнообразования. Оно включает два эксперимента, отличающихся наличием и отсутствием упругодеформируемого ленточного элемента в процессе работы вальца многократного воздействия.

Схема проведения эксперимента с упругодеформируемым ленточным элементом представлена на рисунке 4, где валец многократного воздействия радиусом R вращается вокруг собственной смещенной по отношению к геометрическому центру на величину эксцентриситета E оси с угловой скоростью ω за счёт электромотора при одновременном движении подвижного кронштейна рабочего органа вдоль ёмкости с уплотняемым материалом с постоянной скоростью $V_{\text{пм}}$ за счёт работы электролебедки (моделирующей поступательное движение машины-носителя).

Ось вальца многократного воздействия находится на расстоянии от внутренней поверхности упругодеформируемого ленточного элемента толщиной δ .

В таблице показаны наименование и значение основных параметров лабораторного стенда, используемых для проведения данного исследования.

В рамках исследования проведено 2 эксперимента, где параметры R , $V_{\text{пм}}$, L , N , E , h выступают в роли неизменных величин. Изменялось лишь наличие или отсутствие упругодеформируемого ленточного элемента. Таким образом, первый эксперимент проведен с использованием ленточного элемента, а второй – без.

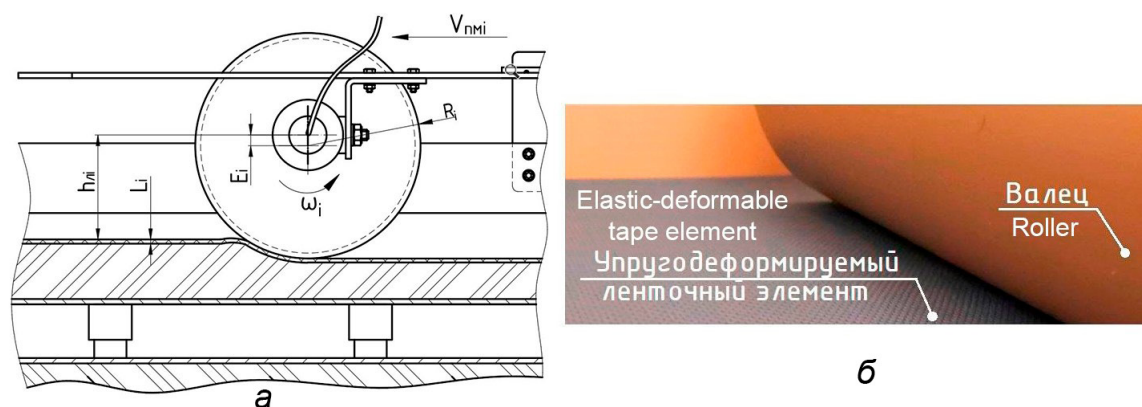


Рисунок 4 – Работа вальца многократного воздействия с ленточным элементом:
 а – принципиальная схема (изображен эксперимент с присутствующим упругодеформируемым ленточным элементом); б – подготовка к эксперименту (авторская фотография)
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Operation of a multiple impact roller with a belt element:
 а – schematic diagram (depicts an experiment with an elastically deformable belt element);
 б – preparation for the experiment (author's photograph)
 Source: compiled by the authors.

Таблица
 Наименование и значение параметров лабораторного стенда
 Источник: составлено авторами.

Table
 Name and significance of laboratory stand parameters
 Source: compiled by the authors.

Наименование параметра	Значение параметра
Радиус вальца многократного воздействия R	105 мм
Скорость поступательного движения V_{nm} выдвижной конструкции	15 мм/с
Толщина упругодеформируемого ленточного элемента L	5 мм
Частота вращения вальца многократного воздействия N	1,75 об/с
Эксцентриситет оси вращения E	6 мм
Расстояние от оси вращения до внутренней поверхности упругодеформируемого ленточного элемента h_d	100 мм

Количество повторений для каждого эксперимента равно 5 для усреднения полученных результатов и снижения влияния случайных погрешностей на полученные данные. При этом подготовка к эксперименту каждый раз производится заново и включает в себя следующие шаги:

1. Позиционирование емкости для материала в рабочем пространстве лабораторного стенда. Распределение по емкости и предварительное уплотнение материала согласно аналогичным исследованиям. Слой материала укладывается толщиной 50 мм и предварительно уплотняется до коэффициента 0,6, обусловленный лабораторными условиями.

Его значение вычисляется с помощью объемного (геометрического) метода [19].

2. При необходимости (в зависимости от вида эксперимента) поверхность подготовленного материала располагается упругодеформируемый ленточный элемент. В качестве чего выступает силиконовое полотно толщиной 5 мм со следующими параметрами: твердость 30 ± 3 Шор А; плотность $0,8 \text{ г/см}^3$; относительное удлинение от 300 до 400%; условная прочность от 5 до 7 МПа; термостойкость от 200 до 250 °С.

3. Валец многократного воздействия с радиусом R располагается на выдвижной конструкции с закреплением необходимого значения эксцентриситета E .

4. Электрический привод вальца многократного воздействия подключается к источнику электропитания и включается, заставляя валец многократного воздействия совершать постоянные по частоте и угловой скорости вращения вокруг собственной оси с эксцентриситетом E .

5. Выдвижная конструкция приводится в движение при помощи электролебедки и перемещается с постоянной скоростью $V_{\text{пм}}$.

6. В произвольный момент времени, когда вращающийся валец многократного воздействия прошел от $1/3$ до $2/3$ продольной длины емкости для материала, уплотнение останавливается (продольное перемещение выдвижной конструкции прекращается, а привод вращения вальца отключается от электрической сети). Выдвижная конструкция отводится в начало пути, а упругодеформируемый

ленточный элемент (при его наличии) удаляется для возможности фиксации результатов эксперимента.

Аппроксимация призмы волнообразования проводится путём упрощения площади сечения до простейшей фигуры. На рисунке 5 показан пример с заменой сечения на треугольник с точками A , B и C . Измерения производятся после удаления упругодеформируемого ленточного элемента и вальца при помощи штангенциркуля с глубиномером. При этом точка B показывает также и высоту призмы $h_{\text{пр}}$ по отношению к поверхности неуплотненного материала (основание треугольника). Вычисление площади упрощенной фигуры производится по известным формулам. Точность измерений возможно повысить при увеличении количества простых фигур с последующим суммированием их площадей.

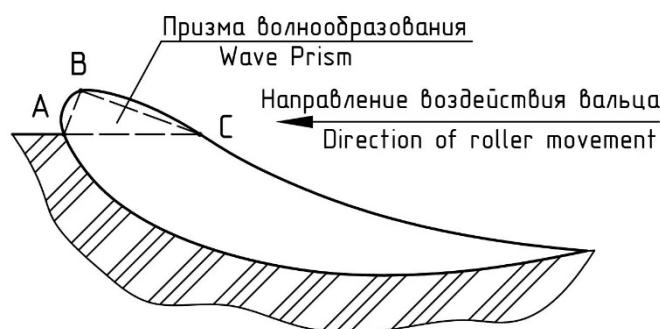


Рисунок 5 – Аппроксимация геометрии призмы волнообразования
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Approximation of the geometry of the wave forming prism
Source: compiled by the authors.

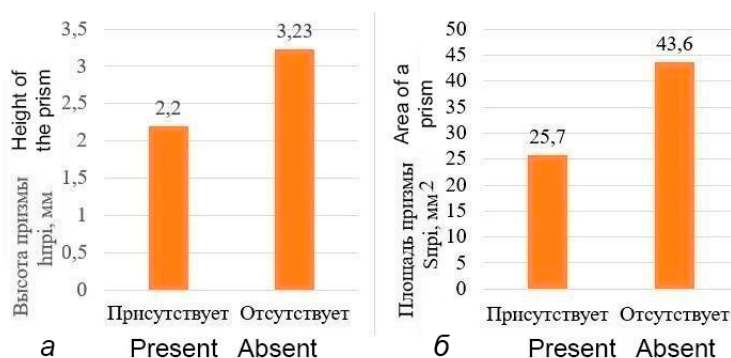


Рисунок 6 – Зависимость величины призмы волнообразования уплотняемого материала от наличия или отсутствия упругодеформируемого ленточного элемента: а – высота; б – площадь
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Dependence of the size of the wave forming prism of the compacted material on the presence or absence of an elastically deformable belt element: a – height; b – area
Source: compiled by the authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты показали, что применение упругоэластичного ленточного элемента действительно уменьшает величину призмы перед рабочим органом. В результате проведенных экспериментов получен ряд значений интересующих параметров. Для минимизации случайных погрешностей были вычислены средние арифметические значения. Полученные данные приведены на рисунке 6.

Анализ полученных значений параметров выявил, что применение упругодеформируемого ленточного элемента уменьшает высоту сечения призмы $h_{пр}$ на 31,89% (с 3,23 до 2,2 мм); уменьшает площадь сечения призмы волнообразования $S_{пр}$ на 41,06% (с 43,6 до 25,7 мм²).

Результаты объясняются тем, что упругодеформируемый ленточный элемент препятствует перемещению частиц уплотняемого материала относительно друг друга, уменьшает продольные, поперечные и вертикальные деформации. Повышается распределение усилий со стороны вальца многократного воздействия, снижается объем выделенного материала по периметру пятна контакта вальца многократного воздействия и уплотняемого материала. Снижается перемещение материала, что согласуется с существующими исследованиями ленточного элемента при классической укатке.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из анализа результатов экспериментов, можно сделать следующие выводы:

1. Применение упругодеформируемого ленточного элемента для работы вальца многократного воздействия снижает величину призмы волнообразования за счёт уменьшения сдвиговых деформаций и более равномерного распределения касательных и нормальных напряжений в уплотняемом материале. Тем самым повышается эффективность процесса уплотнения, что подтверждает выдвинутую в статье гипотезу.

2. Применение упругодеформируемого ленточного элемента в комбинированном уплотняющем оборудовании для асфальтобетонных смесей может оказать положительное влияние на качество покрытия за счёт снижения объемов волнообразования перед рабочими органами.

3. Полученные данные касательно снижения объемов перемещения материала перед рабочим органом схожи и согласуются с

результатами подобных экспериментов [20], изучавших укатку материала посредством упругодеформируемого ленточного элемента. Это косвенно подтверждает правильность выдвинутой гипотезы и полученных результатов.

4. Ввиду того что уплотнение материалов при помощи вальцов – это сложный, комплексный и разносторонний вопрос, затрагивающий значительный объем научных знаний, рассмотреть их в одном эксперименте невозможно. Поэтому рекомендуются дальнейшие эксперименты на основе данной и иных статей, описывающих работу комбинированного уплотняющего оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Liu N., Liu L., Li M., Sun L. A comprehensive review of warm-mix asphalt mixtures: mix design, construction temperatures determination, performance and life-cycle assessment. *Road Materials and Pavement Design*. 2023; 25(11): 1-46. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2268194>.
2. Wang Y., Li J., Zhang X., Yao Y., Peng Y. Recent Development in Intelligent Compaction for Asphalt Pavement Construction: Leveraging Smart Sensors and Machine Learning. *Sensors*. 2024; 24(9): 2777. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24092777>.
3. Androjić, I., Dimter, S. Influence of Compaction Temperature on the Properties of Marshall Specimens. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2015; 10(4): 309-315. DOI: <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2015.39>.
4. Bopche L.M. Review On Evolution and Development of Electric Road Roller. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*. 2024; 08(04): 1-5. DOI: [10.55041/IJSREM30373](https://doi.org/10.55041/IJSREM30373).
5. Dan, H., Li, S., Chen, J., & Li, W. Dynamic response and compaction evaluation of asphalt pavement in different infrastructure types through an energy-based approach. *Construction and Building Materials*. 2025; 479: 141501. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141501>.
6. Bashash, A., Ahari, R. S., & Shahverdizadeh, G. H. Mechanical properties of metakaolin and granulated blast-furnace slag-based roller-compacted geopolymer concrete containing 100 % reclaimed asphalt pavement: Optimization and prediction via response surface methodology. *Construction and Building Materials*. 2025; 473: 140956. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140956>.
7. Павлов С.А. Упруго-деформируемый ленточный элемент: теория и применение в строительных конструкциях // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2023. № 4. С. 45–56.
8. Павлов С.А. Моделирование работы упруго-деформируемого ленточного элемента в несущих системах // *Современные проблемы строительства и транспорта*. 2022. С. 112–118.
9. Hafezzadeh, R., Autelitano, F., & Giuliani, F. Performance-related methods for the characteriza-

tion of cold mix patching materials used in asphalt pavements maintenance. *Case Studies in Construction Materials*. 2023; 19: e02600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02600>

10. Li, X., Hu, X., Pan, P., Fuentes, L., & Walubita, L. F. Establishment of some parametric criteria for standardizing the stirring and blending conditions of using RPAF as an asphalt-binder modifier. *Construction and Building Materials*. 2021; 272: 121944. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121944>

11. Казаков О.Ю., Кустарев Г.В. Экспериментальный стенд и методика для исследования рабочего органа катка // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 4. С. 408–415.

12. Haghshenas H.F., Jahangiri B., Liu Z., Mensching D.J., Shen S., Yu S. Development of field compaction curves for asphalt mixtures based on laboratory workability tests and machine learning modeling. *Construction and Building Materials*. 2025; 479: 141520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141520>

13. Usanga I.N., Inyang E.O., Ikeagwuani C.C. Investigation of deformation characteristics of asphalt mixtures containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binders using laboratory simulations. *Hybrid Advances*. 2025; 10: 100426. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100426>

14. Chu F., Li Q., Sun C., Luo Y., Li J., Feng J., Zhang H. Investigation on the pavement performance and application of cold mix emulsified asphalt mixture in the surface layer. *Journal of Cleaner Production*. 2025; 507: 145542. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145542>

15. Hu X., Dong Q., Shi B., Chen X., Yao K., Yuan X. Moisture migration characterization of bitumen emulsion-based cold-mix asphalt mixture over curing based on capacitive measurement. *Measurement*. 2025; 253(D): 117791. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117791>

16. Li F., Wang L., Zhang X., Li J., Gao Y., Su N. Evaluating thermal activated coal gangue as alternative filler in asphalt binder using rheological experiments and molecular dynamic simulation. *Construction and Building Materials*. 2024; 443: 137782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137782>

17. Akinmade D., Anupam K., Kasbergen C., Erkens S., Samson D., Marco P. Performance of natural asphalt as a paving material: A laboratory and field evaluation. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 21: e03823. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03823>

18. Zartoshti Ilbeygi A.A., Roshni R., Khabiri M.M., Rezaei N. Experimental evaluation of industrial waste powders as fillers in hot mix asphalt by response surface method. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management*. 2025; 178(2): 73-85. DOI: <https://doi.org/10.1680/jwarm.24.00018>

19. Sarı F.A., Öztürk İ.Ş., Gönen T., Emiroğlu M. Evaluation of waste metallic powder as fine aggregate replacement in Roller compacted concrete: Impact on

physical and mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 2025; 468: 140386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140386>

20. Zhao M., Liu Y., Xu X., Pei Y., Zhang C., Wu C. Advancements in asphalt pavement recycling: Integrating falling weight impact signals for enhanced rehabilitation efficiency. *Case Studies in Construction Materials*. 2025; 22: e04312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04312>

REFERENCES

1. Liu N., Liu L., Li M., Sun L. A comprehensive review of warm-mix asphalt mixtures: mix design, construction temperatures determination, performance and life-cycle assessment. *Road Materials and Pavement Design*. 2023; 25(11): 1-46. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2268194>

2. Wang Y., Li J., Zhang X., Yao Y., Peng Y. Recent Development in Intelligent Compaction for Asphalt Pavement Construction: Leveraging Smart Sensors and Machine Learning. *Sensors*. 2024; 24(9): 2777. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24092777>

3. Androjić, I., Dimter, S. Influence of Compaction Temperature on the Properties of Marshall Specimens. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2015; 10(4): 309-315. DOI: <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2015.39>

4. Bopche L.M. Review On Evolution and Development of Electric Road Roller. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*. 2024; 08(04): 1-5. DOI:10.55041/IJSREM30373.

5. Dan H., Li S., Chen J., & Li W. Dynamic response and compaction evaluation of asphalt pavement in different infrastructure types through an energy-based approach. *Construction and Building Materials*. 2025; 479: 141501. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141501>

6. Bashash A., Ahari R.S., & Shahverdizadeh G.H. Mechanical properties of metakaolin and granulated blast-furnace slag-based roller-compacted geopolymer concrete containing 100 % reclaimed asphalt pavement: Optimization and prediction via response surface methodology. *Construction and Building Materials*. 2025; 473: 140956. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140956>

7. Pavlov S.A. Elastic-deformable tape element: theory and application in building structures. *Structural Mechanics and Analysis of Construction*. 2023; 4: 45–56. (in Russ.)

8. Pavlov, S.A. Modeling of elastic-deformable tape element behavior in load-bearing systems. *Sovremennyye problemy stroitelstva i transporta*. 2022: 112–118. (in Russ.)

9. Hafezzadeh, R., Autelitano, F., & Giuliani, F. Performance-related methods for the characterization of cold mix patching materials used in asphalt pavements maintenance. *Case Studies in Construction Materials*. 2023; 19: e02600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02600>

10. Li, X., Hu, X., Pan, P., Fuentes, L., & Walubita, L. F. Establishment of some parametric criteria for standardizing the stirring and blending conditions of

using RPAF as an asphalt-binder modifier. *Construction and Building Materials*. 2021; 272: 121944. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121944>

11. Kazakov, O.Yu., Kustarev, G.V. Experimental stand and methodology for studying the roller working body. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta* («Scientific and Technical Journal of Bryansk State University»). 2019; 4: 408–415. (in Russ.)

12. Haghshenas H.F., Jahangiri B., Liu Z., Mensching D.J., Shen S., Yu S. Development of field compaction curves for asphalt mixtures based on laboratory workability tests and machine learning modeling. *Construction and Building Materials*. 2025; 479: 141520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141520>

13. Usanga I.N., Inyang E.O., Ikeagwuani C.C. Investigation of deformation characteristics of asphalt mixtures containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binders using laboratory simulations. *Hybrid Advances*. 2025; 10: 100426. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100426>

14. Chu F., Li Q., Sun C., Luo Y., Li J., Feng J., Zhang H. Investigation on the pavement performance and application of cold mix emulsified asphalt mixture in the surface layer. *Journal of Cleaner Production*. 2025; 507: 145542. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145542>

15. Hu X., Dong Q., Shi B., Chen X., Yao K., Yuan X. Moisture migration characterization of bitumen emulsion-based cold-mix asphalt mixture over curing based on capacitive measurement. *Measurement*. 2025; 253(D): 117791. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117791>

16. Li F., Wang L., Zhang X., Li J., Gao Y., Su N. Evaluating thermal activated coal gangue as alternative filler in asphalt binder using rheological experiments and molecular dynamic simulation. *Construction and Building Materials*. 2024; 443: 137782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137782>

17. Akinmade D., Anupam K., Kasbergen C., Erkens S., Samson D., Marco P. Performance of natural asphalt as a paving material: A laboratory and field evaluation. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 21: e03823. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03823>

18. Zartoshti Ilbeygi A.A., Roshni R., Khabiri M.M., Rezaei N. Experimental evaluation of industrial waste powders as fillers in hot mix asphalt by response surface method. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management*. 2025; 178(2): 73-85. DOI: <https://doi.org/10.1680/jwarm.24.00018>

19. Sarı F.A., Öztürk İ.Ş., Gönen T., Emiroğlu M. Evaluation of waste metallic powder as fine aggregate replacement in Roller compacted concrete: Impact on physical and mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 2025; 468: 140386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140386>

20. Zhao M., Liu Y., Xu X., Pei Y., Zhang C., Wu C. Advancements in asphalt pavement recycling: Integrating falling weight impact signals for enhanced

rehabilitation efficiency. *Case Studies in Construction Materials*. 2025; 22: e04312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04312>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Казakov О.Ю. Патентование разработанной конструкции уплотняющего оборудования; разработка и конструирование лабораторного стенда; проведение экспериментального исследования, анализ, упорядочивание и представление результатов исследования, формирование выводов; написание, корректировка и перевод научной статьи.

Савельев А.Г. Помощь в планировании и качественном анализе полученных результатов экспериментального исследования; руководство, указания и рекомендации по структуре и оформлению статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

O.Yu. Kazakov Compaction equipment design patenting; development and construction of the laboratory stand; conducting experimental study, analyzing, organizing and presenting research results, drawing up conclusions; writing, correcting and translating the scientific article.

A.G. Savelyev Assistance in planning and qualitative analysis of the obtained results of the experimental study; guidance, instructions and recommendations on the article structure and design.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Казakov Олег Юрьевич – соискатель, инженер-конструктор 1-й категории Конструкторского бюро точного машиностроения им. А.Э. Нудельмана (117342, г. Москва, ул. Введенского, 8).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5747-6072>,

SPIN-код: 6271-4855,

e-mail: 4informatika@mail.ru.

Савельев Андрей Геннадьевич – д-р техн. наук, проф. Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, г. Москва, Ленинградский пр., 64).

SPIN-код: 7256-5030,

e-mail: prof.saveliev@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oleg Y. Kazakov – applicant, design engineer (1-st category), A.E. Nudelman Precision Engineering Design Bureau (8, Vvedenskogo Street, Moscow, 117342).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5747-6072>,

SPIN-код: 6271-4855,

e-mail: 4informatika@mail.ru

Andrey G. Savelyev – Dr. of Sci. (Eng.), professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (64, Leningradskiy Avenue, Moscow, 125319).

SPIN-код: 7256-5030,

e-mail: prof.saveliev@yandex.ru

Научная статья
УДК 62-82:625.74
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-356-367>
EDN: DOFLIH



ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ГИДРОПРИВОДА АЭРОДРОМНОЙ ТЕХНИКИ

И.В. Лесковец¹ ✉, А.А. Грац², В.Д. Рогожин¹

¹Белорусско-Российский университет,
г. Могилев, Республика Беларусь

²Национальный аэропорт Минск,
г. Минск, Республика Беларусь

✉ ответственный автор
leskovets1966@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье представлен обзор современных методов диагностирования мобильных машин. Выделены направления диагностирования: с помощью применения алгоритмов, основанных на использовании комплекса контроллеров, предназначенных для сбора и хранения актуальной диагностической информации; искусственного интеллекта, позволяющего выполнить поэтапное диагностирование на основе текущей информации о скоростях движения гидродвигателей, давления и скорости жидкости. А также отмечены направления использования статопараметрических методов, позволяющих определить состояние рабочей жидкости и спрогнозировать состояние различных узлов гидропривода; показателей состояния фильтра для оценки степени износа шестеренных насосов; системы показателей, позволяющих установить остаточный ресурс элементов гидропривода.

Материалы и методы. Авторами предлагается применить уравнение Бернулли для определения скоростных и пьезометрических напоров на выбранных участках гидропривода с целью построения цифровой модели в виде кривой гидравлического уклона. Отмечается, что для гидросистем, оснащенных гидромоторами, возможно получение разных режимов работы гидравлических участков при минимальной и максимальной частоте вращения насосов, что дает возможность анализа работы гидросистемы при давлениях, которые изменяются в широком диапазоне. Цифровая модель строится на основании известных зависимостей, позволяющих теоретическим путем определить скоростной и пьезометрический напоры на разных участках гидросистемы.

Результаты. Применение данной цифровой модели на различных участках во время технического обслуживания гидропривода и сравнение измеренных показателей и теоретических на участках гидросистемы позволит установить его исправность или спрогнозировать выход из строя.

Обсуждение и заключение. Данный подход позволит своевременно провести ремонтные работы и исключить внезапный выход техники из строя.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: диагностирование, гидропривод, скоростной напор, пьезометрический напор, остаточный ресурс, аэродромная техника

Статья поступила в редакцию 01.04.2025; одобрена после рецензирования 18.04.2025; принята к публикации 16.06.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Лесковец И.В., Грац А.А., Рогожин В.Д. Диагностирование гидропривода аэродромной техники // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 3. С. 356-367. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-356-367>

© Лесковец И.В., Грац А.А., Рогожин В.Д., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-356-367>

EDN: DOFLIH

DIAGNOSTICS OF HYDRAULIC DRIVE OF AIRFIELD EQUIPMENT

Igor' V. Leskovets¹ ✉, Alexandr A. Grats², Vladimir D. Rogozhyn³

¹Belarusian-Russian University,
Mogilev, Republic of Belarus

²Minsk National Airport,
Minsk, Republic of Belarus

✉ corresponding author
leskovets1966@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The article presents an overview of modern diagnostic methods for mobile machines. The directions of diagnosis are outlined: with the applications of algorithms based on the use of a complex of controllers designed to collect and store up-to-date diagnostic information; with the help of artificial intelligence allowing to perform step-by-step diagnostics on current information about the speed of hydraulic motors, pressure and fluid velocity. The article also demonstrates the ways for using parametric statistical methods that are possible to determine the state of the working fluid and predict the state of various hydraulic drive units; filter condition indicators for assessing the wear degree of gear pumps; a system of indicators demonstrating unconsumed residual resource of hydraulic drive elements.

Materials and Methods. The authors propose to use the Bernoulli equation to determine the velocity and piezometric heads in selected sections of the hydraulic drive in order to construct a digital model in the form of a hydraulic slope curve. It is noted that for hydraulic systems equipped with hydraulic motors, it is possible to obtain different operating modes of hydraulic sections at minimum and maximum pump speeds, which makes it capable to analyze the operation of the hydraulic system at pressures that vary over a wide range. The digital model is built on the basis of known dependencies, which theoretically allow us to determine the velocity and piezometric pressures in different parts of the hydraulic system.

Results. The application of this digital model in various areas, during maintenance of the hydraulic drive and a comparison of the measured values in the sections of the hydraulic system with the theoretical ones will make it possible to establish its serviceability or predict failure.

Discussions and Conclusions. The proposed approach will allow to carry out repairs in a timely manner and eliminate sudden equipment failure.

KEYWORDS: diagnostics, hydraulic drive, velocity pressure, piezometric head, unconsumed residual resource, airfield equipment

The article was submitted: April 01, 2025; approved after reviewing: April 18, 2025; accepted for publication: June 16, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Leskovets I.V., Grats A.A., Rogozhyn V.D. Diagnostics of hydraulic drive of airfield equipment. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (3): 356-367. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-356-367>

© Leskovets I.V., Grats A.A., Rogozhyn V.D., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

В качестве средств для поддержания аэродрома в рабочем состоянии используется специальная техника на базе тракторов и автомобилей. К такой технике можно отнести снегоочистители, уборочные машины, тепловые машины, поливочную и пожарную технику. Рабочее оборудование этих машин, как правило, приводится в действие с помощью гидропривода, эксплуатация техники производится в летний и зимний периоды. К особенностям данных машин можно отнести повышенные требования к надежности. Это обусловлено тем, что содержание аэродромов относится к работам, которые необходимо выполнять в любое время года, независимо от погодных условий. Одним из важнейших показателей работоспособности техники является коэффициент готовности, его значение должно стремиться к единице. Таким образом, необходимо снижать количество незапланированных ремонтов, чтобы время вынужденных простоев было равно нулю.

Как правило, поддержание техники в работоспособном состоянии осуществляется с помощью системы планово-предупредительного ремонта (ППР) [1]. Комплекс мероприятий, применяемый на основе системы ППР, предусматривает проведение нескольких видов плановых технических обслуживаний, направленных на поддержание техники в исправном состоянии и своевременном выявлении неисправностей, которые могут оказать влияние на работоспособность машин. При эксплуатации техники система ППР предусматривает не только проведение технических обслуживаний, но и диагностирование механизмов машин, предназначенное для своевременного выявления повреждений в случае внезапных отказов.

Современный гидропривод, который используется в аэродромной технике, отличается большой сложностью и высокой степенью автоматизации. К задачам диагностирования таких гидроприводов можно отнести поиск возникших неисправностей, а также прогнозирование остаточного ресурса и возникновения дефектов в период эксплуатации между техническими обслуживаниями.

В настоящее время в области диагностирования мобильных машин, оснащенных гидроприводом, образовалось несколько направлений. К таким направлениям можно отнести работы, которые нацелены на создание комплекса систем для диагностирования и определения фактического состояния техники в

целом [2]. Целью работы является создание алгоритмов определения технического состояния техники на основе использования комплекса контроллеров, который собирает диагностическую информацию с различных узлов отдельной машины или нескольких машин. Рекомендуется использовать универсальный программируемый бортовой контроллер, который предназначен для фиксации параметров и управления исполнительными устройствами по определенным критериям. Кроме того, предлагается специализированное программное обеспечение, дающее возможность применения терминального доступа для организации исследования технического состояния различных моделей строительных и дорожных машин. Данные терминальные решения позволяют использовать полученную информацию для различных целей, в том числе для контроля технического состояния машины, накопления статистической информации, формирования на её основании заключений о возможных неисправностях и остаточном ресурсе техники.

Одним из направлений комплексного диагностирования машин, оснащенных гидроприводом, является использование искусственного интеллекта [3]. Авторами исследования отмечается, что расходы на эксплуатацию гидрофицированных экскаваторов в значительной степени зависят от региона эксплуатации, производителя и типа машины и могут составлять до 30–40% от других затрат. Наиболее частыми отказами для такой техники являются отказы гидравлических компонентов: фитингов, трубок, шлангов, клапанов и уплотнений. В этом случае требуется постоянный мониторинг, осмотр и замена элементов для поддержания экскаватора технической готовности. В статье предлагается применение теории искусственного интеллекта, которая позволяет разбить диагностирование состояния гидравлической системы экскаватора на несколько уровней, включающих прямое диагностирование неисправностей в гидравлической системе по физическим величинам, включающим давление, температуру, расход и скорость движения. Ко второму уровню авторы относят использование комбинированного анализа данных, основанного на установленных в гидроприводе датчиках. Для автоматизации процесса контроля и диагностирования предлагается использовать нейронную сеть, работа которой основана на анализе дерева неисправностей. Использование в качестве инструмента для прогнозирования ресурса

различных компонентов гидравлических систем является перспективным методом технической диагностики, их применение позволяет обеспечить контроль действия оператора, предотвратить выход из строя оборудования вследствие неправильной работы.

Авторами исследования, посвященного повышению эффективности методов диагностирования гидропривода строительных и дорожных машин [4], отмечается, что в настоящее время распространение нашел статопараметрический метод, основанный на анализе состояния рабочей жидкости [5]. Препятствием для распространения данного метода является возникновение проблем с циркуляцией рабочей жидкости, вследствие чего возникают проблемы со смазывающей способностью очистительными и охлаждающими функциями гидравлической жидкости, что может привести к серьезному снижению ресурса элементов гидропривода, удаленных от насосной станции. Авторами проведены исследования, показывающие, что в гидродвигателях, значительно удаленных от насосной станции, где не осуществляется полная циркуляция рабочей жидкости, отклонения кислотности и массовая доля механических примесей значительно отличаются в худшую сторону по сравнению с гидродвигателями, где происходит полная циркуляция рабочей жидкости. Авторами данного исследования предлагается внедрение дополнительных систем фильтрации, установленных на входе и выходе из гидродвигателей, в которых циркуляция рабочей жидкости не обеспечивается из-за конструктивных параметров гидравлической системы.

В работе [6] на основе экспериментальных испытаний доказано, что с течением времени при эксплуатации шестеренных насосов гидромеханических передач происходит ухудшение их характеристик. Исследования проводились на специальном стенде, который позволяет измерять расходы, возникающие при работе гидромеханической коробки передач. При диагностировании гидравлической системы авторами предлагается определять гидравлическое сопротивление фильтра, которое влияет на пропускную способность в связи с тем, что гидравлическое сопротивление возрастает с течением времени в процессе эксплуатации гидропривода. Авторами установлено, что значительное влияние на диагностируемые параметры имеет температура рабочей жидкости. Предложена методика оценки технического состояния гидравлической передачи на основе анализа изменения диагностических

параметров с учетом закономерностей отклонения этих параметров от допустимых значений. В исследовании [7] представлено специализированное гидравлическое оборудование для испытания шестеренных насосов, которое на основании диагностических показателей позволяет установить состояние оборудования. Методы диагностирования постоянно совершенствуются, в том числе проводятся разработки применения различных способов и последовательностей диагностирования, в зависимости от возникших неисправностей [8]. Авторами разрабатываются и внедряются диагностические устройства и стенды для повышения эффективности диагностирования гидропривода, сокращения затрат и времени на определение неисправностей [9].

Авторы в статье [10] отмечают, что остаточный ресурс машины является основой для прогнозирования работоспособности, рекомендуется определять его значения по динамике диагностических параметров в процессе наработки от номинального до предельного значений. Остаточный ресурс машины предлагается определять через текущее значение контролируемых параметров инструментальными методами. В этом случае от точности определения текущих значений контролируемых параметров значительно зависит достоверность получаемых результатов. Установление динамики изменения измеряемых параметров позволяет определить интенсивность изменения технического состояния исследуемой техники. Одним из важнейших показателей определения состояния элементов гидропривода машины является давление и перепад давления между точками измерения. Измерение давления с помощью манометров требует разгерметизации системы при их подключении, что сопровождается возможными потерями гидравлической жидкости и имеет достаточно большую трудоемкость. Авторами исследования с помощью разработанного комплекта диагностирования гидропривода реализован тепловой метод диагностики, основанный на фиксации изменения температуры поверхности сборочных единиц, что позволяет определить нагрузочные режимы, в которых работают сборочные единицы, и на основании сравнения с эталонными сделать вывод о техническом состоянии сборочных единиц и гидросистемы в целом.

Авторами исследования [11] предлагается использовать специальные датчики, которые позволят установить уровень загрязнения гидравлического масла и на основе этой инфор-

мации определить работоспособность и остаточный ресурс гидравлического оборудования. В работе [12] обоснована необходимость повышения требований к гидравлическим жидкостям строительных машин. Обоснование аргументировано повышением удельных мощностей и нагрузок на гидравлическое оборудование. В [13] определена интенсивность износа рабочих элементов для различных уровней загрязнения масла твердыми частицами. Результаты экспериментов показали, что существуют различия между теоретически рассчитанным и измеренным расходом через радиальный зазор. При измерении значений перепада давления во время прохождения жидкости через клапан установлено, что масла с самым низким уровнем чистоты имеют больший разброс измеренных значений. Значительное внимание уделяется авторами исследования [14] совершенствованию существующих и разработке новых диагностических систем, методических рекомендаций по организации и технологии диагностирования гидравлических элементов с целью установления предполагаемого момента отказа и устранения причин его наступления в процессе технического обслуживания. Прогнозированию остаточного ресурса гидромоторов посвящена работа [15]. Исследование основано на использовании теории надежности, математической статистики и моделирования. Целью работы является повышение эксплуатационной надежности, снижению простоев и затрат на техническое обслуживание и ремонт техники.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализ методов диагностирования мобильной техники показывает, что основными направлениями являются определение остаточного ресурса системы в целом или отдельных сборочных единиц. Диагностирование предполагается осуществлять различными методами измерения прямых и интегральных показателей работающего гидропривода, а также измерения показателей качества гидравлической жидкости. Все методы, направленные на определение остаточного ресурса машин, не вполне подходят для выявления локальных неисправностей машин гидравлических аппаратов и гидролиний.

Если рассматривать работу гидропривода на основании уравнения Бернулли, то можно утверждать, что напор на выходе из насоса равен напору на любом участке трубопровода

$$z + \frac{P}{\rho g} + \alpha \frac{v_{cp}^2}{2g} = \sum_i \left(z_i + \frac{P_i}{\rho g} + \alpha_i \frac{v_{cp,i}^2}{2g} + h \right), \quad (1)$$

где z, z_i – потери в местных сопротивлениях;

P – пьезометрический напор жидкости на участке;

ρ – плотность жидкости;

g – гравитационное ускорение;

α – коэффициент Корриолиса;

$v_{cp}, v_{cp,i}$ – средняя скорость жидкости на участке;

h – геометрический напор.

С использованием систем мониторинга пьезометрического напора, определяемого манометрами в характерных точках гидропривода, можно установить его значения в каждой из этих точек. В связи с тем, что пьезометрический напор современного гидропривода и средние скорости жидкости на участках достаточно велики, то для исключения несущественных переменных значениями h можно пренебречь. Учитывая, что скоростной напор является функцией подачи и диаметра сечения трубопровода, имеется возможность установления потерь давления в характерных точках гидропривода на машине, которая находится в начальной стадии эксплуатации. Напор жидкости зависит от нагрузок на рабочее оборудование и подачи насоса, поэтому важным будет выбор режима нагружения гидропривода при проведении тестирования. Для диагностирования гидропривода по мощности имеются рекомендации применения режима максимальной нагрузки, т.к. в этом случае насос развивает максимальное давление, однако в условиях проведения технического обслуживания режим максимальной нагрузки не всегда и не для всех гидродвигателей можно реализовать. Поэтому предлагается использовать режим холостого хода, который легко реализуется для гидродвигателей поступательного и вращательного действия. В этом случае расход жидкости определяется на основе замера скорости движения гидродвигателя поступательного действия, или частоты вращения гидродвигателя вращательного действия. В то же время при проведении диагностирования имеется возможность использования различных режимов работы насоса, соответствующих диапазону от минимальной до максимальной частоты вращения. Таким образом, оптимальным представляется принять режим номинальной частоты вращения насоса, т.к. в этом случае достигается максимальный теоретический к.п.д.

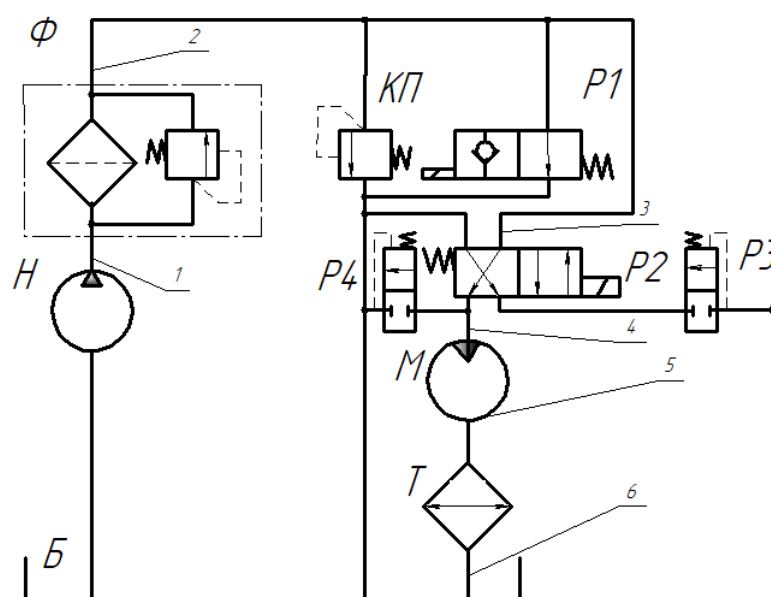


Рисунок 1 – Фрагмент гидравлической схемы машины уборочной аэродромной:
1, 2, ..., 6 – гидравлические участки; Б – гидробак; Н – насос шестеренный;
Ф – фильтр; КП – клапан предохранительный; P1, P2, P3, P4 – гидрораспределители;
М – гидромотор; Т – теплообменник
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Fragment of the hydraulic diagram of the airfield sweeping machine
1, 2, ..., 6 – hydraulic sections, Б – hydraulic tank, Н – gear pump,
F – filter, KP - safety valve, P1, P2, P3, P4 – hydraulic distributors,
M – hydraulic motor, T – heat exchanger
Source: compiled by the authors.

На основании полученного расхода определяются скорости движения жидкости на участках трубопроводов, что позволяет установить скоростные напоры и определить значение одного из членов уравнения Бернулли. Таким образом, для определения скоростного напора не требуется установка расходомеров, что, как правило, сопряжено с разгерметизацией трубопроводов и потерями гидравлической жидкости и внесением в гидравлическую жидкость загрязнений.

Рассмотрим фрагмент гидравлической схемы аэродромной щетки, представленной на рисунке 1.

В гидравлической схеме используются: гидронасос Н – насос шестеренный GP20K - R2,5; М – гидромотор A2-16/25 07.6; гидроаппараты: Ф – фильтр ФГИ-20/3 KB(MB), P1 – гидрораспределитель KV 2/2-10, P2 – гидрораспределитель KV 4/2-5KO-10-2A-L, P3 – гидрораспределитель KV 2/2-10, P4 – гидрораспределитель KV 2/2-10; Т – теплообменник 4000-52.13.200.00. Рабочее давление гидросистемы составляет 20 МПа, максимальное кратковременное давление – 25 МПа.

Рабочий объем гидронасоса 20 см³, рабочий объем гидромотора 16 см³. При включении гидрораспределителя P1 рабочая жидкость по линии 3 направляется к гидрораспределителю P2 и на гидромотор, а затем в гидробак через теплообменник. При повышении давления выше номинального срабатывает предохранительный клапан КП, через который жидкость направляется в гидробак. При возникновении динамических нагрузок на гидромоторе срабатывает гидрораспределитель P4, после чего жидкость, проходящая через распределитель P2, направляется в гидробак. Работа гидрораспределителей P1 и P2 обеспечивается электронной системой управления рабочим оборудованием.

Одним из параметров, формирующим давление в гидросистеме при работе на холостом ходу, является скорость рабочей жидкости, которая определяется подачей насоса. Подача насоса зависит от его частоты вращения и высчитывается по формуле

$$Q_n = q_n 10^6 n_n \eta_n, \quad (2)$$

где q_n – рабочий объем насоса, для шестерённого насоса GP20K – R2,5 рабочий объем равен 20 см³;

n_n – частота вращения насоса, для первого случая примем 100 мин⁻¹;

η_n – механический КПД насоса, рекомендуется принять $\eta_n = 0,96$.

На основании условия неразрывности потока частота вращения вала гидромотора измеряется по формуле

$$n_m = \frac{Q_n \cdot \eta_n}{q_m}, \quad (3)$$

где q_m – рабочий объем гидромотора.

Скорость жидкости на участках считается по формуле

$$V_i = \frac{4 \cdot Q_n}{\pi \cdot d_i^2}, \quad (4)$$

где d_i – диаметр i -го участка.

На основании уравнения Бернулли скоростной напор на участках определяется по формуле¹ [14]

$$P_i V_i = \frac{V_i^2}{2 \cdot g}, \quad (5)$$

где P_i – давление на i -м участке.

Давление на каждом i -м участке отличается и зависит от потерь давления на трение по длине участка, потерями в местных сопротивлениях и потерями в гидроаппаратах.

Потери давления на трение на участках гидросхемы измеряются по формуле

$$\Delta P_i = \frac{\rho \cdot \lambda_i \cdot l_i \cdot V_i^2}{2 \cdot d_i}, \quad (6)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения, который зависит от числа Рейнольдса и относительной шероховатости стенок трубопровода.

Число Рейнольдса является критерием для определения режима движения и выбора способа определения коэффициента гидравлического трения. Число Рейнольдса считается по формуле

$$Re_i = \frac{V_i d_i}{\nu}, \quad (7)$$

где ν – кинематическая вязкость гидравлической жидкости.

Для исследуемой гидравлической схемы в исследуемых режимах движения жидкости

$$Re_{кр} < Re_i < \frac{10}{\Delta_r}, \quad (8)$$

где Δ_r – относительная шероховатость, значение которой определяется по формуле

$$\Delta_r = \frac{\Delta_s}{d}, \quad (9)$$

где Δ_s – эквивалентная шероховатость, значение которой высчитывается на основании ГОСТ 6286–2017, в связи с тем, что в исследуемой гидравлической схеме трубопроводы выполнены в виде рукавов высокого давления $\Delta_s = 3$ мкм.

Коэффициенты гидравлического трения на участках трубопроводов определяются по формуле

$$\lambda_i = 0,3164 \frac{1}{Re_i^{0,25}}. \quad (10)$$

Результаты, полученные на основании зависимостей (5)–(9) занесем в таблицу 1.

Потери давления в местных сопротивлениях зависят от типа местного сопротивления и коэффициента местных сопротивлений и вычисляются по формуле

$$\Delta PM = \sum_{i=1}^n 0,5 \cdot \xi_i \cdot \rho \cdot V_i^2, \quad (11)$$

где ξ – коэффициент местного сопротивления.

В таблице 2 представлены значения коэффициентов местных сопротивлений и потерь давления в местных сопротивлениях.

Значительное влияние на величины давления на гидравлических участках в исследуемом контуре оказывает гидромотор, который развивает момент, зависящий от угловой скорости щетки

$$M_m = J \cdot \omega_m, \quad (12)$$

где J – момент инерции щетки,

ω – угловая скорость вращения щетки.

Тогда перепад давления на гидромоторе высчитывается по формуле

¹ Исаев А.П., Кожевникова Н.Г., Ешин А.В. Гидравлика: учебник. М.: ИНФРА-М, 2019. 420 с. (Высшее образование: Бакалавриат). ISBN 978-5-16-009983-5. Текст : электронный. URL: <https://znanium.com/catalog/product/937454>.

Таблица 1

Результаты расчета потерь давления на трение по длине трубопроводов

Источник: составлено авторами.

Table 1

Calculation results of friction pressure losses along the length of the pipelines

Source: compiled by the authors.

Номер участка	Марка трубопровода	Диаметр трубопровода, мм	Длина трубопровода, м	Скорость жидкости, м/с	Число Рейнольдса	Относительная шероховатость, мкм	Коэффициент гидравлического трения	Потери давления, кПа
1	DN 31	31	3	5,088	3356	0,01	0,042	44,78
2	DN25	25	1,5	7,823	4161	0,012	0,039	62,2
3	DN25	25	1,5	7,823	4161	0,012	0,039	62,2
4	DN25	25	1,5	7,823	4161	0,012	0,039	62,2
5	DN25	25	1,5	7,823	4161	0,012	0,039	62,2
6	DN25	25	1,5	7,823	4161	0,012	0,039	62,2

Таблица 2

Значения коэффициентов местных сопротивлений и потерь давления в местных сопротивлениях

Источник: составлено авторами.

Table 2

Values of local resistance coefficients and pressure losses in local resistances

Source: compiled by the authors.

Номер участка	Значения коэффициентов местных сопротивлений					Потери давления в местных сопротивлениях, кПа
1	0,5	0,2	-	-	-	7,791
2	0,2	0,5	1	0,15	1	7,5
3	0,5	1	0,5	1	1	10,53
4	0,5	1	0,5	1	1	92,1
5	0,5	-	0,5	1	1	78,94
6	0,5	1	-	-	-	39,47

Таблица 3

Величины перепада давления в гидроаппаратах

Источник: составлено авторами.

Table 3

Pressure drop values in hydraulic apparatus

Source: compiled by the authors.

Номер участка	Наименование гидроаппарата	Потери давления, кПа
1	Ф – фильтр ФГИ-20/3 КВ(МВ)	80
2	гидрораспределитель KV 2/2-10	100
3	гидрораспределитель KV 4/2-5KO-10-2A-L	100
4	гидромотор A2-16/25 07.6	2590
5	теплообменник 4000-52.13.200.00	100

$$\Delta P = \frac{2 \cdot \pi \cdot M_m}{q_m} \quad (13)$$

Кроме давления, создаваемого в гидроприводе для привода гидромотора, давление создается гидроаппаратами, величина этого

перепада давления определяется производителем и представлена в технической документации.

Величины перепада давления в гидроаппаратах и на гидромоторе при частоте вращения насоса 100 мин⁻¹ представлены в таблице 3.

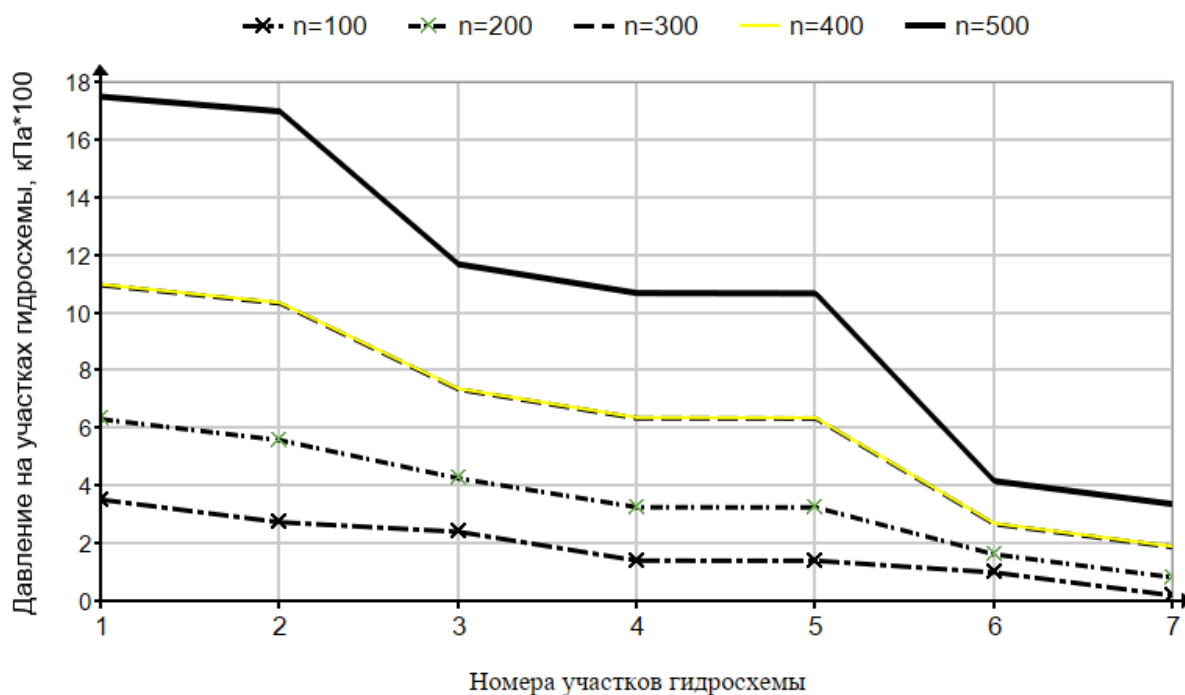


Рисунок 2 – Графики гидравлических уклонов на участках гидросистемы
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Graphs of hydraulic gradients at hydraulic system sections
Source: compiled by the authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Потери давления на каждом участке складываются из потерь давления на трение, в местных сопротивлениях, потерь давления в гидроаппаратах и на гидромоторе. Если изменить подачу насоса, то изменится частота вращения гидромотора, и, как следствие, изменится вращающий момент, развиваемый гидромотором, и давление на участках исследуемой гидросистемы. Таким образом, можно построить пакет теоретических кривых гидравлического уклона на данных участках гидропривода. Графики кривых гидравлического уклона для разных частот вращения насоса на участках гидросистемы представлены на рисунке 2.

Представленный на рисунке 2 набор кривых является теоретической цифровой моделью конкретного участка гидросистемы. Измерения давления на различных участках и его фиксация во время технических обслуживаний машины позволит накопить информацию об утечках и возможном увеличении давления, позволит создать базу данных о текущем состоянии конкретных гидравлических аппаратов. Сопоставление полученных результатов с теоретической кривой гидравлического уклона позволит определить возможное ухудшение технического состояния из-за естественного

износа, загрязнения гидравлической жидкости, расслоения рукавов высокого давления. Наличие данной технической информации позволит эксплуатирующей организации сделать своевременные выводы о техническом состоянии техники и принять меры для своевременной замены гидравлической жидкости, фильтров или гидроаппаратов.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании уравнения Бернулли и известных методик определения потерь давления на участках трубопроводов гидросистемы представлена методика построения пьезометрического напора на участках трубопроводов, расположенных в контуре привода гидравлического мотора. Анализ полученных пьезометрических кривых показывает, что на разных участках выбранной ветви гидравлической схемы давление жидкости имеет конкретные значения и зависит от параметров трубопроводов, местных сопротивлений и гидроаппаратов. Анализ величин давления на различных участках трубопроводов позволяет установить места для установки манометров во время диагностирования гидропривода. Эти места определяются перепадом давления в характерных точках. Полученные теоретическим путем кон-

кретные величины давления на участках характеризуют нормальную работу гидросистемы. Отклонения практически измеренных величин давления от теоретических значений в большую или меньшую сторону может служить признаком неисправности. Таким образом, полученные результаты могут оказать помощь при поиске внезапно возникших неисправностей гидропривода. Ведение протоколов измерений практических значений измеренных давлений в выбранных характерных точках участков гидросистемы может поспособствовать в прогнозировании неисправностей гидросистемы. Практически полученные значения конкретных измерений давления могут зависеть от различных параметров, которые не имеют отношения к исследуемой системе, например, температуры окружающего воздуха, температуры и вязкости рабочей жидкости. Сравнение результатов измерения давления в разные периоды работы машины могут помочь установить зависимость давлений, измеряемых в определенных точках гидропривода, определить направление изменения давлений в сторону увеличения или уменьшения. Постоянное направление изменения давления и постоянное увеличение отклонений от теоретических величин по методике, представленной авторами статьи, позволят предположить, что в гидросистеме происходят процессы, которые могут привести к внезапному отказу техники. Мониторинг изменения измеряемых давлений может оказать помощь эксплуатирующим организациям в выборе времени для постановки техники на текущий ремонт для своевременной замены гидроаппаратов или для их ремонта, исключив возникновение внезапных отказов, которые влекут за собой значительные потери средств из-за простоев техники. Для техники, к которой предъявляются повышенные требования к надежности, например, аэродромной технике, т.к. содержание в постоянной готовности аэродромных взлетно-посадочных полос имеет важнейшее значение для безопасности полетов авиации.

Предлагаемая авторами методика основана на измерении давления на участках гидропривода. Это давление формируется скоростным и пьезометрическим напором, величины которых определяются на основании уравнения Бернулли. Такой подход совпадает с методиками, предложенными другими авторами, указывающими, что давление является одним из важнейших показателей, характеризующих работу гидропривода. В отличие от рекомендаций других авторов предлагаемая методика позволяет определить теоретические значения давлений в установленных местах гидро-

привода, и на основании измеренных величин давлений во время диагностирования или технического обслуживания определить место возникшей неисправности или сделать прогноз о вероятном возникновении повреждений в будущие периоды эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная методика определения давлений на участках гидропривода гидравлического мотора основана на фундаментальном уравнении Бернулли. Эта методика позволяет детально рассчитать распределение давления жидкости вдоль всей выбранной ветви гидравлической схемы. Расчет учитывает геометрические параметры трубопроводов (диаметр, длину, шероховатость), характеристики местных сопротивлений (расширения, сужения, угольники, тройники, колена), а также рабочие параметры гидроаппаратуры (клапаны, фильтры, теплообменники) и параметры гидродвигателей. Полученные в результате расчетов пьезометрические кривые представляют собой графическое изображение изменения давления вдоль трубопровода. Анализ этих кривых позволяет оценить распределение давления на каждом участке системы, выявляя зоны перепадов давлений. Это, в свою очередь, является основой для выбора мест установки манометров для целей диагностики гидропривода. Рассчитанные давления на данных участках представляют собой теоретические значения, соответствующие нормальной работе гидросистемы. Любое отклонение фактически измеренных значений давления от теоретически рассчитанных как в сторону повышения, так и в сторону понижения может служить сигналом о возникновении неполадок в системе. Чем значительнее отклонение, тем серьезнее, вероятно, неисправность. Эта методика позволяет оперативно обнаружить проблемы, такие как засорение фильтров, расслоение рукавов высокого давления, неисправности блоков клапанов, распределителей, насоса или гидравлического мотора. Важно подчеркнуть, что своевременное выявление неисправностей позволяет предотвратить более серьезные поломки и снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций. Для более эффективного контроля состояния гидропривода планируется вести протоколы измерений давления в выбранных точках. Эти протоколы должны содержать не только значения давления, но и время измерения, рабочие параметры машины, температуру окружающей среды и другие факторы, которые могут повлиять на результаты измерений. Сравнение данных, полученных в разные периоды эксплуатации

машины, позволят выявить тенденции изменения давления, спрогнозировать возникновение неисправностей и планировать техническое обслуживание или текущий ремонт. Систематический мониторинг давления в характерных точках гидросистемы, а также сравнение полученных данных с теоретическими расчетами позволяет своевременно обнаруживать неисправности и обеспечивать безопасную работу техники. Значительные отклонения измеренных давлений от теоретических требуют анализа и своевременного реагирования для предотвращения внезапных отказов. Анализ полученных данных позволит не только выявлять существующие проблемы, но и оптимизировать работу гидросистемы в целом, повышая ее надежность и долговечность. Поэтому разработанная методика является не просто способом обнаружения неисправностей, а инструментом для постоянного мониторинга состояния и эффективного управления гидроприводом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Максименко А.Н., Бездников Д.В., Лесковец И.В., Кутузов В.В. Определение остаточного ресурса гидропривода машин // Грузовик. 2015. № 5. С. 36–43.
2. Зорин В.А., Пегачков А.А., Рузанов Е.В. Прогнозирование надежности дорожной и строительной техники с применением универсальных бортовых контроллеров // Техника и технология транспорта. 2019. № 4 (15). С. 6. URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N15-06KN419.pdf> (дата обращения: 25.03.2025)
3. Миллер А.П. Современные тенденции в области определения технического состояния гидравлических систем строительных машин // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2021. № 1. 2021. URL: https://vestnik.pstu.ru/obgtrans/archives/?id=&folder_id=9987 (дата обращения: 25.03.2025)
4. Пираматов У.А., Пугин К.Г. Повышение эффективности существующих методов диагностирования гидропривода строительно-дорожных машин // Техника и технология транспорта. 2019. № 13. URL статьи: <http://transport-kgasu.ru/files/N13-20TKR.19.pdf> (дата обращения 25.03.2025:)
5. Пираматов У.А., Пугин К.Г. Корректировка методов диагностирования гидравлических систем строительно-дорожных машин // Строительные и дорожные машины. 2019. № 5. С. 37–41.
6. Архипенко М.Ю., Строганова Н.В. Моделирование процесса диагностики шестеренных насосов // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2008. № 4 (10). С. 69–74.
7. Рынкевич С.А., Хадкевич И.Ю. Экспериментальные исследования физических свойств гидропривода мобильной машины // Вестник Белорусско-Российского университета. 2015. № 4. С. 68–78.
8. Чиликин А.А., Трушин Н.Н. Сравнительный анализ современных методов диагностики состояния гидравлических систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 3. С. 117–127.
9. Пьянзов С.В. Методика динамической оценки технического состояния объемных гидроприводов // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2019. № 2 (55). С. 184–191. DOI: <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-12184>
10. Максименко А.Н., Антипенко Г.Л., Бездников Д.В., Кутузов В.В. Повышение работоспособности гидропривода строительно-дорожных машин // Вестник Белорусско-Российского университета. 2007. № 4. С. 24–30.
11. Felix Ng., Jennifer A. Harding, Jacqueline Glass. Improving hydraulic excavator performance through in line hydraulic oil contamination monitoring // Mechanical Systems and Signal Processing. 2017. no 83. p. 176–193.
12. Blum K.H., Ellenrieder K. Validated Hydraulic Fluids for Increased Hydraulic Life // ATZoffhighway worldwide. 2017. T. 10. no. 1. p. 50–55.
13. Hydraulic fluids: Controlling contamination in hydraulic fluids // Filtration & Separation. 2010. Vol. 47, no 3 (May-June 2010) p. 28–30.
14. Зорин В.А., Нгуен Чонг М. Прогнозирование остаточного ресурса гидромоторов строительных машин по результатам имитационного моделирования // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2023. № 3. С. 15–19. DOI: 10.31044/1684-2561-2023-0-3-15-19
15. Жмуров В.В., Кобзов А.Ю., Кобзова И.О., Герасимов С.В., Жук Е.А. Средства переносного и встроенного диагностирования силовых гидроцилиндров машин по параметрам несущей способности // Механика XXI века. 2024. № 23. С. 132–139. URL https://elibrary.ru/download/elibrary_67315115_84265878.pdf. (дата обращения: 22.04.2025).

REFERENCES

1. Maksimenko A.N., Bezdnikov D.V., Leskovets I.V., Kutuzov V.V. The residual resource hydraulic machines. *Truck*. 2015; 5: 36–43. (In Russ.)
2. Zorin V.A., Pegachkov A.A., Ruzanov E.V. Forecasting of reliability of the road and construction equipment using universal onboard controllers. *Technique and technology of transport*. 2019; 4 (15): 6. URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N15-06KN419.pdf> (accessed: 25.03.2025) (In Russ.)
3. Miller A.P. Modern trends in the field of determining the technical state of hydraulic systems of construction machines. *Transport. Transport facilities. Ecology*. 2021; 1. URL: https://vestnik.pstu.ru/obgtrans/archives/?id=&folder_id=9987 (accessed: 25.03.2025) (In Russ)
4. Piramatov U.A., Pugin K.G. Piramatov U.A., Pugin K.G. Improving the efficiency of existing methods for diagnosing hydraulic drive of road construction machines. *Technique and technology of transport*. 2019; 13: 20. URL статьи: <http://transport-kgasu.ru/files/N13-20TKR.19.pdf> (accessed: 25.03.2025) (In Russ)
5. Piramatov U.A., Pugin K.G. Correction of methods of diagnostics of hydraulic systems of road

construction machines. *Construction and road building machines*. 2019; 5: 37–41. (In Russ)

6. Arkhipenko M.Yu., Stroganova N.V. Modeling of the process of diagnostics of gear pumps. *Vestnik SibADI*. 2008; 4 (10): 69–74. (In Russ)

7. Rynkevich S.A., Khadkevich I.Yu. Experimental studies of physical properties of hydraulic drive of mobile machine. *BelarusianRussian University Bulletin*. 2015; 4: 68–78. (In Russ)

8. Chilikin A.A., Trushin N.N. Comparative analysis of modern methods of hydraulic systems condition diagnostics. *Izvestiya Tula State University*. 2014; 3: 117–127. (In Russ)

9. Pyanzov S.V. Methodology of dynamic estimation of technical condition of volumetric hydraulic drives. *Izvestiya St. Petersburg State Agrarian University*. 2019; 2 (55):184–191. (In Russ) DOI: <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2019-12184>

10. Maksimenko A.N., Antipenko G.L., Bezdnikov D.V., Kutuzov V.V. Improvement of serviceability of hydraulic drive of construction and road building machines. *Belarusian Russian University Bulletin*. 2007; 4: 24–30. (In Russ)

11. Felix Ng., Jennifer A. Harding, Jacqueline Glass. Improving hydraulic excavator performance through in line hydraulic oil contamination monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017; 83: 176–193.

12. Blum K.H., Ellenrieder K. Validated Hydraulic Fluids for Increased Hydraulic Life. *ATZoffhighway worldwide*. 2017; T. 10. no. 1: 50–55.

13. Hydraulic fluids: Controlling contamination in hydraulic fluids. *Filtration & Separation*. 2010; Vol. 47, no 3 (May-June 2010): 28–30.

14. Zorin V.A., Nguyen Trong M. Prediction of residual life of hydraulic motors of construction machines by results of simulation. *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya (Repair, Reconditioning, Modernization)*. 2023;3: 15–19. (in Russ) DOI: 10.31044/1684-2561-2023-0-3-15-19

15. Zhmurov V.V., Kobzov A.Y.U., Kobzova I.O., Gerasimov S.V., Zhuk E.A. Tools for portable and built-in diagnostics of hydraulic power cylinders of machines based on load-bearing capacity parameters. *Mechanical engineers to XXI century: Mechanical engineers to XXI cen.* 2024; 23: 132–139. (in Russ) URL https://elibrary.ru/download/elibrary_67315115_84265878.pdf. (accessed: 22.04.2025).

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Лесковец И.В. – математический расчет, оформление графической и табличной информации, написание и оформление статьи

Грац А.А. – анализ трудов отечественных и зарубежных ученых по методикам, оборудованию и концепциям проведения диагностирования гидропривода мобильных машин и его элементов

Рогожин В.Д. – Постановка задач исследования, анализ полученных результатов, разработка заключения, обсуждение полученных результатов

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Leskovets I.V. Mathematical calculation, graphic and tabular design, writing and formatting the article

A.A. Gratz Domestic and foreign scientific work analysis on methods, equipment and diagnostic concepts of hydraulic drive of mobile machines and its elements

V.D. Rogozhin Setting the research objectives, analysis and discussion of the obtained results, conclusion development.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лесковец Игорь Вадимович – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Транспортные и технологические машины» Межгосударственного образовательного учреждения «Белорусско-Российский университет» (212000, Республика Беларусь, г. Могилев, пр-т Мира, 43).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6411-6809>,

Scopus Author: ID 57214989692,

Researcher ID: MFI-1510-2025,

SPIN-код: 6160-5067,

e-mail: leskovets1966@mail.ru

Грац Александр Андреевич – инженер, Республиканское унитарное предприятие «Национальный аэропорт Минск» Республика Беларусь, г. Минск, тер. Национального аэропорта Минск.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3954-9602>,

e-mail: grats1975@bk.ru

Рогожин Владимир Дмитриевич – канд. техн. наук, доц., декан инженерного факультета заочного образования Межгосударственного образовательного учреждения «Белорусско-Российский университет» (212000, Республика Беларусь, г. Могилев, пр-т Мира, 43).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7270-5438>,

e-mail: vd-al@yandex.by

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor V. Leskovets – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department “Transport and Technological Machines” Interstate Educational Institution of Higher Education «Belarusian-Russian University» (43, Mira Avenue, Mogilev, Republic of Belarus, 212000).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6411-6809>,

Scopus Author: ID 57214989692,

Researcher ID: MFI-1510-2025,

SPIN-code: 6160-5067,

e-mail: leskovets1966@mail.ru

Alexander A. Grats – engineer, Republican Unitary Enterprise “Minsk National Airport” (Territory of Minsk National Airport, Minsk, Republic of Belarus).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3954-9602>

e-mail: grats1975@bk.ru

Vladimir D. Rogozhin – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Dean of Engineering Faculty of Correspondence Education, Interstate Educational Institution of Higher Education «Belarusian-Russian University» (43, Mira Avenue, Mogilev, Republic of Belarus, 212000).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7270-5438>,

e-mail: vd-al@yandex.by

Научная статья

УДК 62–1/-9

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-368-385>

EDN: EVXRXB



ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН ДЛЯ УСТРОЙСТВА СВАЙНОГО ОСНОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

А.Б. Пономарев¹✉, Д.А. Паскачева², Д.С. Кораблев²¹Санкт-Петербургский горный университет им. Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, Россия²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия
✉ ответственный автор
Ponomarev_AB@pers.spmi.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Характерной особенностью работ по устройству подземной части здания или сооружения в условиях Санкт-Петербурга является наличие значительной толщи слабых глинистых грунтов. Такие грунты требуют щадящего воздействия при различных технологических операциях. Значительное влияние на основание и окружающую застройку могут оказывать строительные машины для устройства свайного основания. Степень воздействия строительных машин определяется методом выполнения строительных работ.

Материалы и методы. В статье представлены основные виды строительных машин, используемых для устройства свайного основания в условиях Санкт-Петербурга. Выполнен сравнительный анализ технологических параметров, а также преимуществ и недостатков различного оборудования. Показаны характерные для Санкт-Петербурга инженерно-геологические условия и накладываемые ими ограничения на технологии выполнения свайного основания.

Результаты. Приведены примеры технологического воздействия различных технологий выполнения свай на грунтовое основание здания и сооружения окружающей застройки в условиях Санкт-Петербурга. Дан краткий обзор грунтовых условий, машин и механизмов, а также возможных причин возникновения аварийных ситуаций.

Обсуждение и заключение. Сделаны выводы о наиболее щадящих методах устройства свайного основания в условиях слабых глинистых грунтов и стесненной городской застройки. Даны рекомендации о возможности прогнозирования технологического влияния при устройстве свай с помощью численных методов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сваи, слабые грунты, технологическое воздействие, строительные машины, буронабивные сваи, сваи вдавливания, буровые установки

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. А.Б. Пономарев – член редакционного совета журнала «Вестник СибАДИ». Журнал «Вестник СибАДИ» не освобождает от рецензирования рукописи ученых вне зависимости от их статуса.

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность анонимным рецензентам.

Статья поступила в редакцию 02.04.2025; одобрена после рецензирования 16.05.2025; принята к публикации 16.06.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Пономарев А.Б., Паскачева Д.А., Кораблев Д.С. Особенности технологического воздействия строительных машин для устройства свайного основания в условиях Санкт-Петербурга // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 3. С. 368-385. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-368-385>

© Пономарев А.Б., Паскачева Д.А., Кораблев Д.С., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-368-385>

EDN: EVXRXB

PECULIARITIES OF TECHNOLOGICAL IMPACT OF CONSTRUCTION MACHINES USED FOR PILE FOUNDATION INSTALLATION IN ST. PETERSBURG

Andrey B. Ponomarev¹ ✉, Daria A. Paskacheva², Denis S. Korablev²

¹Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russia

²St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia

✉ corresponding author
Ponomarev_AB@pers.spmi.ru

ABSTRACT

Introduction. A characteristic feature of works on constructing the underground part of buildings or structures in the conditions of St. Petersburg is the significant thickness of weak clay soils. Such soils require gentle impact during various technological operations. The equipment used for constructing pile foundations can significantly affect the soil base and buildings in the area. The degree of construction machine impact is detected on completing construction works.

Materials and methods. The article presents the main types of construction machines used for the construction of pile foundations in the conditions of St. Petersburg. A comparative analysis of technological parameters, advantages and disadvantages of various equipment has been performed. The engineering and geological conditions typical of St. Petersburg and the restrictions they impose on technologies for building pile foundations have been shown.

Results. Examples of technological impact of various pile building methods on basements of the surrounding buildings and their structures in the conditions of St. Petersburg are given. A brief overview of soil conditions, machines and mechanisms, as well as potential risks of emergency situations is given.

Discussion and conclusions. Conclusions have been made on most gentle methods of constructing pile foundations in conditions of weak clay soils and cramped urban development. Recommendations are given about the possibility of predicting the technological impact when constructing piles using numerical methods.

KEYWORDS: piles, soft soils, technological impact, construction machines, bored piles, drive piles, drilling rigs

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest. Ponomarev A.B. is a member of the editorial council of The Russian Automobile and Highway Industry Journal. The Russian Automobile and Highway Industry Journal does not exempt scientists from reviewing the manuscript, regardless of their status.

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors would like to thank the anonymous reviewers.

The article was submitted: April 02, 2025; approved after reviewing: May 16, 2025; accepted for publication: June 16, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Ponomarev A.B., Paskacheva D.A., Korablev D.S. Peculiarities of technological impact of construction machines used for pile foundation installation ST. Petersburg. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (3): 368-385. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-368-385>

© Ponomarev A.B., Paskacheva D.A., Korablev D.S., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Современное градостроительство сталкивается с необходимостью обеспечения устойчивости и долговечности сооружений при возрастающих нагрузках и сложных инженерно-геологических условиях. При наличии значительной толщи слабых озерно-ледниковых отложений плейстоцена и озерно-морских отложений голоцена, а также исторической застройки Санкт-Петербурга одним из ключевых элементов, гарантирующих надежность зданий, сооружений и инфраструктуры, является корректно спроектированное и реализованное свайное основание. Использование свай позволяет перераспределять нагрузки на подстилающие слабые грунты, несущие слои основания, минимизируя риски собственных деформаций зданий. Однако эффективность таких решений напрямую зависит от применяемых технологий и оборудования, технологическое воздействие которых на основание и окружающие здания требует тщательного анализа [1].

Особую актуальность данная проблема приобретает в Санкт-Петербурге – городе с уникальным сочетанием сложных геологических условий, высокой плотностью застройки и строгих требований к сохранению объектов культурного наследия. Преобладание слабых водонасыщенных грунтов, близость водоемов и сезонные колебания уровня грунтовых вод создают дополнительные риски при устройстве свай. Кроме того, активное освоение подземного пространства в историческом центре и прилегающих районах диктует необходимость применения технологий, минимизирующих технологическое воздействие на ограниченно-работоспособные фундаменты исторических зданий. Эти факторы обуславливают потребность в комплексном исследовании особенностей эксплуатации строительных машин, адаптированных к локальным условиям, что и определяет практическую значимость представленной работы.

Технологическое воздействие строительных машин при устройстве свайных оснований остается малоизученным аспектом, несмотря на его значимость для снижения воздействия на окружающие здания, сооружения и массив грунта. Количественная оценка дополнительных деформаций зданий при воздействии различных технологий ведения строительных работ достаточно трудновыполнима даже в численных расчетах. В ВСН 490–87 «Про-

ектирование и устройство свайных фундаментов и шпунтовых ограждений в условиях реконструкции промышленных предприятий и городской застройки» устанавливаются допустимые значения колебаний и ускорений колебаний конструкций в зависимости от типа сооружения и группы грунтов при погружении (ударном или вибрационном) свай. Также в СП 248.1325800.2016 «Сооружения подземные. Правила проектирования» устанавливается процентное соотношение технологической осадки и расчетной осадки для учета первой составляющей в зависимости от типа грунта и типа ограждения котлована. При этом в нормативных документах не закреплены значения технологического влияния для различных технологий устройства буровых, буронабивных и вдавливаемых свай ни в виде предельной деформации основания фундаментов, ни в виде предельного ускорения колебаний конструкций.

Изучением количественного влияния различных технологий строительного производства занимались многие отечественные [2, 3, 4, 5, 6, 7] и зарубежные [8] исследователи, которые оценивали влияние в численной постановке задачи. При этом в большей степени оценивалось влияние на здания на определенных площадках строительства без варьирования параметрами строительных машин, такими как скорость вращательного и поступательного движения шнека, частота и сила воздействия погружателя и т.д. Особенности технологических параметров оборудования рассматриваются в работах [9, 10, 11, 12]. Отдельные исследования посвящены влиянию различных технологий на качество выполняемого оголовия свайного основания [13, 14].

Целью настоящего исследования является анализ параметров строительных машин для устройства свайного основания, определяющих технологическое воздействие на окружающие здания, сооружения и массив грунта.

Для выполнения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Выявление наиболее популярных технологий устройства свайного основания и их особенностей.
2. Анализ технических параметров строительных машин, применяемых для наиболее популярных технологий устройства свай.
3. Анализ опыта и рисков применения различных технологий устройства свай в условиях Санкт-Петербурга.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Технологии устройства свайного основания

Наиболее общая классификация технологий устройства свайного основания включает сваи заводского изготовления и сваи, устраиваемые на площадке строительства [15].

Заводские сваи имеют множество преимуществ относительно свай, устраиваемых в грунте [16], и преобладали на отечественном рынке в эпоху Советского Союза¹, что связано с экстенсивным освоением территории страны. В начале 2000-х годов ситуация изменилась в пользу свай, устраиваемых в грунте.

К сваям заводского изготовления можно отнести следующие методы их устройства:

- забивка (в т.ч. в лидерные скважины);
- вдавливание (в т.ч. в лидерные скважины);
- завинчивание;
- вибропогружение.

На данный момент широко используемыми в городской застройке остались вдавливаемые сваи, а также вибропогружаемые. Стоит отметить, что значительную долю вибропогружаемых свай составляют шпунтовые сваи для формирования ограждений котлованов.

Сваи, изготавливаемые на площадке, можно разделить на:

- набивные (вытеснение грунта):
 - сваи с раскатчиками;
 - сваи с теряемым наконечником;
- буровые (извлечение грунта):
 - сваи, выполняемые под защитой стенок скважины обсадной трубой;
 - сваи, выполняемые под защитой стенок скважины глинистым раствором;
 - сваи, выполняемые по технологии непрерывного полого проходного шнека (НПШ);
 - сваи, комбинирующие технологии НПШ и обсадной трубы (Double Rotary).

Санкт-Петербург является одним из первых городов России, где начали применяться передовые технологии устройства свайных фундаментов. Во многом это связано со сложностью инженерно-геологических условий. Для городского пространства наиболее распространены следующие технологии:

- сваи вдавливания;
- вибропогружаемые сваи;
- набивные сваи Fundex;
- буронабивные сваи CFA (НПШ) – непрерывный полый проходной шнек;

- буровые сваи под защитой глинистого раствора;
- буровые сваи под защитой обсадной трубы (double rotary, сваи Келли и др.) (рисунок 1).

В связи с широким применением отечественных и зарубежных передовых технологий устройства свайного основания накапливается и опыт их применения на площадках строительства со сложными грунтовыми условиями и стесненной городской застройкой. Аспекты технологического влияния в связи принудительным вытеснением грунта при устройстве свай достаточно широко исследованы.

При выполнении свай вытеснения (к которым можно отнести и вдавливаемые сваи) происходит мгновенное изменение напряженно-деформированного состояния грунта: давления от внедрения сваи не успевают перераспределиться на частицы грунта и воспринимаются поровой водой, передающей напряжения в двух направлениях, которые могут вызвать горизонтальные смещения существующих конструкций (например, ранее выполненных свай, подземных коммуникаций и др.) и вертикальные перемещения фундаментов окружающих зданий и сооружений. Подробная методика расчета напряженно-деформированного состояния грунта при устройстве свай Fundex описана в работах И.П. Дьяконова [17]. Влияние скорости бурения на напряженно-деформированное состояние массива грунта при устройстве свай вытеснения рассмотрено в работах [18, 19].

Анализ разрушения стенок скважины при устройстве буровых свай исследован не так широко, однако существуют сходные работы, например, по влиянию устройства конструкции «стена в грунте» на окружающую застройку [2]. В данном случае процесс моделирования устройства захватки «стены в грунте» под защитой бентонитового раствора аналогичен, например, процессу удержания стенок скважины бентонитовым раствором при устройстве свай.

Для буровых свай, выполняемых по технологии CFA, также свойственны локальные разрушения и потери устойчивости стенок скважины, вызванные технологией производства работ и параметрами оборудования. Для анализа составляющей, которая определяется техническими особенностями оборудования, необходимо рассмотреть буровые машины для устройства свай.

¹ Мангушев Р.А., Ершов А.В., Осокин А.И. Современные свайные технологии: учебное пособие. 2-е изд. М.: Изд-во АСВ, 2010. 240 с.



Рисунок 1 – Устройство свай Келли под защитой обсадной трубы для небоскреба Лахта-центр в Санкт-Петербурге²

Figure 1 – Kelly piles protected by casing for the Lakhta Center skyscraper in St. Petersburg²

Строительные машины для устройства свайного основания в условиях Санкт-Петербурга

Основой выбора параметров строительных машин является определение режимов взаимодействия рабочих органов с обрабатываемой средой³. Для свай, изготавливаемых в грунте, это может быть ввинчивание с вытеснением грунта для образования полости скважины или извлечение грунта из скважины бурением. Рассмотрим буровые машины для устройства разных видов свай.

Буровые сваи

Рабочим органов для устройства буровых свай могут служить ковшебуры, шнеки, колонковые буры и уширители пяты свай.

Шнеки подразделяют на короткие глухие и полые. Ковшебуры в основном используют для зачистки скважин, например при извлечении грунта, из обсадных труб.

Популярной зарубежной технологией, которая была внедрена в отечественный рынок устройства буровых свай, стала технология устройства свай под защитой непрерывного полого проходного шнека.

Данная технология предусматривает подбор параметров шнека в зависимости от типа разрабатываемого грунта, долота, а также соотношение скорости вращения шнека со

скоростью его поступательного движения для разработки скважины вглубь.

Для буровых шнеков ключевыми параметрами являются:

- диаметр шнека (определяется проектным диаметром свай);
- шаг винтовой спирали (в глинистых грунтах рекомендуются шнеки с шагом спирали 0,45–0,5 наружного диаметра шнека, в мягких породах с высокой влажностью – 0,5–0,7 диаметра⁴);
- угол наклона лопастей шнека;
- материал и покрытие.

Для надежной работы шнекового инструмента рекомендуется применять угол наклона винтовой спирали, не превышающий угол внутреннего трения на контакте «грунт-шнек». Так разность частоты вращения шнека и грунта обусловлена разницей между трением разрабатываемого грунта о стенки скважины и поверхность шнека. Несоблюдение этой рекомендации может привести к излишнему забору грунта и обрушению стенок скважины.

Высокая пластичность и липкость глинистых грунтов требуют частой очистки лопастей шнека для исключения «закупорки» скважины. Тиксотропное разжижение, высокая деформируемость и низкая прочность слабых глинистых грунтов требуют ограничения скорости разработки грунта при устройстве скважины.

² BAUER Spezialtiefbau GmbH [Интернет]. 2025. BAUER Bored Piles. Доступно на: <https://geotechnical-solutions.bauer.de/>

³ Евтюков С.А., Овчаров А.А., Замараев И.В. Построение механореологических моделей процессов взаимодействия рабочих органов строительно-дорожных машин со средой: учебное пособие. Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2011.

⁴ Танов Е.И., Площадный В.Я. Шнековый буровой инструмент: справочник. М.: Недра, 1985. 109 с.



Рисунок 2 – Буровая установка MAIT HR 420-800 CFA для выполнения свай по технологии НПШ⁵

Figure 2 – Drilling rig MAIT HR 420-800 CFA for pile construction using CFA technology⁵

Для уменьшения вибрационного воздействия и возможности выполнения работ при ограниченных размерах строительной площадки можно использовать строительные машины с наращиваемыми (короткими) проходными шнеками [20].

Сваи, выполняемые по технологии НПШ, являются весьма распространенными [21, 22], поэтому на рынке буровой техники представлено значительное количество оборудования для их производства, например, Soilmes,

Bauer, Casagrande, Klemm, Tescar, MAIT, Mc Drill Technology и другие. Общий вид буровой установки представлен на рисунке 2.

Сваи, устраиваемые под защитой обсадной трубы, выполняют в случае наличия в основании слабых водонасыщенных грунтов для обеспечения устойчивости стенок скважины. Технологическая карта на устройство свай под защитой обсадной трубы представлена на рисунке 3.

⁵ HR 420-800 CFA // MAIT USA CORP URL: <https://www.maitusa.com/machine/24> (дата обращения: 04.04.2025).

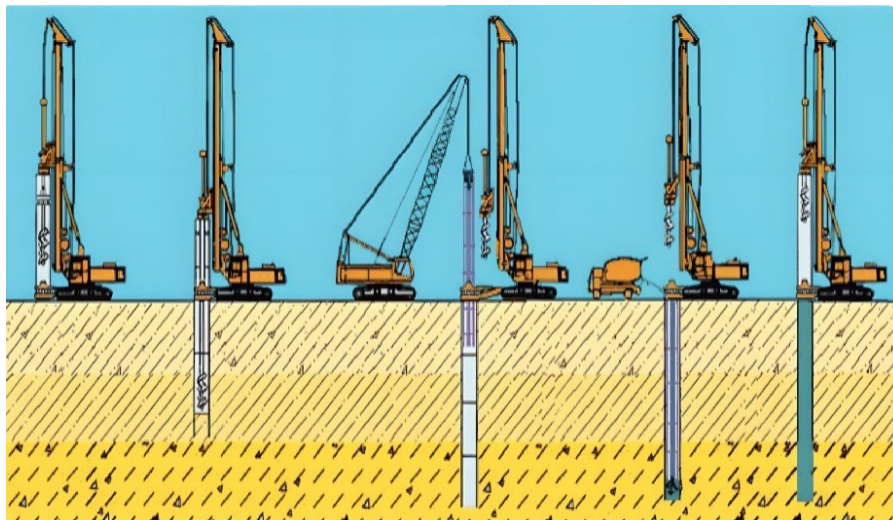


Рисунок 3 – Технологическая карта на устройство свай под защитой обсадной трубы⁶

Figure 3 – Technological map for pile installation with the casing pipe protection⁶



Рисунок 4 – Буровые установки для устройства свай под защитой обсадной трубы фирм Bauer (BG 28H) и Casagrande (B275 XP-2)⁷

Figure 4 – Drilling rigs for installing piles under casing protection from Bauer (BG 28H) and Casagrande (B275 XP-2)⁷

Технические параметры оборудования представлены в таблице 1.

Обсадная труба погружается обратным вращением через закрепленный на трубе хомут и вдавливанием гидравлическим домкратом. По мере погружения трубы грунт извлекается и наращивается следующая секция. Извлечение грунта можно производить шнеком, расположенным на конце телескопиче-

ской штанги Келли. Бетонная смесь подается методом вертикально перемещающейся трубы (ВПТ).

Буровые установки многих компаний оборудованы сменным рабочим органом на одной базе машины, например серии Casagrande XP и Bauer BG. Общий вид установок для устройства свай под защитой обсадной трубы представлен на рисунке 4.

⁶ Буроабивные сваи под защитой обсадной трубы // ООО «ГеоСфера». URL: <https://geosfera.spb.ru/services/obsadnayatruba> (дата обращения: 04.04.2025).

⁷ Буроабивные сваи // Грандспецстрой. URL: <https://gsst.kz/> (дата обращения: 04.04.2025).

Таблица 1
Технические параметры установок
для устройства свай
под защитой обсадной трубы Bauer BG 28H и
Casagrande B275 XP-2
Источник: составлено авторами.

Table 1
Technical parameters of the equipment
used for pile building
under the protection of Bauer BG 28H and Casagrande
B275 XP-2 casing pipes
Source: compiled by the authors.

Параметр	BG 28H	B275 XP-2
Момент вращения, кНм	282	300
Мощность, кВт	405	336
Тяговое усилие, кН	620	420
Вес, т	103	92
Макс. диаметр, мм	2500	2700
Макс. глубина, м	65.7	78

Особое внимание при устройстве свай под защитой обсадной трубы стоит уделять поддержанию грунтовой пробки в основании секции трубы для избежания прорыва грунтовых вод в скважину. Данный метод устройства свай отличается сравнительно низким влиянием на окружающую застройку и массив грунта при соблюдении технологии проведения работ. Также при выполнении данного вида свай поддерживается достаточно высокое качество выполнения свай (бетонолитная труба исключает образование шеек и расслоение бетонной смеси). Однако недостатком технологии является ее низкая производительность.

Сваи, изготавливаемые по технологии Double Rotary (двойное вращение), производятся путем бурения скважины под защитой обсадной трубы с помощью одновременного вращения шнека внутри трубы.

Сваи, изготавливаемые по данной технологии, совмещают преимущества свай НППШ (высокая производительность) и свай под за-

щитой обсадной трубы (устойчивость стенок скважины, высокое качество выполнения тела свай). Общий вид буровой установки представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Буровая установка для устройства свай
Double Rotary Liebherr LRB23⁸

Figure 5 – Liebherr LRB23 Double Rotary Pile Drilling Rig⁸

Набивные сваи

Основным рабочим органом взаимодействия с грунтом у набивных свай является режущий теряемый наконечник (раскатчик) или конус с винтовой полостью.

Особое распространение в Петербурге получили сваи, выполняемые по технологии Fundex, с теряемым чугунным винтовым наконечником. Скважина под сваи производится без извлечения грунта за счет его вытеснения и уплотнения ввинчиваемой инвентарной трубой и режущим наконечником. Бетонный раствор в скважину погружают сверху, что может вызвать его расслоение при большой длине свай.

Общий вид установки для устройства свай Fundex представлен на рисунке 6.

⁸ LRH 100.1 Сваебойная установка (серия LRH) // Liebherr. Фундаментостроительная техника. URL: <https://www.liebherr.com/ru-ru/p/lrh100-4471886> (дата обращения: 04.04.2025).



Рисунок 6 – Установка для устройства свай Fundex
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Installation for Fundex piles
Source: compiled by the authors.

Технические параметры оборудования представлены в таблице 2.

Таблица 2
Технические параметры установок
для устройства свай
под защитой обсадной трубы
IHC Fundex Equipment F12SE
Источник: составлено авторами.

Table 2
Technical parameters of the equipment
used for pile building
under the protection of IHC Fundex Equipment F12SE
casing pipe
Source: compiled by the authors.

Параметр	F12SE
Момент вращения, кНм	400
Мощность, кВт	420
Тяговое усилие, кН	350
Вес, т	70
Макс. диаметр, мм	530
Макс. глубина, м	31.5

Так как при устройстве скважины происходит уплотнение грунта, свая Fundex обладает высокой несущей способностью относительно буровых свай. Также к преимуществам данной технологии можно отнести высокую производительность и низкое динамическое воздействие на грунты основания. Значительным недостатком свай Fundex, как и всех свай вытеснения, является изменение напряженно-деформированного состояния грунта за счет его вытеснения. С учетом недренирован-

ной работы слабых глинистых грунтов основания, поровая жидкость при сжатии порождает волнообразное распределение деформаций, что может вызвать временные деформации подъема окружающей застройки, а затем осадку.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Аварийные ситуации на объектах строительства в Санкт-Петербурге

Развитие подземного пространства в Санкт-Петербурге в конце XX в. привело к появлению новых технологий устройства свайных фундаментов в городской застройке. Однако использование современных геотехнологий устройства свай в первое время сопровождалось развитием ненормативных деформаций сооружений окружающей застройки, связанных с отсутствием требований к производству работ с использованием новых технологий, отраженных в существующей нормативной документации, а также отсутствием адаптации инновационных методов строительства к инженерно-геологическим условиям Санкт-Петербурга. В условиях практически всей территории города значительная толща слабых глинистых грунтов является характерной особенностью инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга. Мощность слабых глинистых отложений оценивается в диапазоне от 1 до 20 м, хотя в пределах палеодолин может значительно превышать данные значения.

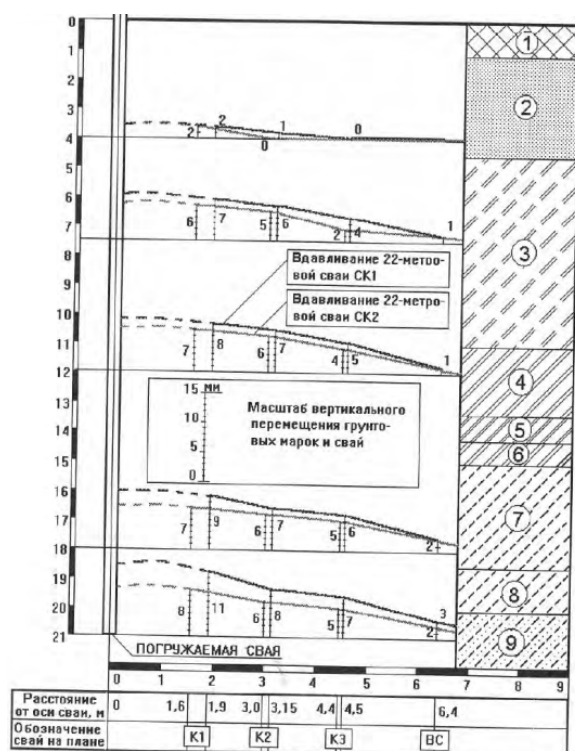


Рисунок 7 – Схема грунтовых марок и зафиксированные перемещения при вдавливании свай на площадке строительства фондохранилища Государственного Эрмитажа на Торфяной ул.⁹

Figure 7 – Soil marks and movements recorded while pressing piles at the construction site of the State Hermitage Museum storage facility on Torfyanaya Street⁹

В первую очередь на площадках строительства произошло замещение забивных свай более щадящими технологиями для зданий и сооружений окружающей застройки – сваями вдавливания. Тем не менее первые наблюдения, производившиеся за вдавливаемыми сваями, устраиваемыми в непосредственном примыкании к существующим конструкциям, зафиксировали существенные деформации подъема как ранее устроенных на площадке строительства свай, так и зданий и сооружений окружающей застройки. Например, зафиксированные при вдавливании свай на площадке строительства фондохранилища Государственного Эрмитажа на Торфяной ул. перемещения грунтовых марок составляли 8 мм до начала производства работ по возве-

дению конструкций сооружения (рисунок 7). В качестве сваевдавливающих установок на площадке строительства выступали установки конструкции Треста № 101 и УСВ-120М. В дополнение к развитию деформаций в ходе геотехнического мониторинга фиксировался резкий рост ускорений колебаний сооружений окружающей застройки при вхождении погружаемой сваи в труднопроходимые плотные слои грунта, связанные с увеличением усилия вдавливания гидродомкрата.

Кроме того, неоднократно фиксировались дополнительные осадки зданий окружающей застройки на этапе устройства свай вдавливания ввиду массивности самоходных сваевдавливающих установок, способных обеспечить требуемое усилие для погружения свай для проектируемых сооружений, вес которых составляет, как правило, более 100 т.

В последующем распространение на площадках строительства в Санкт-Петербурге технологий свай принудительного вытеснения грунта (Fundex, Atlas, DDS) спровоцировало развитие ненормативных деформаций окружающей застройки для ряда объектов строительства. Например, использование свай Fundex без учета изменения напряженно-деформированного состояния грунтового массива в ходе производства строительных работ на площадке строительства в районе Казанского собора в Санкт-Петербурге привело к развитию деформаций подъема более 30 мм для сооружений окружающей застройки (рисунок 8). Кроме того, после окончания производства работ по устройству набивных свай начали развиваться дополнительные деформации этих сооружений, по итогу превысившие нормативные значения.

Аналогичные результаты наблюдались при использовании иных технологий свай вытеснения (Atlas, DDS), что представлены на рисунке 9. Значительно меньшая величина подъема окружающих зданий и развитие последующих деформаций связаны с устройством лидерных скважин до погружения наконечника свай, а также запрете движения фронта работ по устройству свай в сторону существующих сооружений.

⁹ Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. Геотехническое сопровождение развития городов. СПб.: Стройиздат Северо-Запад, 2010.

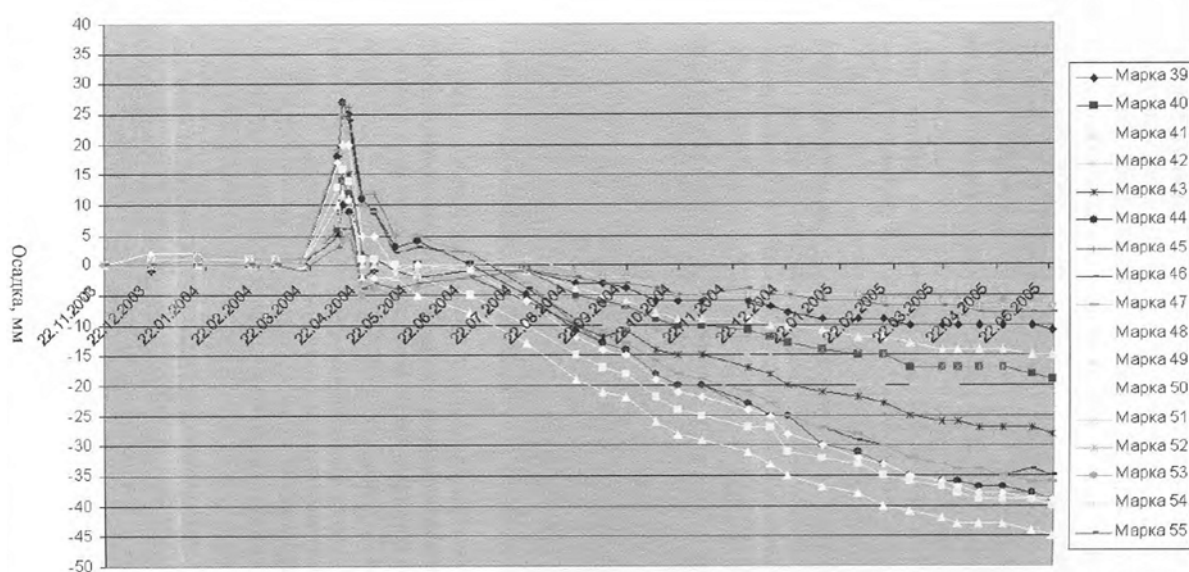


Рисунок 8 – Развитие деформаций зданий окружающей застройки в ходе производства строительных работ (устройство свай Fundex) на площадке строительства в районе Казанского собора в Санкт-Петербурге¹⁰

Figure 8 – Development of deformations of surrounding buildings during construction work (installation of Fundex piles) at the construction site around the Kazan Cathedral in St. Petersburg¹⁰

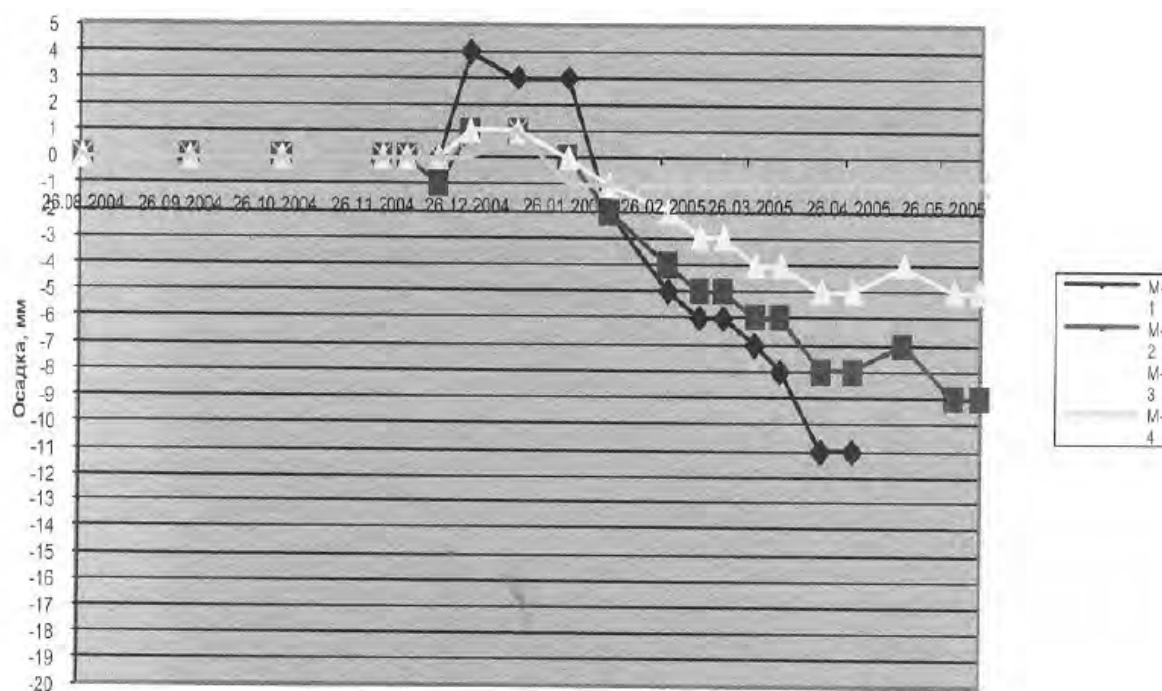


Рисунок 9 – Развитие деформаций зданий окружающей застройки в ходе производства строительных работ (устройство свай DDS) на площадке строительства в Санкт-Петербурге¹¹

Figure 9 – Development of deformations of surrounding buildings during construction work (installation of DDS piles) at a construction site in St. Petersburg¹¹

¹⁰ Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. Геотехническое сопровождение развития городов. ... 2010.

¹¹ Там же.

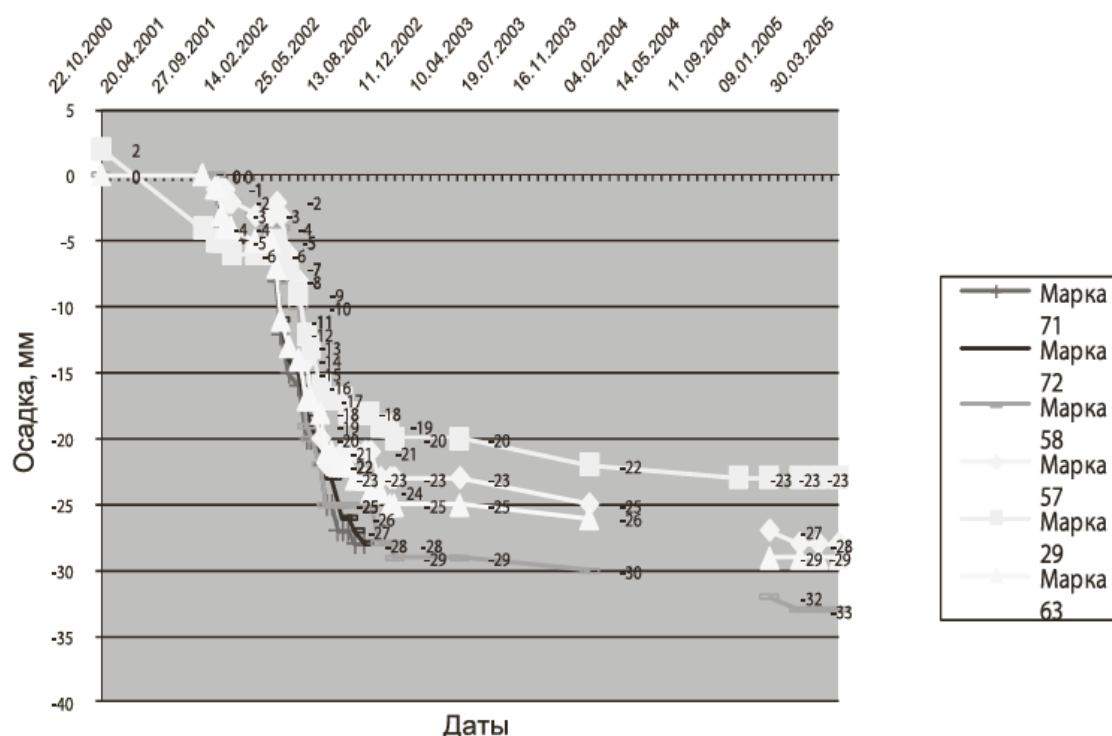


Рисунок 10 – Развитие деформаций зданий окружающей застройки в ходе производства строительных работ (устройство свай под защитой обсадной трубы) на площадке строительства в Санкт-Петербурге¹²

Figure 10 – Development of deformations of surrounding buildings during construction work (installation of piles under casing pipe protection) at a construction site in St. Petersburg¹²

Следующим этапом развития технологий устройства свай в условиях Санкт-Петербурга стало использование буровых свай. Несмотря на отсутствие развития избыточного порового давления и дополнительных напряжений в грунтовом массиве, связанных с отсутствием процесса вытеснения грунтов из скважины, при устройстве буровых свай все равно наблюдаются опасные геотехнические процессы, способные послужить причиной развития аварийных ситуаций на площадках строительства.

Например, широко известен эффект неконтролируемого извлечения грунта из скважины, сопровождающийся развитием осадок окружающей территории, в том числе и зданий окружающей застройки. В первые годы применения технологии устройства буровых свай под защитой обсадной трубы зафиксировано развитие аварий на площадке строительства в районе гостиницы «Невский Палас» в процессе устройства стены из буровых свай (рисунок 10). Деформации окружающего массива грунта при использовании буровых свай обусловлены

развитием сдвиговых деформаций в пределах разрабатываемой скважины. В процессе проходки слабых глинистых грунтов устойчивость забоя обеспечивается, прежде всего, наличием грунтовой «пробки», сплошность которой может легко нарушаться в процессе производства работ: после вхождения рабочего органа буровой установки в забой скважины возможно создание вакуума, разрушающего «пробку» и приводящего по итогу к развитию дополнительных перемещений грунта.

Выполнение буровых свай, устойчивость забоя которых обеспечивается заполнением скважины глинистым или бентонитовым раствором, не приводит к значительному воздействию производства работ на напряженно-деформированное состояние грунтового массива, но при этом в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга приводит к значительным нарушениям сплошности и качества изготавливаемых свай, что значительно снижает их фактическую несущую способность (рисунок 11).

¹² Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. Геотехническое сопровождение развития городов. ... 2010.

pile number: 4.7

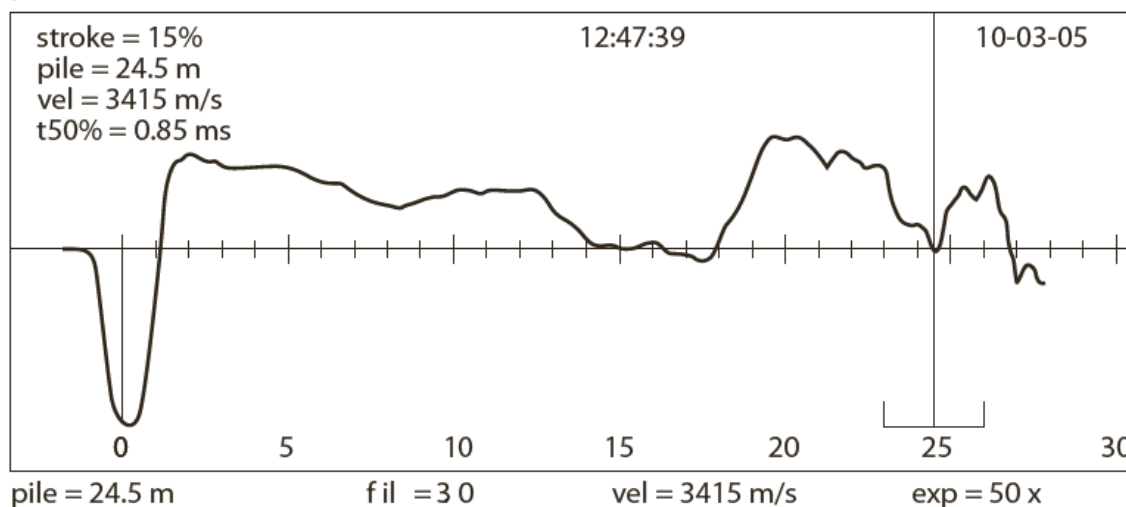


Рисунок 11 – Диаграмма нарушения сплошности буровых свай, устраиваемых под защитой глинистого раствора на площадке строительства в Санкт-Петербурге¹²

Figure 11 – Diagram of the discontinuity of bored piles installed under the protection of clay mortar at a construction site in St. Petersburg¹²

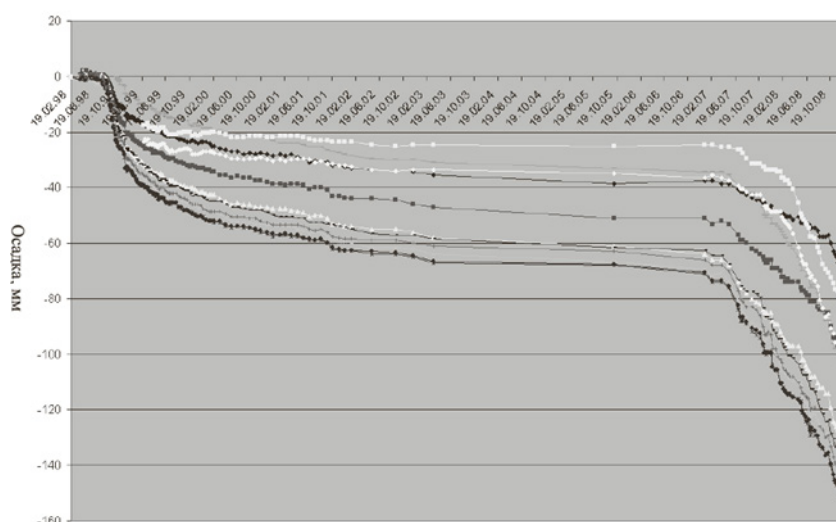


Рисунок 12 – Развитие деформаций зданий окружающей застройки после производства строительных работ (устройство свай CFA) на площадке строительства в Санкт-Петербурге¹³

Figure 12 – Development of deformations in surrounding buildings after construction work (installation of CFA piles) at a construction site in St. Petersburg¹³

Развитие свайных технологий привело к появлению в условиях Санкт-Петербурга свай, устраиваемых путем перемещения проходного шнека на проектную глубину и непрерывного бетонирования скважины при подъеме шнека (CFA). Скорость производства работ и

низкая стоимость установок привела к широкому распространению данной технологии на площадках строительства.

Однако при использовании данной технологии следует уделять строгое внимание технологическим требованиям для производства

¹³ Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. Геотехническое сопровождение развития городов. ... 2010.

работ: при несоответствии скорости вращения поступательному движению шнека происходит либо развитие дополнительных напряжений в грунтовом массиве связанных с условным режимом «вдавливания» шнека в грунтовый массив, либо наоборот, производится движение грунта по лопастям шнека вверх, сопровождающееся неконтролируемым извлечением грунта из скважины в случае залегания слабого грунта поверх толщи плотных отложений, что как раз характерно для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга.

Кроме того, в процессе производства выноса избыточного объема грунта происходит расструктурирование и разрушение грунтового массива в области вокруг скважины. Влияние данного процесса фиксировалось, например, на площадке строительства на Лиговском проспекте в Санкт-Петербурге, где после консервации строительной площадки после завершения работ по устройству свай CFA фиксировалось развитие дополнительных деформаций сооружений в связи с развитием пластических деформаций грунтового массива после разрушения области грунта вокруг устраиваемых скважин (рисунок 12).

Оценка рисков, связанных с технологиями устройства свайных фундаментов

В соответствии с рассмотренными данными геотехнического мониторинга за дополнительными перемещениями сооружений окружающей застройки при производстве работ по устройству свайных фундаментов с использованием различных технологий в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга можно выделить различные факторы риска, осложняющие безопасность строительных работ.

В случае использования свай заводского изготовления: забивных или статически вдавливаемых, основными факторами риска являются:

- динамическое воздействие на грунты основания, а также здания и сооружения окружающей застройки;
- развитие дополнительных напряжений в грунтовом массиве вследствие процессов погружения свай.

При использовании буровых свай под защитой глинистого раствора развитие возможных аварийных ситуаций прежде всего связано с:

- возможной потерей устойчивости стенок устраиваемых скважин;
- нарушением сплошности устраиваемых свай в условиях наличия слабых грунтов в пределах скважин.

При использовании буровых свай под защитой обсадной трубы основными факторами риска являются:

- возможное избыточное извлечение грунта из скважины вследствие разрушения грунтовой «пробки», обеспечивающей устойчивость скважины;
- возможное динамическое воздействие на грунты основания, а также здания и сооружения окружающей застройки при погружении или извлечении обсадных труб.

Использование набивных свай (Fundex, DDS, Atlas) в первую очередь сопряжено с наличием следующих факторов риска:

- развитие дополнительных напряжений в грунтовом массиве вследствие процессов погружения свай, приводящее к значительным деформациям подъема окружающего массива грунта;
- последовательность устройства свай, приводящая к формированию «волны» напряжений, фронт которой движется по направлению зданий или сооружений окружающей застройки.

Использование свай CFA может приводить к развитию возможных аварийных ситуаций вследствие:

- нарушения соответствия поступательного и вращательного движения шнека, что может приводить к развитию дополнительных напряжений в грунтовом массиве или избыточному извлечению грунта из скважины;
- локальных вывалов грунта в ствол скважины и перебора грунта.

Для расчета влияния технологии устройства свай разработаны различные аналитические и численные методики. Однако в большинстве случаев такие методики не позволяют варьировать параметрами оборудования: крутящим моментом, скоростью вращения шнека и другим. Отдельные случаи учета скорости вращения шнека представлена в работе [18]. При некорректном подборе оборудования или несоблюдении технологии производства работ в наиболее неблагоприятных случаях зона влияния от устройства сваи может достигать 2 длин сваи [23].

Снижение дополнительных деформаций окружающих конструкций можно достичь за счет снижения веса бурового оборудования, что, однако, ограничивает его мощность и, следовательно, возможные габаритные размеры свай. Для снижения влияния также возможно предусмотреть различные системы снижения вибраций от оборудования.

Рекомендации по выбору технологий для устройства свайного основания в условиях Санкт-Петербурга

С учетом опыта выполнения свайных работ на строительных площадках города Санкт-Петербурга и рассмотренных параметров строительных машин можно говорить о том, что наименьшим технологическим влиянием обладают сваи под защитой обсадной трубы. При этом высокую производительность при отсутствии технологического влияния обеспечивают сваи Double Rotary. Однако оба этих вида свай обладают сравнительно низкой несущей способностью по боковой поверхности сваи за счет способа образования скважины, а также высокой себестоимостью. Два этих недостатка обосновывают устройство данных свай только в сложных геотехнических ситуациях в условиях плотной городской застройки.

Устройство свай НПШ требует строгого контроля скорости вращения и погружения шнека для обеспечения устойчивости стенок скважины и минимизации перебора грунта. Для этого на стадии проектирования необходимо принять во внимание наличие прослоек плотных песков и щебенистых грунтов, где усилие погружения шнека необходимо повысить.

Сваи Fundex возможно применять при отсутствии окружающей застройки в зоне возможного влияния. В противном случае необходимо разработать технологическую последовательность, в которой будет учитываться количество погружаемых свай в сутки, последовательность выполнения свай, выполнение замкнутого контура ограждения котлована до начала устройства свай. Также с учетом метода бетонирования необходим контроль сплошности тела сваи.

Устройство свай в условиях плотной городской застройки требует строгого соблюдения технологической последовательности производства работ для обеспечения качества производства свай и минимизации влияния на окружающий массив грунта и застройку.

Для контроля необходимо оснащение оборудования специальными датчиками, измерения которых выводятся на экран приборной панели или пульта управления. Операторам должны быть доступны частично или полностью автоматизированные системы для выполнения монотонных и повторяющихся задач, повышая надёжность процесса и удобство использования. Для повышения качества строительных работ существуют буровые системы для фиксации скорости вращения и погружения шнека, контроль наклона и вылета

мачты, контроль положения свай в свайном поле [24] и другое.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении представлены основные выводы по данной работе:

1. В сложных инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга выбор технологии производства работ по устройству свайного основания должен сопровождаться оценкой рисков от технологического влияния на массив грунта и здания окружающей застройки.

2. Строительные машины для устройства свай должны подбираться на основе режима взаимодействия рабочего органа с грунтом. При этом важно учитывать особенности инженерно-геологических условий: наличие водонасыщенных слабых грунтов, наличие прослоек плотных или галечниковых грунтов. Определяющими для выбора машины являются теговое усилие и крутящий момент. В условиях ограниченного пространства немаловажными являются габариты оборудования.

3. Анализ аварийных ситуаций, опыта строительства в условиях Санкт-Петербурга и технологий производства работ показывает, что наиболее щадящей и производительной считается технология устройства свай Double Rotary, сочетающая преимущества свай НПШ и выполняемых под защитой обсадной трубы.

4. Анализ литературы показывает, что наиболее эффективным методом прогнозирования влияния на окружающую застройку и грунтовый массив является численное моделирование (например, метод конечных элементов).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ci D, Gu C. Numerical Simulation of the Influence of Piling on the Surrounding Soil. B: Advanced Construction Technology and Research of Deep-Sea Tunnels Lecture Notes in Civil Engineering. Singapore: Springer; 2024. pp. 223–31. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-2417-8_20.
2. Мангушев Р.А., Сапин Д.А. Учет жесткости конструкций «стена в грунте» на осадку соседних зданий // Жилищное строительство. 2015. (9). С. 3–7.
3. Мангушев Р.А., Гурский А.В., Полунин В.М. Учет влияния технологических осадок зданий окружающей застройки при устройстве шпунтовых ограждений соседних котлованов // Жилищное строительство. 2020. (9). С. 9–19. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2020-9-9-19>
4. Дьяконов И.П. Анализ работы свай «Фундекс» в слабых глинистых грунтах // Вестник гражданских инженеров. 2017. 62(3). С. 55–8. DOI: <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-3-55-58>

5. Полунин В.М., Мельников А.В., Дружинин М.С., Туккия А.Л. Развитие технологических осадок фундаментов зданий в процессе высокочастотного виброизвлечения свай // Жилищное строительство. 2024. (5). С. 3–12. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-5-3-12>
6. Шулятьев О.А., Минаков Д.К. Технологические осадки при устройстве стены в грунте траншейного типа // Construction and Geotechnics. 2017. 8(3). С. 41–50. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2017.3.05>
7. Болдырев Г.Г., Идрисов И.Х., Мягков К.А., Новичков Г.А. Численное решение задачи бурения скважины шнеком // Геотехника. 2015. (5). С. 40–53.
8. Lande E.J., Ritter S., Karlsrud K., Nordal S. Understanding effects from overburden drilling of piles—a rational approach to reduce the impacts on the surroundings. Canadian Geotechnical Journal. 2024. 61(10). С. 2206–22. DOI: <https://doi.org/10.1139/cgj-2023-0404>
9. Гайдо А.Н. Исследование технологических параметров вдавливания свай // Вестник гражданских инженеров. 2012. 4(33). С. 129–37.
10. Евтюков С.А., Доброборский Б.С. Применение пневматических машин ударного действия с подвижным корпусом в бурильных установках // Вестник гражданских инженеров. 2015. 49(2). С. 145–8.
11. Gonet A., Stryczek S., Fyda M. A review of pile machines and their selection criteria. AGH Drilling, Oil, Gas. 2015. 32(3). DOI: <https://doi.org/10.7494/drill.2015.32.3.469>
12. Гайдо А.Н., Верстов В.В. К вопросу определения технологических параметров производства свайных работ в стесненных условиях // Вестник гражданских инженеров. 2017. 62(3). С. 84–94. DOI: <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-3-84-94>
13. Мангушев Р.А., Пономарев А.Б. К вопросу контроля качества изготовления и приемки буронабивных свай // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2014. (3). С. 87–109.
14. Осокин А.И., Сбитнев А.В., Серебрякова А.Б., Татаринцов С.В. Особенности устройства буронабивных свай в слабых грунтах // Промышленное и гражданское строительство. 2006. (6). С. 50–2.
15. Tomlinson M., Woodward J. Pile Design and Construction Practice. Sixth edition. CRC Press; 2020. 608 p.
16. Sari O.L., Saputra A.A.I., Subhakti A., Putri A.P., Khala C.C.S. The influence in selection of pile type and foundation piling method. B: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Banda Aceh, Indonesia; 2020. p. 012033. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1087/1/012033>
17. Дьяконов И.П., Конюшков В.В. Особенности работы набивной закручиваемой сваи «Фундекс» в разнородных грунтах // Вестник гражданских инженеров. 2014. 6(47). С. 116–20.
18. Shi D., Yang Y., Deng Y., Xue J. DEM modelling of screw pile penetration in loose granular assemblies considering the effect of drilling velocity ratio. Granular Matter. 2019. 21(74). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10035-019-0933-3>
19. Zhao Q., Wang Y., Tang Y., Ren G., Qiu Z., Luo W., и др. Numerical Analysis of the Installation Process of Screw Piles Based on the FEM-SPH Coupling Method. Appl Sci. 2022. 17(12): 8508. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12178508>
20. Мангушев Р.А., Осокин А.И. Геотехника Санкт-Петербурга: монография. М.: ACB, 2010. 264 с.
21. Issakulov A.B., Zhussupbekov A.Zh., Wang D.W., Omarov A., Mukhanov D., Yessentayev A. Comparison of bearing capacities of model drilled micro piles using DDS and CFA technologies. Bulletin of LN Gumilyov Eurasian National University Technical Science and Technology Series. 2023. 145(4): 165–74. DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-7263-2023-145-4-165-174>
22. Cherian A. Static Behavior of Strain Gauge Instrumented Continuous Flight Auger (CFA) Piles. Jordan Journal of Civil Engineering. 2022. 16(2): 229–41.
23. Arab M., Abdelmoghni M., Akl S., Dif A. Numerical Modeling of Unfavorable CFA Pile Drilling Conditions. Geotech Geol Eng. 2020. 38: 6869–89. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01475-3>
24. Гайдо А.Н., Погода А.Г., Колчеданцев Л.М., Вершинин Д.В. Дистанционная система контроля технологических параметров вдавливания свай // Computers and Geotechnics. 2020. 11(3). С. 18–28. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2020.3.02>

REFERENCES

1. Ci D, Gu C. Numerical Simulation of the Influence of Piling on the Surrounding Soil. B: *Advanced Construction Technology and Research of Deep-Sea Tunnels Lecture Notes in Civil Engineering*. Singapore: Springer; 2024: 223–31. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-2417-8_20
2. Mangushev R.A., Sapin D.A. Considering the rigidity of diaphragm wall structures for the settlement of adjacent buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo (Housing Construction)*. 2015; (9): 3–7. (in Russ.)
3. Mangushev R.A., Gurskii A.V., Polunin V.M. Taking into Account the Influence of Technological Precipitation of Buildings of the Surrounding Development when Installing Sheet Piling Fences of Neighboring Ditches. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo (Housing Construction)*. 2020; (9): 9–19. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2020-9-9-19>. (in Russ.)
4. Diakonov I.P. Analysis of the “Fundex” pile performance in soft soils. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2017; 62(3): 55–8. DOI: <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-3-55-58>. (in Russ.)
5. Polunin V.M., Melnikov A.V., Druzhinin M.S., Tukkiya A.L., Development of technological settlement of building foundations in the process of high-frequency vibration extraction of piles. *Zhilishchnoe Stroitel'st-*

vo (Housing Construction). 2024; (5): 3–12. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-5-3-12>

6. Shuliatev O.A., Minakov D.K. Technological settlements during the construction of a diaphragm wal. *Construction and Geotechnics*. 2017; 8(3): 41–50. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2017.3.05>. (in Russ.)

7. Boldyrev G.G., Idrisov I.Kh., Miagkov K.A., Novichkov G.A. Numerical solution for the problem of drilling a hole with continuous three-bit auger. *Geotechnics*. 2015; (5): 40–53. (in Russ.)

8. Lande E.J., Ritter S., Karlsrud K., Nordal S. Understanding effects from overburden drilling of piles—a rational approach to reduce the impacts on the surroundings. *Canadian Geotechnical Journal*. 2024; 61(10): 2206–22. DOI: <https://doi.org/10.1139/cgj-2023-0404>.

9. Gaido A.N. Study of technological parameters of pile driving. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2012; 4(33):129–37. (in Russ.)

10. Evtukov S.A., Dobroborskii B.S. Application of pneumatic impact machines with a movable body in drilling rigs. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2015; 49(2): 145–8. (in Russ.)

11. Gonet A., Stryczek S., Fyda M. A review of pile machines and their selection criteria. *AGH Drilling, Oil, Gas*. 2015; 32(3). DOI: <https://doi.org/10.7494/drill.2015.32.3.469>.

12. Gaido A.N., Verstov V.V. Determination of technology parameters of carrying out piling works in the constrained urban environment conditions. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2017. 62(3): 84–94. DOI: <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-3-84-94>. (in Russ.)

13. Mangushev R.A., Ponomarev A.B. [On the issue of quality control of manufacturing and acceptance of bored piles]. *Construction and Geotechnics*. 2014. (3): 87–109. (in Russ.)

14. Osokin A.I., Sbitnev A.V., Serebriakova A.B., Tatarinov S.V. [Features of the device of bored piles in weak soils]. *Modern Industrial and Civil Construction*. 2006. (6):50–2. (in Russ.)

15. Tomlinson M., Woodward J. *Pile Design and Construction Practice*. Sixth edition. CRC Press; 2020; 608.

16. Sari O.L., Saputra A.A.I., Subhakti A., Putri A.P., Khala C.C.S. The influence in selection of pile type and foundation piling method. B: IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*. Banda Aceh, Indonesia; 2020: 012033. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1087/1/012033>.

17. Diakonov I.P., Koniushkov V.V. Features of the operation of the Fundex driven screw pile in heterogeneous soils. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2014. 6(47): 116–20. (in Russ.)

18. Shi D., Yang Y., Deng Y., Xue J. DEM modelling of screw pile penetration in loose granular assemblies considering the effect of drilling velocity ratio. *Granular Matter*. 2019; 21(74). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10035-019-0933-3>.

19. Zhao Q., Wang Y., Tang Y., Ren G., Qiu Z., Luo W., и др. Numerical Analysis of the Installation Process of Screw Piles Based on the FEM-SPH Coupling Method. *Appl Sci*. 2022; 17(12): 8508. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12178508>.

20. Mangushev R.A., Osokin A.I. *Geotechnics of Saint Petersburg: Monograph*. Moscow: Publishing house ASV; 2010: 264. (in Russ.)

21. Issakulov A.B., Zhussupbekov A.Zh., Wang D.W., Omarov A., Mukhanov D., Yessentayev A. Comparison of bearing capacities of model drilled micro piles using DDS and CFA technologies. *Bulletin of LN Gumilyov Eurasian National University Technical Science and Technology Series*. 2023. 145(4): 165–74. DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-7263-2023-145-4-165-174>.

22. Cherian A. Static Behavior of Strain Gauge Instrumented Continuous Flight Auger (CFA) Piles. *Jordan Journal of Civil Engineering*. 2022. 16(2): 229–41.

23. Arab M., Abdelmoghni M., Akl S., Dif A. Numerical Modeling of Unfavorable CFA Pile Drilling Conditions. *Geotech Geol Eng*. 2020. 38:6869–89. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01475-3>.

24. Gaido A.N., Pogoda A.G., Kolchedantsev L.M., Verzhinin D.V. Remote control system for technological parameters of pressed piles. *Computers and Geotechnics*. 2020. 11(3):18–28. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2020.3.02>. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Пономарев А.Б. Концепция исследования, научное руководство, научное редактирование текста.

Кораблев Д.С. Оценка рисков, связанных с технологиями устройства свайных фундаментов, разработка рекомендаций по выбору технологий устройства свайных оснований в условиях Санкт-Петербурга, доработка текста.

Паскачева Д.А. Анализ аварийных ситуаций на объектах строительства в условиях Санкт-Петербурга, корректировка выводов, развитие методологии, доработка текста, подготовка схем и рисунков

Авторами внесен равный вклад в разработку статьи.

CONTRIBUTIONS CO-AUTHORS

A.B. Ponomarev Research concept, scientific supervision, scientific editing of the text.

D.S. Korablev Assessment of risks associated with pile foundation construction technologies, development of recommendations for the selection of pile foundation construction technologies in the conditions of St. Petersburg, text revision.

D.A. Paskacheva Analysis of emergency situations at construction sites in the conditions of St. Petersburg, correction of conclusions, development of methodology, text revision, preparation of diagrams and drawings.

The authors contributed equally to the publication of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пономарев Андрей Будимирович – д-р техн. наук, проф., проф. и заведующий кафедрой «Промышленное и гражданское строительство» Санкт-Петербургского горного университета им. Екатерины II (199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д. 2).

ORCID ID: 0000-0001-6521-9423,
Scopus Author ID: 57217213346,
Researcher ID: 677082,
SPIN-код: 5629-8814,
e-mail: Ponomarev_AB@pers.spmi.ru

Паскачева Дарья Алексеевна – аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические машины», ассистент кафедры «Геотехника» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4).

ORCID ID: 0000-0001-6235-8604,
Scopus Author ID: 58204623100,
Researcher ID: 1203448,
SPIN-код: 7144-5497,
e-mail: dashaP17012000@yandex.ru

Кораблев Денис Сергеевич – аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические машины», ассистент кафедры «Геотехника» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4)

ORCID ID: 0009-0008-2265-428X,
Researcher ID: 1208845,
SPIN-код: 6642-0799,
e-mail: d.korablv@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey B. Ponomarev – Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Professor and Head of the Department of Industrial and civil construction, Saint Petersburg Mining University (2, 21rd Line of Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199106).

ORCID ID: 0000-0001-6521-9423,
Scopus Author ID: 57217213346,
Researcher ID: 677082,
SPIN-code: 5629-8814,
e-mail: Ponomarev_AB@pers.spmi.ru

Daria A. Paskacheva – Postgraduate student of the Department of Ground Transport and Technological Machines, Assistant Professor at the Department of Geotechnics Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., St. Petersburg, 190005)

ORCID ID: 0000-0001-6235-8604,
Scopus Author ID: 58204623100,
Researcher ID: 1203448,
SPIN-code: 7144-5497,
e-mail: dashaP17012000@yandex.ru

Denis S. Korablev – Postgraduate student of the Department of Ground Transport and Technological Machines, Assistant Professor at the Department of Geotechnics Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., St. Petersburg, 190005)

ORCID ID: 0009-0008-2265-428X,
Researcher ID: 1208845,
SPIN-code: 6642-0799,
e-mail: d.korablv@yandex.ru

Научная статья
УДК 625.76.08
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-386-395>
EDN: YUJKPM



ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОДНОКОВШОВЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЭКСКАВАТОРОВ

Р.Ф. Салихов, В.Н. Кузнецова, И.С. Кузнецов ✉

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

✉ ответственный автор
ilyxa_kyznetsov@vk.com

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье приведены результаты исследования технических параметров, отражающих использование одноковшовых гидравлических экскаваторов по времени. Выполнен анализ зависимостей, приведенных в нормативных документах, необходимых для обработки полученных данных. Были проанализированы существующие системы сбора данных с бортового компьютера одноковшового экскаватора. В качестве исследуемой машины был выбран экскаватор производства фирмы «Хитачи» (Япония).

Методы и материалы. Для определения коэффициентов использования по времени (без учета холостого хода и перемещения внутри объекта), холостого хода была описана методика сбора данных. Для обработки полученной базы данных было использовано ПО Excel и Statistica. Было выполнено описание гистограмм, формируемых при помощи ПО бортового компьютера. Предложен ряд формул, позволяющих оценить эффективность работы экскаватора без учета потерь времени на холостой ход.

Результаты. Была выполнена обработка полученной выборки при помощи ПО Statistica. Коэффициент использования по времени одноковшового экскаватора описывается бета-распределением, коэффициент холостого хода распределением Вейбула. Также получены параметры законов распределения коэффициентов использования по времени, холостого хода (математическое ожидание, коэффициент Стьюдента). По предложенным авторами зависимостям получены числовые характеристики выборок данных. Было установлено, что средняя доля холостого хода составляет 21% в течение смены, а его продолжительность около 2 ч.

Заключение. Полученные значения коэффициентов, характеризующих интенсивность эксплуатации, могут быть использованы эксплуатационными предприятиями при планировании темпов строительства объектов. Был сделан вывод, что полученные данные отличаются от значений, описанных в нормативных документах, а их внедрение позволит лучше планировать процесс производства работ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: интенсивность эксплуатации, коэффициент использования машины по времени, коэффициент использования машины по мощности, экскаватор, производительность экскаватора

Статья поступила в редакцию 28.03.2025; одобрена после рецензирования 22.04.2025; принята к публикации 16.06.2025.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Салихов Р.Ф., Кузнецова В.Н., Кузнецов И.С. Исследование интенсивности эксплуатации одноковшовых гидравлических экскаваторов // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, №. 3 С. 386-395. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-386-395>

© Салихов Р.Ф., Кузнецова В.Н., Кузнецов И.С., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-386-395>

EDN: YUJKPM

RESEARCH INTO OPERATION EFFICIENCY OF SINGLE-BUCKET HYDRAULIC EXCAVATORS

Rinat F. Salikhov, Viktoria N. Kuznetsova, Ilya S. Kuznetsov ✉

The Siberian State Automobile and Highway University,
Omsk, Russia

✉ corresponding author
ilyxa_kyznetsov@vk.com

ABSTRACT

Introduction. The article presents the results of research of technical parameters reflecting the use of single-bucket hydraulic excavators by time. The dependencies given in normative documents necessary for processing of the obtained data are analyzed. The existing systems of data collection from the on-board computer of single-bucket excavator were analyzed. The excavator manufactured by Hitachi (Japan) was chosen as the machine under study.

Methods and materials. To determine the utilization rates by time (excluding idling and movement within the object), idling, the data collection methodology was described. Excel and Statistica software was used to process the obtained database. The description of histograms formed with the help of on-board computer software was performed. A number of formulas allowing to estimate the efficiency of excavator operation without taking into account time losses for idling were proposed.

Results. The obtained sample was processed with the help of Statistica software. Time utilization factor of single-bucket excavator is described by beta-distribution, idling factor by Weibull distribution. The parameters of distribution laws of time utilization and idling coefficients (mathematical expectation, Student's coefficient) were also obtained. Numerical characteristics of the data samples were obtained according to the dependencies proposed by the authors. It was found that the average share of idling is 21% during the shift, and its duration is about 2 hours.

Conclusion. The obtained values of the coefficients characterizing the intensity of operation can be used by operating enterprises in planning the rate of construction of facilities. It was concluded that the obtained data differ from the values described in normative documents, and their implementation will allow better planning of the process of work production.

KEYWORDS: operating efficiency, machine time efficiency, machine capacity efficiency, excavator, excavator performance

The article was submitted: March, 28, 2025; approved after reviewing: April, 22, 2025; accepted for publication: June, 16, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Salikhov R.F., Kuznetsova V.N., Kuznetsov I.S. Research into operation efficiency of single-bucket hydraulic excavators. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22. (3): 386-395. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-386-395>

© Salikhov R.F., Kuznetsova V.N., Kuznetsov I.S., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение качества и своевременной сдачи автомобильных дорог является приоритетным направлением в российской экономике. Строительство новых автомобильных дорог не обходится без применения строительной техники. Своевременная сдача в срок объектов строительства повышает требования к планированию проведения механизированных работ. Строительство и ввод объектов в срок зависит от разных факторов: природно-климатических, организационных, экономических, технических¹ [1, 2, 3, 4]. Данные факторы требуют учета, и их влияние отражено в нормативных документах, в частности в МДС 12-13.2003 – «Механизация строительства. Годовые режимы работы строительных машин».

Данный нормативный документ дает рекомендации по учету различных факторов в течение года. Для учета использования техники во время рабочей смены применяется коэффициент внутрисменного использования

$$K_e = \frac{t_{CM}^{\phi}}{t_{CM}}, \quad (1)$$

где t_{CM}^{ϕ} – фактическое время работы машины за смену; t_{CM} – продолжительность рабочей смены.

Коэффициент использования внутрисменного времени определяется на основании данных систематических наблюдений о внутрисменных потерях рабочего времени.

В СП 12-134-2001 приведен коэффициент использования по времени, который является аналогом коэффициента внутрисменного использования и составляет $K_e = 0,86$ и $0,90$ для экскаваторов 1-2 и 3-4 типоразмерной групп соответственно.

Однако, как показали дальнейшие исследования, рекомендуемая величина завышена и требует корректировки с учетом местных условий. Одной из причин завышения данного коэффициента является повышение доли холостого хода в течение смены [1]

$$K_e = K_n \cdot K_n^x, \quad (2)$$

где K_n – коэффициент перехода от продолжительности рабочего времени в машино-часах к наработке двигателя в моточасах, моточас/машино-час; K_n^x – коэффициент, учитывающий потери полезного времени из-за работы двигателя на холостых оборотах, машино-час/моточас.

В процессе эксплуатации строительных, дорожных машин коэффициент K_n снижается с 0,82 до 0,60 на интервале 0...6 000 моточасов [1].

Интерес для авторов представляет доля холостого хода в рабочей смене однокочшевых гидравлических экскаваторов.

Поэтому одной из задач исследования является определение параметров случайной величины закона распределения продолжительности холостого хода.

Для проведения данных исследований на производстве, как правило, создается комиссия, которая отслеживает хронометраж продолжительности рабочего времени, холостого хода, потерь времени по организационным, техническим, технологическим и климатическим причинам. Т.е. работа достаточно трудоемкая и требующая значительных трудовых затрат для обеспечения процесса хронометрирования².

Развитие современных средств автоматического учета различных параметров применяется в хронометраже работы строительной и дорожной техники, и, в первую очередь, на технике, осуществляющей транспортные операции по перевозке, например, строительных материалов. Современные системы позволяют учитывать продолжительность холостого хода, продолжительность работы при перевозке грузов автосамосвалов. В последнее время нашли широкое применение бортовые системы измерения производительности строительных машин (например, путем измерения давления в гидроцилиндрах подъема ковша фронтального погрузчика), в связи с чем ряд работ направлен на фактическое измерение данного параметра, что позволяет оперативно отслеживать причины его изменения в процессе эксплуатации [5, 6, 7, 8].

¹ Технологические машины и комплексы в дорожном строительстве (производственная и техническая эксплуатация): учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» и специалистов по профилю «Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование» / В.Б. Пермяков, В.И. Иванов, С.В. Мельник [и др.]. М.: Издательский дом «БАСТЕТ», 2014. 752 с. (Высшее профессиональное образование – бакалавриат и магистратура). ISBN 978-5-903178-37-7.

² Кузнецов И.С., Бондаренко А.В. Системы измерения наработки дорожно-строительной техники // Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, приуроченной к празднованию 300-летия Российской академии наук, Омск, 25–26 апреля 2024 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2024. С. 12–15.

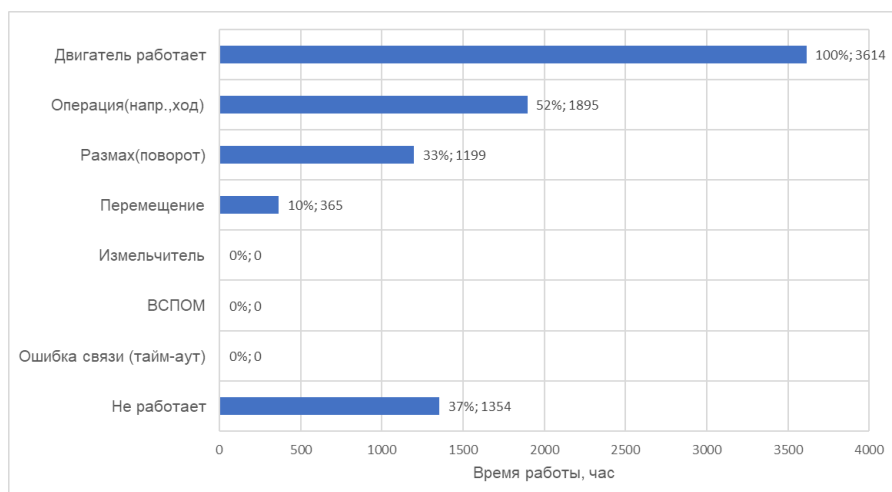


Рисунок 1 – Диаграмма учета продолжительности работы экскаватора при различных технологических операциях, отсутствии работы, общей наработке двигателя внутреннего сгорания
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Diagram of accounting for different scenarios of excavator operation: different purposes, inoperable mode, internal combustion engine operation time
Source: compiled by the authors.

Например, на сегодняшний день ряд компаний предлагает устанавливать комплекс датчиков, позволяющий учитывать следующие параметры и выполнять такие функции: измерение расхода топлива, обеспечение защиты от угона, определение местонахождения в режиме онлайн, скорости перемещения, степени загрузки, величину наработки в смену посредством электронных счетчиков моточасов [9, 10, 11]. Спутниковая система слежения за мобильными объектами «VOYAGER 2 ГЛОНАСС» с версией прошивки 07.502.141 и стандартом GSM 900/1800 МГц позволяет учитывать продолжительность работы технологического оборудования, а также транспортный режим техники [12].

Японская фирма «Хитачи» предложила свою систему учета работы одноковшовых экскаваторов (ЭО) в режимах холостого хода, отсутствия фронта работ и при выполнении технологических операций (рисунок 1). Данную систему авторы исследовали более подробно. Как видно из рисунка 1, доля работы механизма передвижения вычисляется при помощи программно-диагностического комплекса MIC Dataviewer и составляет в среднем 10% от общей наработки машины. Информация в программно-диагностический комплекс поступает с датчиков давления (контуры вращения поворотной части, механизма передвижения), движения рукояти к стреле, подъема стрелы. Датчики давления размещены в гидрораспределителе системы управления ЭО [13, 14].

Целью предлагаемой статьи является исследование коэффициента использования чистого времени на примере одноковшового гидравлического экскаватора, определенного путем обработки информации, полученной с помощью бортовых автоматизированных систем учета времени. Для достижения поставленной цели была произведена оценка продолжительности организационных простоев, работы на холостом ходу, выполнения технологических операций.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для получения информации по продолжительности организационных простоев, работы на холостом ходу, выполнения технологических операций был проведен сбор данных с системы встроенной бортовой диагностики, позволяющей осуществлять мониторинг этих параметров ЭО. Считываемая информация может накапливаться на протяжении нескольких тысяч моточасов. В исследуемом случае информация была накоплена на протяжении трех лет на двух экскаваторах.

Для получения результатов измерения параметров применялся фирменный диагностический сканер, представляющий собой считывающее устройство (диагностическую колодку с кабелем, подключаемым к переносному компьютеру с программным обеспечением или программно-диагностическим комплексом MICDataviewer) [15, 16].

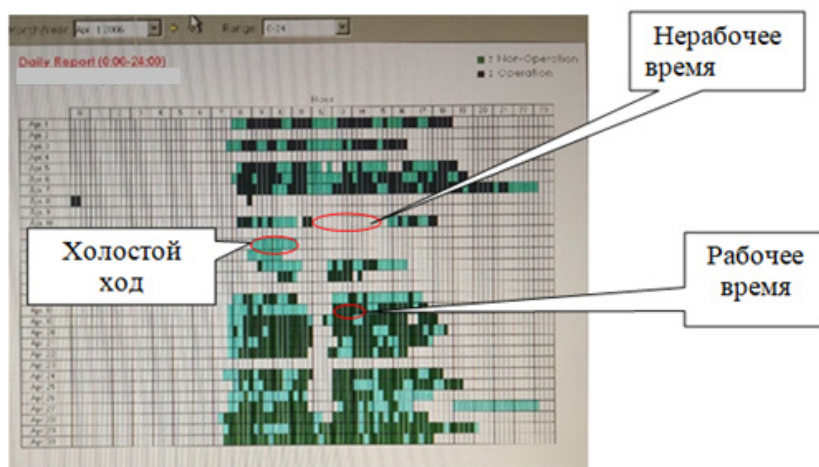


Рисунок 2 – Гистограмма распределения времени работы одноковшового экскаватора
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Histogram of single-bucket excavator operating time distribution
Source: compiled by the authors.

Программное обеспечение сканера исследуемой модели ЭО позволяет не только выводить параметры в режиме онлайн, но и скачивать их в виде файла для последующей обработки в среде MS Excel, Statistika и других программах.

Величины параметров выдаются в виде гистограммы с долевым распределением по времени (рисунок 2).

Как видно из рисунка 3, программное обеспечение ЭО автоматически вычисляет время отсутствия фронта работ у машины, однако не учитывает моменты начала и окончания рабочей смены. Для устранения данного недостатка необходимо доработать программное обеспечение, которое бы позволяло, например, вводить моменты начала и окончания рабочей смены с учетом утвержденного режима работы на эксплуатационном предприятии. Также отсутствует автоматизированный учет продолжительности работы ДВС на холостом ходу. В качестве достоинств программного обеспечения необходимо отметить возможность автоматизированного расчета продолжительности перемещения ЭО, выполнения рабочих операций [17, 18, 19].

Для существующей разработанной автоматизированной системы учета продолжительности работы авторы предложили ряд формул, с помощью которых можно рассчитать коэффициент использования «чистого» времени экскаваторов, т.е. без учета потерь времени на холостой ход. Для расчета коэффициента

использования экскаватора по времени полученная зависимость (3)

$$K_e = t_p - ((t_p + t_{xx}) \cdot K_{перем}) / (t_p + t_{np} + t_{xx}), \quad (3)$$

где t_p – продолжительность работы машины, моточасы; t_{xx} – продолжительность холостого хода, моточасы; t_{np} – продолжительность отсутствия фронта работ, часы; $K_{перем}$ – коэффициент, отражающий долю потерь времени на перемещение ЭО внутри объекта.

Коэффициент $K_{перем}$ рассчитывается по зависимости (4)

$$K_{перем} = t_{перем} / (t_p + t_{xx}), \quad (4)$$

где $t_{перем}$ – продолжительность потерь времени на перемещение ЭО внутри объекта, моточасы.

Продолжительность холостого хода отдельно оценивается автоматизированной системой учета времени. Для того чтобы определить коэффициент учета холостого хода на базе автоматизированной системы, можно использовать зависимость (5)

$$K_{xx} = t_{xx} / (t_p + t_{xx}). \quad (5)$$

С использованием представленных зависимостей были обработаны выборки данных, собранные автоматизированной системой учета продолжительности работы экскаватора.

Гистограмма производительности экскаватора ZX330 по месяцам

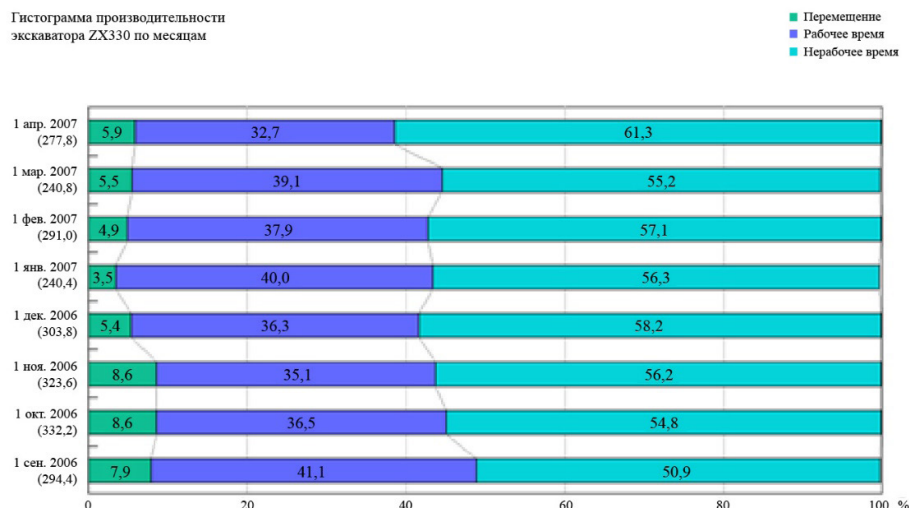


Рисунок 3 – Гистограмма распределения времени работы по месяцам одноковшового экскаватора
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Histogram of the distribution of operating time of a single-bucket excavator by month
Source: compiled by the authors.

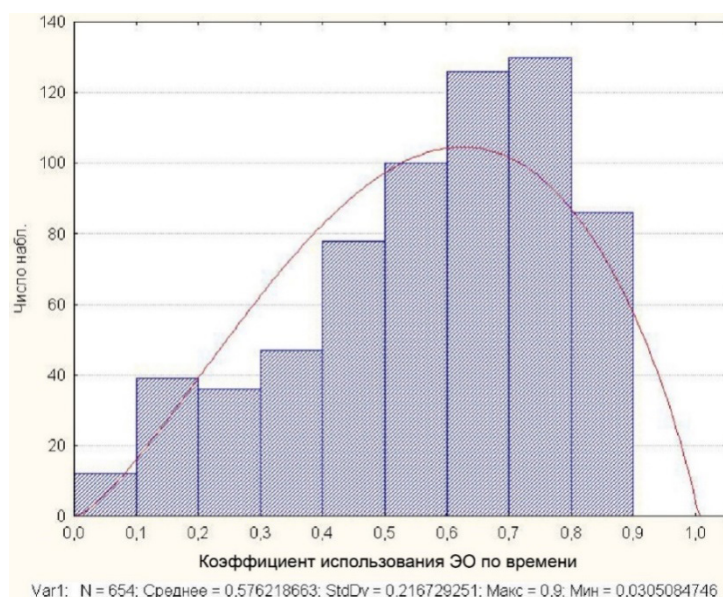


Рисунок 4 – Экспериментальные значения частот и аппроксимирующая кривая после их статистической обработки коэффициента чистого использования времени
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Experimental values of frequencies and approximating curve after statistical processing of operation factor
Source: compiled by the authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате обработки выборки данных (654 наблюдения) и расчета по зависимости (3) был построен график эмпирических и теоретических частот коэффициента чистого использования времени экскаватора модели ZX

330, описываемый законом бэта-распределения (рисунок 4).

Аналогичные исследования были проведены по параметру продолжительности холостого хода ЭО и коэффициенту холостого хода (рисунки 5, 6). Расчеты были выполнены с использованием зависимостей (4, 5).

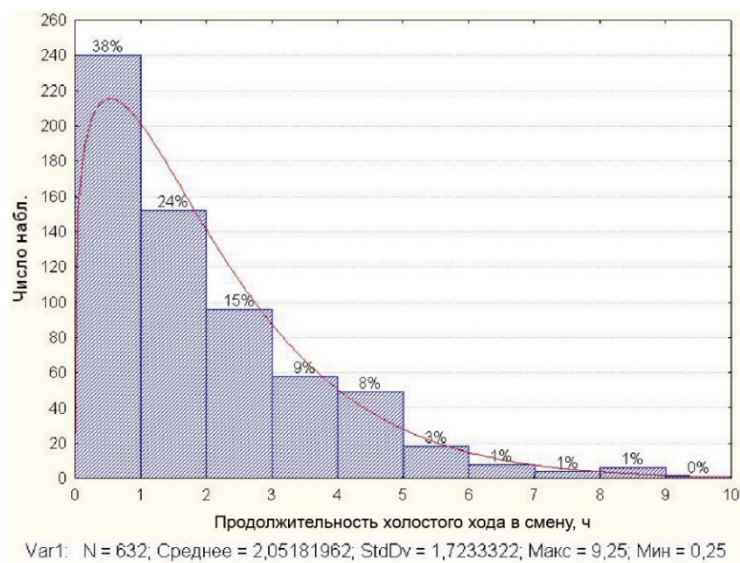


Рисунок 5 – Экспериментальные значения частот и аппроксимирующая кривая после их статистической обработки продолжительности холостого хода экскаватора
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Experimental values of frequencies and approximating curve after statistical processing the excavator idling mode time
Source: compiled by the authors.

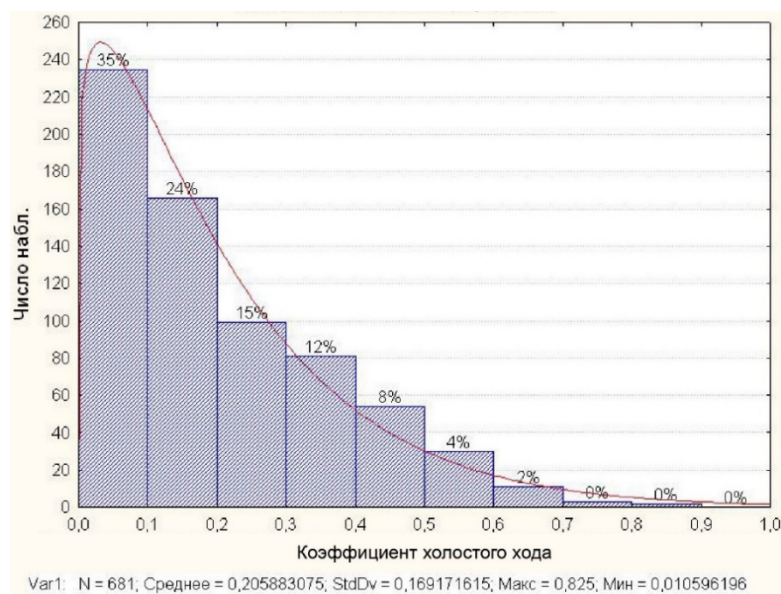


Рисунок 6 – Экспериментальные значения частот и аппроксимирующая кривая после их статистической обработки коэффициента холостого хода экскаватора
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Experimental values of frequencies and approximating curve after statistical processing the excavator idle speed coefficient
Source: compiled by the authors.

Таблица
Числовые характеристики выборок данных
Источник: составлено авторами.

Table
Numerical characteristics of data samples
Source: compiled by the authors.

	Коэффициент чистого использования времени	Продолжительность холостого хода экскаватора, ч	Коэффициент холостого хода экскаватора
Среднее значение	0,576	2,05	0,206
Среднеквадратическое отклонение	0,22	1,72	0,17
Минимальное значение	0,03	0,25	0,011
Максимальное значение	0,9	9,25	0,825
t-критерий Стьюдента	0,447	≈0	0,07

Для каждой выборки были вычислены её числовые характеристики, представленные в таблице ^{3,4,5,6}.

При анализе данных видно, что средняя доля холостого хода составляет 21% или $K_{\text{хх}} = 0,21$ в течение смены, а его продолжительность составляет около 2 ч. На основе полученных выборок были установлены средние значения параметров коэффициента использования экскаватора по времени, продолжительность холостого хода и коэффициента холостого хода, позволяющие оптимизировать рабочий процесс экскаватора для повышения эффективности работы техники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований был получен коэффициент использования ЭО по времени, продолжительность и коэффициент холостого хода на основе применения современных средств автоматизации учета продолжительности работы машин. Полученные данные отличаются от рекомендуемых значений существующих нормативных документов и представлены к внедрению.

ДАЛЬНЕЙШЕЕ НАПРАВЛЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

В дальнейшем авторы планируют использовать полученные результаты для прогнозирования динамики производительности одноковшовых экскаваторов других моделей при

выполнении разных типов задач. Приведенные зависимости могут быть использованы при совершенствовании программного обеспечения существующих автоматизированных систем учета времени работы строительных машин.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Максименко А.Н., Кутузов В.В., Сидоров А.Н. Влияние сезона и наработки с начала эксплуатации на производительность строительных и дорожных машин и себестоимость механизированных работ // Грузовик &. 2010. № 2. С. 16–21.
2. Salikhov R.F., Permyakov V.B., Filippov Y.O., Grusnev M.G. A study of dynamics of the operational performance of a single-bucket excavator, taking into account the operating time during construction of transport infrastructure of oil and gas facilities // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 1901(1).0120981313
3. Dyorina N.V., Velikanov V.S., Rabina E.I., Polyakova L.S. About the influence degree of ergonomic properties on the generalized ergonomic indicator of an excavator using a set of methods // Journal of Physics: Conference Series. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/4/044086>
4. Монгуш С.Ч., Чооду О.А., Евтюков С.А. Моделирование процессов влияния климатических факторов и рельефа местности на производительность наземных транспортно-технологических машин // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2019. № 3 (47). С. 108–111.
5. Максименко А.Н., Кутузов В.В., Тимофеев Г.С., Васильев В.В. Учет и оценка эффективности использования каждой машины парка в строительстве // Вестник Белорусско-Российского университета. 2010. № 4. С. 21–28.

³ Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие. М.: Высшая школа, 1997. 479 с.

⁴ Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: учебное пособие для студентов вузов. Изд. 4-е, стер. М.: Высш. Шк., 1998. 400 с.: ил.

⁵ Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: Наука, 1986. 559 с.

⁶ Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 1998. 479 с.

6. Репин С.В. Концепция эффективности эксплуатации строительных машин // Строительные и дорожные машины. 2009. № 2. С. 27–31; № 4. С. 21–25.
7. Permyakov V.B., Salikhov R.F., Musagitova G., Levin N. Yu. Designing optimal structure of road construction machines kits // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. DOI 10.1088/1742-6596/1260/8/082004
8. Монгуш С.Ч., Монгуш С.В. Критериальные параметры, предлагаемые для описания путей оптимизации эксплуатации наземных транспортно-технологических машин в республике Тыва // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. 2019. № 2(46). Выпуск 3. С. 42–50.
9. Максименко А.Н., Кравченко С.Е., Макацария Д.Ю., Кутузов В.В., Тимофеев Г.С., Васильев В.В. Использование информационных технологий при планировании технической эксплуатации строительных и дорожных машин // Грузовик & 2006. № 5. С. 20–22.
10. Грушецкий С.М., Евтюков С.А., Репин С.В., Кузнецов А.А. Определение технической и эксплуатационной производительностей дорожных машин на основе анализа объемов работ // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. № 1. С. 38–52. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2021-07-01-38-52>
11. Rashidi A., Rashidi Nejad H., Maghiar M. Productivity Estimation of Bulldozers using Generalized Linear Mixed Models // *Journal of Civil Engineering*. 2014. DOI 10.1007/s12205-014-0354-0
12. Завьялов А.М., Завьялов М.А., Кузнецова В.Н., Мещеряков В.А. Математическое моделирование рабочих процессов дорожных и строительных машин: имитационные и адаптивные модели. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2012. 408 с. ISBN 978-5-93204-615-9.
13. Кузнецова В.Н., Савинкин В.В. К вопросу повышения энергоэффективности гидропривода машин // Вестник СибАДИ. 2013. № 5(33). С. 22–25.
14. Грушецкий С.М., Евтюков С.А., Репин С.В., Карро Г.А. Производительность как качественный критерий оценки эффективности всех этапов системы жизненного цикла дорожных машин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2020. № 4 (63). С. 36–42.
15. Салихов Р.Ф., Попков В.И. Методика расчета изменения производительности одноковшового экскаватора в процессе эксплуатации // Механизация строительства. 2018. № 1. С. 2–7.
16. Ларин П.Г., Ерофеев М.Н., Кравченко И.Н., Жуков Л.В. Методика определения оптимальных сроков службы машин с применением автоматизированной системы управления // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 1. URL: <https://s.science-education.ru/pdf/2014/1/266.pdf> (дата обращения: 27.03.2025)
17. Репин С.В., Скакун С.А. Разработка информационной автоматизированной системы управления техническим обслуживанием и ремонтом строительных машин // Строительные и дорожные машины. 2009. № 11. С. 35–39.
18. Бердников И.Е., Озорнин С.П. Математические модели определения количества отказов транспортно-технологических машин в зависимости от факторов условий эксплуатации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 2 (54). С. 134–141.
19. Чечуев В.Е. Методика расчета коэффициента сохранения эффективности строительных машин по данным эксплуатации // Строительные и дорожные машины. 2021. № 5. С. 15–20.

REFERENCES

1. Maksimenko A.N., Kutuzov V.V., Sidorov A.N. Influence season and operating time from the operation beginning on productivity of construction equipment and the cost price of the mechanized works. *Truck*. 2010; 2: 16-21. (in Russ.)
2. Salikhov R.F., Permyakov V.B., Filippov Y.O., Grusnev M.G. A study of dynamics of the operational performance of a single-bucket excavator, taking into account the operating time during construction of transport infrastructure of oil and gas facilities. *Journal of Physics: Conference Series* *this link is disabled*. 2021. 1901(1).0120981313
3. Dyorina N.V., Velikanov V.S., Rabina E.I., Polyakova L.S. About the influence degree of ergonomic properties on the generalized ergonomic indicator of an excavator using a set of methods. *Journal of Physics: Conference Series* *this link is disabled*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/4/044086>
4. Mongush S.Ch., Choodu O.A., Evtyukov S.A. Modeling the influence of climatic factors and terrain on the performance of ground transport and technological machines. *Polytechnical Bulletin. Series: Engineering Studies*. 2019; 47: 108–111. (in Russ.)
5. Maksimenko A.N., Kutuzov V.V., Timofeev G.S., Vasiliev V.V. The account and estimation of use efficiency of each car in the park in building. *Bulletin of the Belarusian-Russian University*. 2010; 4: 21–28. (in Russ.)
6. Repin S.V. Concept of the efficiency of operation of construction machines. *Construction and road machines*. 2009; 2: 27–31. (in Russ.)
7. Permyakov V.B., Salikhov R.F., Musagitova G., Levin N. Yu. Designing optimal structure of road construction machines kits. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. DOI 10.1088/1742-6596/1260/8/082004
8. Mongush S.Ch., Mongush S.V. Criterial parameters proposed for describing the optimization ways to operate ground transport technological machines in the republic of Tyva. *Vestnik of Tuvan State University. Technical Sciences. Technical and physical-mathematical sciences*. 2019; 2: 42-50. (in Russ.)
9. Maksimenko A.N., Kravchenko S.E., Makatsaria D.Yu., Kutuzov V.V., Timofeev G.S., Vasiliev V.V. Use of information technologies in planning the technical operation of construction and road machines. *Truck &*. 2006; 5: 20–22. (in Russ.)
10. Grushetsky S.M., Evtyukov S.A., Repin S.V., Kuznetsov A.A. Determination of technical and operating performance of road machines based on analysis

of the scope of work. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2021; 1: 38–52. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2021-07-01-38-52>

11. Rashidi A., Rashidi Nejad H., Maghiar M. Productivity Estimation of Bulldozers using Generalized Linear Mixed Models. *Journal of Civil Engineering*. 2014. DOI 10.1007/s12205-014-0354-0

12. Zavyalov A.M., Zavyalov M.A., Kuznetsova V.N., Meshcheryakov V.A. *Mathematical modeling of work processes of road and construction machines: simulation and adaptive models*. Omsk: Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), 2012: 408. (in Russ.)

13. Kuznetsova V.N., Savinkin V.V. On the issue of increasing the energy efficiency of the hydraulic drive of machines. *Vestnik SibADI*. 2013; 5 (33): 22–25. (in Russ.)

14. Grushetsky S. M., Evtyukov S. A., Repin S. V., Karro G. A. Productivity as a quality criterion for evaluating the efficiency of all stages of the life cycle system of road machines. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*. 2020; (63): 36–42. (in Russ.)

15. Salikhov R.F., Popkov V.I. Methodology for calculation of change of productivity of the odnokovshovy excavator in the course of an operating time. *Mechanization of construction*. 2018; 1: 2–7. (in Russ.)

16. Larin P.G., Erofeev M.N., Kravchenko I.N., Zhukov L.V. Methodology for Determining Optimal Service Life of Machines Using an Automated Control System. *Methodology of determination of optimal terms of service life of machines with application of the automated information control system*. 2014; 1. Available at: <https://s.science-education.ru/pdf/2014/1/266.pdf> (accessed 27.03.2025) (in Russ.)

17. Repin S.V., Skakun S.A. Development of an Information Automated Control System for Technical 9 Maintenance and Repair of Construction Machines. *Construction and Road Machines*. 2009; 11: 35–39 (in Russ.)

18. Berdnikov I.E., Ozornin S.P. Mathematical models for determining the transport-technological machines failure rate depending on the factors of operating conditions. *Modern Technologies. System analysis. Modeling*. 2017; 2 (54): 134–141. (in Russ.)

19. Chechuev V.E. Methodology for calculating the coefficient of maintaining the efficiency of construction machines according to operation data. *Construction and road machines*. 2021; 5: 15–20. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД СОАВТОРОВ

Салихов Р.Ф. Обзор и анализ публикаций по заявленной тематике. Формулирование проблемы, направления и темы исследования. Постановка задач исследования. Написание статьи (40%).

Кузнецова В.Н. Руководство процессом разработки темы. Выбор методологии и методов исследования. Написание статьи. Формулировка результатов и выводов (30%).

Кузнецов И.С. Обработка результатов эксперимента. Статистическая обработка данных (30%).

COAUTHORS' CONTRIBUTION

R.F. Salikhov Analysis and review of publications on the problem under study. Identifying the problem, defining the research area and objectives. Writing the manuscript (40%).

V.N. Kuznetsova Guiding the process of topic research, choosing methodology and research methods, writing the manuscript. Formulation of results and conclusions (30%).

I.S. Kuznetsov Processing experimental results. Statistical processing of data (30%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Салихов Ринат Фокилевич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 5).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9619-7789>,

SPIN-код: 3196-9174,

e-mail: salikhorinat@yandex.ru

Кузнецова Виктория Николаевна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3546-0894>,

SPIN-код: 1039-7546,

e-mail: dissoovetsibadi@bk.ru

Кузнецов Илья Сергеевич – ст. преп. кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6524-4976>,

SPIN-код: 6890-3069,

e-mail: ilyxa_kyznetsov@vk.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rinat F. Salikhov – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Maintenance and operation of transport and technological machines and complexes in construction Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (Mira street, 5, Omsk, 644050).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9619-7789>,

SPIN code: 3196-9174,

e-mail: salikhorinat@yandex.ru

Victoria N. Kuznetsova – Dr. of Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of “Operation of Oil and Gas and Construction Equipment”, Siberian State Automobile and Road University (SibADI) (644050, Omsk, ave. Mira, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3546-0894>,

SPIN code: 1039-7546,

e-mail: dissoovetsibadi@bk.ru

Ilya S. Kuznetsov – Senior Lecturer of the Department “Operation of Oil and Gas and Construction Equipment”, Siberian State Automobile and Road University (SibADI) (644050, Omsk, ave. Mira, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6524-4976>,

SPIN code: 6890-3069,

e-mail: ilyxa_kyznetsov@vk.com

Научная статья

УДК 624.138.22: 51-7

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-396-416>

EDN: ITFWJO



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРАЦИОННОГО КАТКА НА ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ «РАМА-ВАЛЕЦ-ГРУНТ»

И.С. Тюремнов

Ярославский государственный технический университет,

г. Ярославль, Россия

tyuremnovis@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Вибрационные катки широко применяются для уплотнения грунтов в различных видах строительства. Технологическая эффективность вибрационных катков зависит от их технических характеристик, в том числе от частоты и вынуждающей силы колебаний, а также свойств грунта.

Материалы и методы. Для исследования взаимодействия элементов системы «рама-валец-грунт» разработана трёхмассная реологическая модель, позволяющая исследовать отрывные и безотрывные режимы колебаний вальца. Учет деформируемости вальца позволил сформировать более общую реологическую модель, применимую не только к гладковальцовым вибрационным каткам, но и к вибрационным каткам с гидрошинными, пневмошинными, обрезиненными и другими конструкциями деформируемых вальцов.

Результаты. По разработанной реологической модели был проведен вычислительный эксперимент для вибрационного катка ДМ-614. Значения максимальной контактной силы $F_{с}^{max}$, передаваемой вальцом на грунт, как правило, меньше значения вынуждающей силы P . При увеличении значения вынуждающей силы P и коэффициента упругого сопротивления грунта k_s значение $F_{с}^{max}$ незначительно возрастает. При увеличении частоты колебаний уменьшается размах вертикальных колебаний вальца и его рамы, а также значения $F_{с}^{max}$ во всём диапазоне допустимых значений k_s . Из-за нарушения симметричности осциллограммы контактной силы при переходе от режима «постоянный контакт» к режиму «частичный отрыв» с увеличением частоты колебаний вместо ожидаемого уменьшения значений времени нагружения t_n и разгрузки грунта t_p наблюдается их увеличение при определенных сочетаниях значений вынуждающей силы P , частоты колебаний f и свойств грунта k_s . Поэтому при уплотнении грунта в завершающей стадии (при высоких значениях k_s) целесообразно увеличение частоты колебаний не только с целью предотвращения перехода в нежелательный режим «двойной прыжок», но и для увеличения продолжительности действия контактных напряжений, определяющей глубину их распространения и глубину зоны уплотнения грунта.

Обсуждение и заключение. Результаты исследования позволяют получить не только качественное описание влияния основных динамических характеристик вибрационного катка на его технологическую эффективность, динамические нагрузки на элементы конструкции и вибробезопасность, но и дать количественную оценку этих показателей. Проведенный анализ показал, что при проектировании новых и модернизации существующих вибрационных катков необходимо учитывать реализуемый режим колебаний, что ранее не учитывалось в практике отечественного дорожно-строительного машиностроения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грунт, уплотнение, вибрация, каток вибрационный, моделирование реологическое, моделирование динамическое, вынуждающая сила, частота колебаний, время нагружения, время разгрузки, контактная сила

БЛАГОДАРНОСТИ: автор выражает благодарность д-ру техн. наук, проф. ЯГТУ Е.М. Скурыгину за консультации при разработке реологической модели. Также автор выражает благодарность редактору и рецензентам данной статьи.

Статья поступила в редакцию 01.04.2025; одобрена после рецензирования 03.06.2025; принята к публикации 16.06.2025.

© Тюремнов И.С., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

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: Тюремнов И.С. Исследование влияния динамических характеристик вибрационного катка на особенности взаимодействия элементов системы «рама-валец-грунт» // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 3. С. 396-416. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-396-416>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-396-416>

EDN: ITFWJO

INVESTIGATION INTO THE INFLUENCE OF VIBRATORY ROLLER DYNAMIC CHARACTERISTICS ON INTERACTION FEATURES OF FRAME-DRUM-SOIL SYSTEM ELEMENTS

Ivan S. Tyuremnov

Yaroslavl State Technical University,

Yaroslavl, Russia

tyuremnovis@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Vibratory rollers are widely used for soil compaction in various types of construction. The technological efficiency of vibratory rollers depends on their technical characteristics, including the frequency and driving force of vibrations, as well as the properties of the soil.

Materials and methods. To study the interaction of the elements of the Frame–Drum–Soil system, a three-mass rheological model has been developed that makes it possible to study the detachable and continuous modes of oscillation of the roller. Taking into account the deformability of the drum made it possible to form a more general rheological model applicable not only to smooth-wheel vibratory rollers, but also to vibratory rollers with hydro-spring, pneumatic, rubberized and other designs of deformable drums.

Results. According to the developed rheological model, a computational experiment was conducted for the DM-614 vibratory roller. The values of the maximum contact force F_{c}^{max} transmitted by the roller to the ground are usually less than the value of the driving force P . With an increase in the value of the driving force P and the coefficient of elastic resistance of the soil k_s , the value of F_{c}^{max} increases slightly. As the oscillation frequency increases, the vertical oscillation range of the roller and its frame decreases, as well as the values of F_{c}^{max} over the entire range of permissible values of k_s . Due to the violation of the symmetry of the contact force waveform during the transition from the "constant contact" mode to the "partial separation" mode, with an increase in the oscillation frequency, instead of the expected decrease in the loading time t_n and unloading time t_p , their increase is observed with certain combinations of the driving force P , the oscillation frequency f and the soil properties k_s . Therefore, when compacting the soil in the final stage (at high values of k_s), it is advisable to increase the oscillation frequency not only to prevent the transition to an undesirable "double jump" mode, but also to increase the duration of contact stresses, which determines the depth of their propagation and the depth of the soil compaction zone.

Discussion and conclusion. The results of the study make it possible to obtain not only a qualitative description of the impact of the main dynamic characteristics of a vibratory roller on its technological efficiency, dynamic loads on structural elements and vibration safety, but also to quantify these indicators. The analysis showed that when designing new and upgrading existing vibratory rollers, it is necessary to take into account the implemented oscillation mode, which was not previously taken into account in the practice of domestic road construction engineering.

KEYWORDS: soil, compaction, vibration, vibratory roller, rheological modeling, dynamic modeling, driving force, oscillation frequency, loading time, unloading time, contact force

The article was submitted: April 01, 2025; approved after reviewing: June 04, 2025; accepted for publication: June 16, 2025.

© Tyuremnov I.S., 2025



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

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Tyuremnov I.S. Investigation into the influence of vibratory roller dynamic characteristics on interaction features of Frame-Drum-Soil system elements. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (3): 396-416. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-396-416>

ВВЕДЕНИЕ

Вибрационные катки широко применяются для уплотнения грунтов в дорожном, промышленном, гражданском, мелиоративном и других видах строительства. На эффективность уплотнения грунта вибрационным катком влияют такие характеристики, как масса вальца, масса рамы, вынуждающая сила и частота колебаний, количество и характеристики виброизоляторов вальца, диаметр и ширина вальца, скорость движения, режим управления вибрацией и др. При этом необходимо учитывать характеристики уплотняемого грунта (вид грунта, содержание глинистых частиц, влажность, коэффициент уплотнения и др.), а также особенности объекта производства работ (требуемая глубина уплотнения и др.). С учетом широкого диапазона изменения характеристик уплотняемых грунтов и условий их уплотнения на различных объектах, задача обоснования технических характеристик вибрационных катков при их проектировании или модернизации является сложной многопараметрической задачей, не имеющей до настоящего времени своего точного решения.

Несмотря на многолетний опыт производства и эксплуатации вибрационных катков, производители до сих пор не пришли к единому мнению по обоснованию численных значений вышеприведенных характеристик катков, следствием чего является существенный разброс значений параметров, отвечающих на силовые возможности вибрационных катков (вынуждающая сила, относительная вынуждающая сила и частота колебаний) у различных

моделей вибрационных катков сопоставимой массы, выпускаемых различными производителями [1, 2].

Для исследования влияния характеристик вибрационных катков на результаты уплотнения грунтов в различных условиях исследователями применяются различные методы моделирования: метод конечных элементов¹ [3, 4, 5], метод дискретных элементов [6, 7, 8], комбинированные методы [9]. Наибольшее распространение при исследовании влияния характеристик вибрационных катков на особенности их взаимодействия с уплотняемым грунтом получил метод реологического моделирования. Различными исследователями рассматривались одномассные реологические модели² [10, 11, 12, 13]; двухмассные реологические модели, учитывающие массы вальца и уплотняемого грунта или массы вальца и рамы катка³ [14, 15, 16, 17]; трёхмассные, учитывающие массы вальца, рамы и грунта [18, 19, 20], а также различные варианты многомассных моделей⁴ [21]. Свойства грунта в реологических моделях моделируются соединением в различных комбинациях идеализированных элементов упругого, вязкого и пластического сопротивлений, а также массой грунта, характеризующей инерционное сопротивление деформированию грунта. Реологические модели позволяют исследовать как безотрывные режимы взаимодействия вибрационного вальца с грунтом (вертикальные колебания в режиме «постоянный контакт» [14, 17, 21, 22, 23, 24], так и отрывные режимы колебаний («частичный отрыв», «двойной прыжок» и др.)⁵ [18, 19, 25, 26, 27], представляющие наибольшую

¹ Erdmann P., Adam D. Numerical Simulation of Dynamic Soil Compaction with Vibratory Compaction Equipment // XV Danube - Eur. Conf. Geotech. Eng. (DECGE 2014). 2014. № 119. P. 243–248.

² Дудин В.М., Попова Н.Н. Анализ расчетной схемы вибратора на упруго-вязком ограничителе // Строительные и дорожные машины: сб. научных трудов Ярославского политехнического института. Ярославль: Ярославский политехнический институт, 1975. С. 11–14.

³ Kaufmann K., Anderegg R. 3D-construction applications III: GPS-based compaction technology // Proc., 1st Int. Conf. Mach. Control Guid. 2008. P. 1–10.

⁴ Чернева-Попова З. Исследование вибрации самоходного вибрационного катка ВВС/8 // Доклады первого национального конгресса по теоретической и прикладной механике. Варна, 3-6.12.1969. Книга 2. 1971. С. 119–127.

⁵ Adam D., Pistol J. Dynamic roller compaction for earthworks and roller-integrated continuous compaction control : State of the art overview and recent developments // Conf. di Geotec. di Torino, XXIV Ciclo. 2016. № Ccc. P. 1–41.

сложность, но при этом и наибольший практический интерес, поскольку наиболее эффективным режимом работы вибрационного катка является режим «частичный отрыв» [28].

Однако в РФ исследований, рассматривающих отрывные режимы колебаний вибрационных катков, к которым относятся режимы «частичный отрыв», «двойной прыжок», «раскачивания» и др., сравнительно мало. Это не позволяет отечественным производителям вибрационных катков обоснованно решать задачи повышения технического уровня и технологической эффективности выпускаемых грунтоуплотняющих машин.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования взаимодействия вальца вибрационного катка с рамой и уплотняемым грунтом с учетом вынуждающей силы и частоты колебаний, характеристик установленных виброизоляторов, а также свойств грунта, была разработана трёхмассная реологическая модель, содержащая вибрационный валец массой m_v , раму массой m_r и грунт массой m_s (рисунок 1). Валец связан с рамой через виброизоляторы, свойства которых моделируются параллельно установленными элементами упругого и вязкого сопротивления (схема Фойгта) с коэффициентами k_f и b_f соответственно. Деформации грунта также моделируются по схеме Фойгта параллельно установленными элементами упругого и вязкого сопротивления с коэффициентами, соответственно, k_s и b_s , показавшими хорошее воспроизведение деформативных свойств грунта при вибрационных и виброударных воздействиях [19, 29, 30]. Значение присоединенной массы грунта на основании исследований⁶ [18] рассчитывалось как $m_s = 0,2 \cdot m_v$.

Одной из особенностей данной реологической модели являлось рассмотрение не абсолютно жесткого, а деформируемого вальца кат-

ка. Это не только снимает одно из допущений, используемых в большинстве работ аналогичного назначения, но и позволяет сформировать более общую модель, применимую не только к гладковальцовым вибрационным каткам, но и к вибрационным каткам с гидрошинными⁷ [31], пневмошинными^{8,9} [32], обрезиненными [33] и другими конструкциями деформируемых вальцов. Деформируемость рабочего органа (вальца) моделировалась элементами упругого и вязкого сопротивления с коэффициентами, соответственно, k_d и b_d , установленных по схеме Фойгта (см. рисунок 1).

При разработке и исследовании реологической модели были сделаны следующие допущения:

- движение элементов системы «рама-валец-грунт» рассматривается только вдоль вертикальной оси. Положительное направление оси – вниз;
- рассматривается функционирование вальца в режиме установившихся колебаний (этапы включения (разгона) и выключения (остановки) вибровозбудителя, связанные с этим переходные процессы не учитываются);
- свойства грунта в пределах одного прохода вибрационного катка не изменяются;
- пластические (необратимые) деформации грунта в пределах одного прохода не учитываются. Накопление пластических деформаций в грунте после каждого прохода вибрационного катка учитывается перерасчетом характеристик грунта (коэффициентов k_s и b_s) к началу следующего прохода.

Реологическая модель позволяет исследовать взаимодействие вальца вибрационного катка с грунтом как в режиме контакта, так и в различных режимах периодического отрыва от грунта.

В режиме контакта с грунтом дифференциальные уравнения движения масс системы «рама-валец-грунт» (см. рисунок 1) имеют вид:

⁶ Tyuremnov I.S., Morev A.S., Furmanov D.V. On the justification of the value of the apparent mass of soil in rheological modeling of the process of soil compaction by a vibrating roller // J. Phys. Conf. Ser. 2019. Vol. 1260, № 11. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/11/112033>

⁷ Савельев С.В. Обоснование режимных параметров вибрационного гидрошинного катка для уплотнения грунтов: специальность 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины»: автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук / Савельев Сергей Валерьевич. Омск, 2004. 19 с.

⁸ Савельев С.В. Развитие теории и совершенствование конструкций вибрационных катков с пневмошинными рабочими органами: специальность 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины»: автореф. дис. на соиск. ученой степ. д-ра техн. наук / Савельев Сергей Валерьевич. Омск, 2014. 32 с.

⁹ Лашко А.Г. Обоснование рациональных параметров вибрационного катка с пневмошинным рабочим органом для уплотнения грунтов: специальность 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины»: дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук / Лашко Алексей Геннадьевич. Омск, 2012. 179 с.

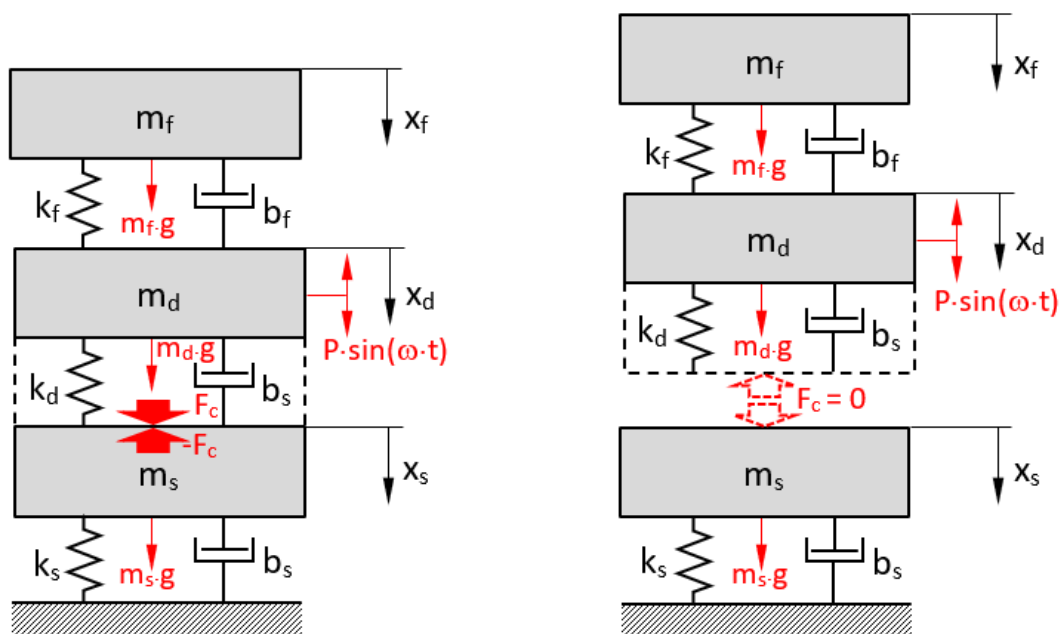


Рисунок 1 – Трёхмассная реологическая модель системы «рама-валец-грунт» с деформируемым вальцом (слева – в контакте с грунтом; справа – в отрыве от грунта)
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Three-mass rheological model of the Frame–Drum–Soil system with a deformable drum (on the left – in contact with soil; on the right – separated from soil)
Source: compiled by the author.

$$\begin{cases} m_f \cdot \ddot{x}_f + b_f \cdot (\dot{x}_f - \dot{x}_d) + k_f \cdot (x_f - x_d) = m_f \cdot g; \\ m_d \cdot \ddot{x}_d - b_f \cdot (\dot{x}_f - \dot{x}_d) - k_f \cdot (x_f - x_d) + b_d \cdot (\dot{x}_d - \dot{x}_s) + \\ + k_d \cdot (x_d - x_s) = m_d \cdot g + P \cdot \sin(\omega t); \\ m_s \cdot \ddot{x}_s + k_s \cdot x_s + b_s \cdot \dot{x}_s - b_d \cdot (\dot{x}_d - \dot{x}_s) - k_d \cdot (x_d - x_s) = m_s \cdot g \end{cases} \quad (1)$$

где $\ddot{x}_f$ – ускорение рамы, м/с²; $\ddot{x}_d$ – ускорение вальца, м/с²; $\ddot{x}_s$ – ускорение грунта, м/с²; b_f – коэффициент вязкого сопротивления виброизоляторов, соединяющих валец с рамой, Н·с/м; b_d – коэффициент вязкого сопротивления деформированию вальца, Н·с/м; b_s – коэффициент вязкого сопротивления грунта, Н·с/м; $\dot{x}_f$ – вертикальная скорость перемещения рамы, м/с; $\dot{x}_d$ – вертикальная скорость перемещения вальца, м/с; $\dot{x}_s$ – вертикальная скорость перемещения грунта, м/с; k_f – коэффициент упругого сопротивления виброизоляторов, соединяющих валец и раму, Н/м; k_d – коэффициент упругого сопротивления деформированию вальца, Н/м; k_s – коэффициент упругого сопротивления грунта, Н/м; x_f – вертикальная координата рамы, м; x_d – вертикальная координата вальца, м; x_s – вертикальная координата грунта, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; P – вынуждающая сила, Н; ω – угловая скорость вибровозбудителя, рад/с.

В режиме отрыва от грунта дифференциальные уравнения движения масс системы «рама-валец-грунт» имеют вид:

$$\begin{cases} m_f \cdot \ddot{x}_f + b_f \cdot (\dot{x}_f - \dot{x}_d) + k_f \cdot (x_f - x_d) = m_f \cdot g; \\ m_d \cdot \ddot{x}_d - b_f \cdot (\dot{x}_f - \dot{x}_d) - k_f \cdot (x_f - x_d) = m_d \cdot g + P \cdot \sin(\omega t); \\ m_s \cdot \ddot{x}_s + k_s \cdot x_s + b_s \cdot \dot{x}_s = m_s \cdot g. \end{cases} \quad (2)$$

Контактная сила (сила реакции грунта на валец) определяется из 3-го уравнения системы (1) (см. рисунок 1):

$$m_s \cdot \ddot{x}_s + k_s \cdot x_s + b_s \cdot \dot{x}_s - b_d \cdot (\dot{x}_d - \dot{x}_s) - k_d \cdot (x_d - x_s) = m_s \cdot g. \quad (3)$$

Откуда

$$F_c = b_d \cdot (\dot{x}_d - \dot{x}_s) + k_d \cdot (x_d - x_s) = m_s \cdot \ddot{x}_s + k_s \cdot x_s + b_s \cdot \dot{x}_s - m_s \cdot g. \quad (4)$$

Условие неприлипания грунта к вальцу:

$$F_c \leq 0. \quad (5)$$

В режиме контакта с грунтом $F_c \leq 0$. В режиме отрыва от грунта $F_c = 0$.

Переход от режима отрыва от грунта (системе уравнений (2)) к режиму контакта с грунтом (системе уравнений (1)) осуществляется по условию:

$$x_d \geq x_s. \quad (6)$$

Для численного решения уравнений (1), (2) с учетом смены режимов контакта и отрыва от грунта была разработана расчетная модель в среде MATLAB Simulink.

Для верификации разработанной реологической модели системы «рама-валец-грунт» с деформируемым вальцом были проведены расчеты по разработанной реологической модели для вибрационных катков DM-614 и DM-617 в сравнении с экспериментальными данными, показавшими хорошее соответствие расчетных значений размаха вертикальных перемещений и ускорений вальца и рамы вибрационных катков DM-614 и DM-617 со значениями, полученными при экспериментальных исследованиях.

Разработанная реологическая модель воспроизводит различные режимы колебаний вальца вибрационного катка. Поскольку для вибрационных катков допускается работа лишь в режимах «постоянный контакт» и «частичный отрыв»^{10,11,12} [11, 34], причем наиболее эффективной считается работа в конце режима «частичный отрыв» на границе перехода в режим «двойной прыжок» [28], то модель должна воспроизводить реализацию этих режимов колебаний. На рисунках 2, 3 представлены осциллограммы изменения различных

характеристик тестового вибрационного катка в режимах «постоянный контакт» (см. рисунок 2) и «частичный отрыв» (см. рисунок 3). Характеристики тестового вибрационного катка: масса вальца $m_d = 4000$ кг; масса рамы вальца $m_f = 4000$ кг; масса присоединенного грунта $m_g = 200$ кг; частота колебаний $f = 30$ Гц; вынуждающая сила $P = 270$ кН; коэффициент упругого сопротивления амортизаторов рамы $k_f = 9,74$ МН/м; коэффициент вязкого сопротивления амортизаторов рамы $b_f = 26$ кН·с/м; коэффициент упругого сопротивления деформированию вальца $k_d = 5000$ МН/м; коэффициент вязкого сопротивления деформированию вальца $b_d = 2000$ кН·с/м.

Значение коэффициента упругого сопротивления грунта рассчитывалось на основании анализа работ аналогичного назначения и исследований автора в зависимости от значений динамического модуля деформации грунта (E_{vd} , МПа), определявшегося в экспериментальных исследованиях, по формуле $k_s = 2,7 \cdot E_{vd}$ (для песчаных грунтов). Значение коэффициента вязкого сопротивления грунта принималось постоянным и равным $b_s = 200$ кН·с/м (для песчаных грунтов) на основании допущения об определяющем влиянии на значения b_s вида и влажности грунта, которые в процессе моделирования принимались неизменными.

На рисунках 2, 3 представлены некоторые результаты графического отображения (в виде осциллограмм) особенностей колебаний различных элементов системы «рама-валец-грунт».

На всех осциллограммах ось абсцисс – время (в секундах). Для исключения влияния переходных режимов при разгоне вибровозбудителя и стабилизации колебаний, все осциллограммы приведены для интервала времени 9,5...10 сек после начала моделирования, когда все переходные процессы завершаются.

На всех осциллограммах ось абсцисс – время (в секундах). Для исключения влияния переходных режимов при разгоне вибровозбудителя и стабилизации колебаний, все осциллограммы приведены для интервала времени 9,5...10 сек после начала моделирования, когда все переходные процессы завершаются.

¹⁰ Машины для дорожного строительства CAT. Руководство по уплотнению грунта. QRBQ 1705. Caterpillar Inc., 2013. 132 с.

¹¹ Уплотнение асфальтобетона и грунта. HAMM AG 03.2011 212 4832 / изд. 2-е. 2011. 142 с.

¹² Adam D., Pistol J. Dynamic roller compaction for earthworks and roller-integrated continuous compaction control : State of the art overview and recent developments // Conf. di Geotec. di Torino, XXIV Ciclo. 2016. № Ccc. P. 1–41.

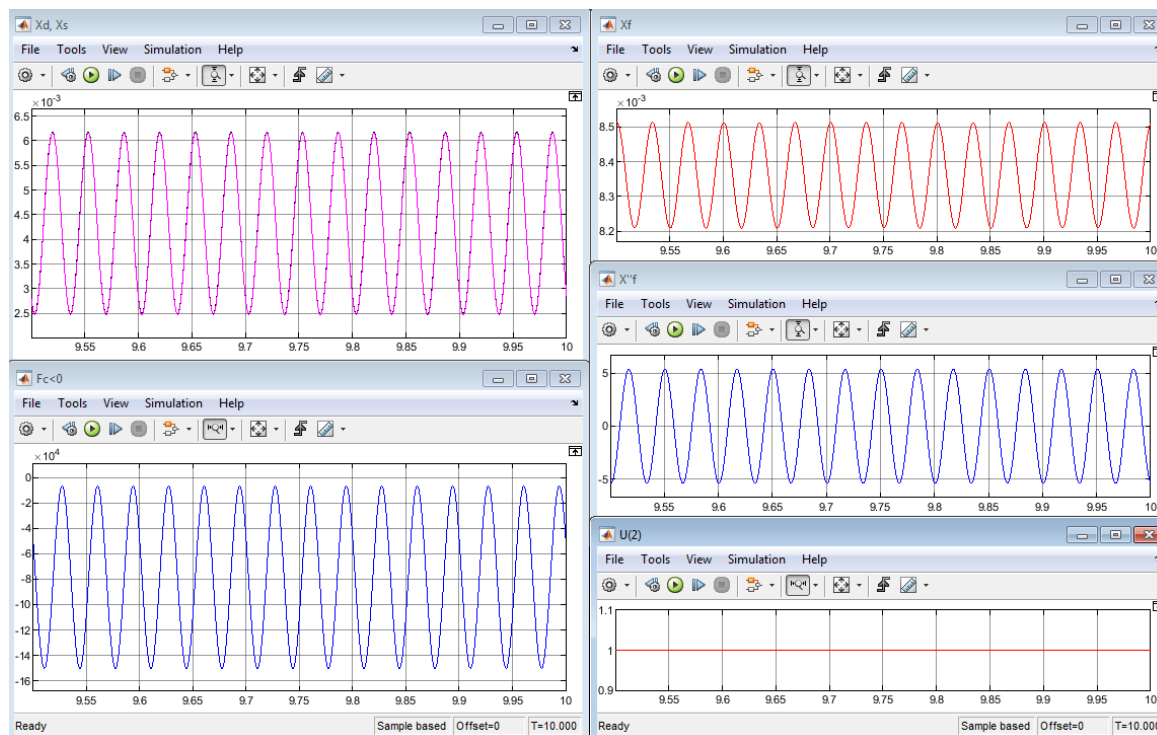


Рисунок 2 – Осциллограммы колебаний различных элементов тестового вибрационного катка при $k_s = 20$ МН/м (режим «постоянный контакт») Источник: составлено автором.

Figure 2 – Vibration oscillograms for various elements of the test vibratory roller at $k_s = 20$ MN/m ("constant contact" mode) Source: compiled by the author.

Осциллограмма « X_d, X_s » (см. рисунки 2, 3) отображает изменение во времени вертикальных координат вальца x_d (в метрах, чёрная линия на рисунке 3) и грунта x_s (в метрах, розовая линия на рисунках 2, 3). В безотрывном режиме колебаний вальца (режим «постоянный контакт», при котором в каждом цикле колебаний валец не отрывается от грунта¹³) вертикальные координаты вальца и грунта практически совпадают и на осциллограмме отображается только одна линия – координата грунта (линия розового цвета). В режимах отрывных колебаний, например в режиме «частичный отрыв», характеризующемся периодическим отрывом вальца от грунта, в каждом цикле колебаний, на фазе отрыва вертикальные координаты вальца и грунта различаются (см. рисунок 3). Поскольку координатная ось направлена сверху вниз, то отрыв вальца от грунта соответствует отрицательным зна-

чениям вертикальной координаты вальца, а совместное движение вальца с грунтом – положительным значениям координат вальца и грунта.

Осциллограмма « $F_c < 0$ » отображает изменение контактной силы F_c (силы реакции грунта (4), в Ньютонах). Отрицательное значение контактной силы соответствует направлению её действия снизу вверх или от грунта на валец (т.е. противоположно направлению вертикальной оси, направленной сверху вниз). Осциллограммы « X_f » и « X''_f » отображают, соответственно, изменение вертикальных перемещений x_f рамы вибрационного катка (в метрах) и вертикальных ускорений рамы $\ddot{x}_f$ (м/с²).

Осциллограмма « U_2 » отображает изменение значения условия (6), характеризующего наличие контакта между вальцом и грунтом (при контакте $U_2 = 1$, при отрыве $U_2 = 0$).

¹³ Тюремнов И.С. Моделирование отображения различных режимов колебаний вальца системами непрерывного контроля уплотнения грунта вибрационными катками / И.С. Тюремнов, А.С. Морев // Пром-Инжиниринг: труды VII всероссийской научно-технической конференции, Москва, Челябинск, Новочеркасск, Волгоград, Сочи, 17–21 мая 2021 года. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2021. С. 38–42. https://elibrary.ru/download/elibrary_48007845_57225778.pdf

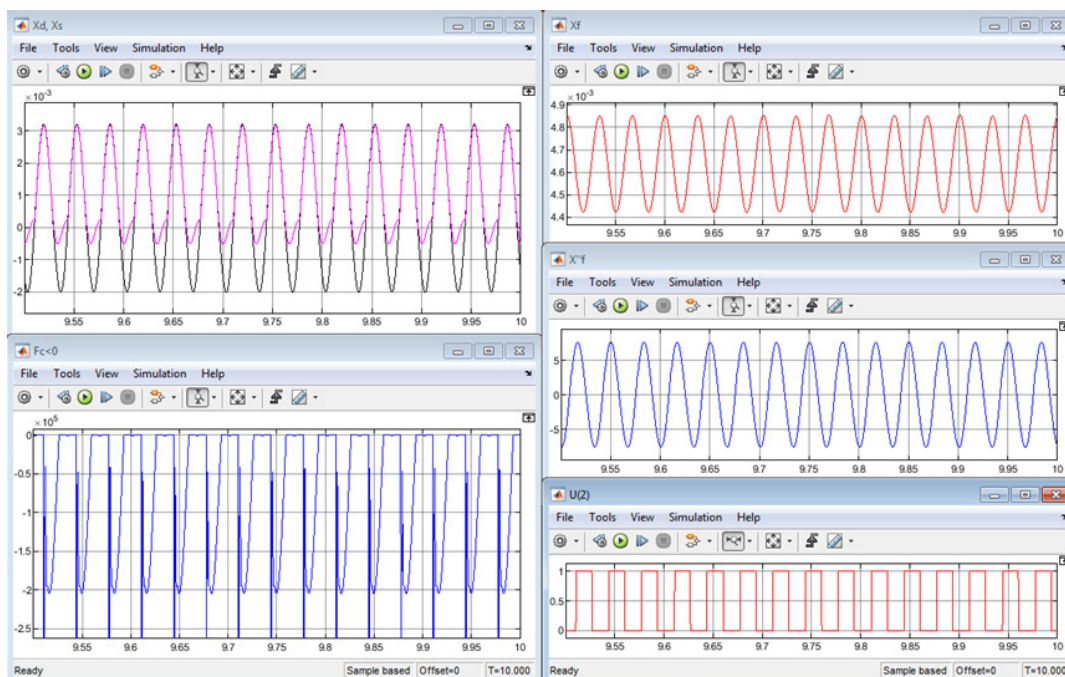


Рисунок 3 – Осциллограммы колебаний различных элементов тестового вибрационного катка с $P = 270$ кН при $k_s = 80$ МН/м (режим «частичный отрыв») Источник: составлено автором.

Figure 3 – Vibration oscillograms for various elements of the test vibratory roller with $P = 270$ кН at $k_s = 80$ МН/м ("partial uplift" mode) Source: compiled by the author.

На представленных на рисунках 2, 3 осциллограммах можно наблюдать характерные особенности реализации режимов колебаний «постоянный контакт» и «частичный отрыв».

Для режима колебаний «постоянный контакт» (см. рисунок 2) характерными являются:

- отсутствие отрыва вальца от грунта и ненулевое значение контактной силы F_c в течение всего времени внутри каждого цикла колебаний;
- равенство в смежных циклах колебаний значений амплитуд колебаний вальца x_d , рамы x_p , а также максимального значения контактной силы $F_{c\max}$;
- симметричный вид осциллограммы контактной силы F_c (продолжительность нагружения равна продолжительности разгрузки, т.е. $t_n = t_p$).

Для режима колебаний «частичный отрыв» (см. рисунок 3) характерно:

- наличие отрыва вальца от грунта и достижение контактной силой F_c нулевого значения в течение некоторого времени внутри каждого цикла колебаний;
- равенство в смежных циклах колебаний значений амплитуд колебаний вальца x_d , рамы x_p , а также максимального значения контактной силы $F_{c\max}$;

- асимметричный вид осциллограммы контактной силы F_c (продолжительность нагружения меньше продолжительности разгрузки, т.е. $t_n < t_p$).

РЕЗУЛЬТАТЫ

С использованием разработанной трёх-массной реологической модели системы «рама-валец-грунт» с деформируемым вальцом было проведено исследование влияния различных характеристик грунтовых вибрационных катков и свойств грунта на особенности взаимодействия вальца катка с рамой и с уплотняемым грунтом. Задачей исследований являлось изучение влияния вынуждающей силы, частоты колебаний и свойств грунта на характеристики колебаний вальца и рамы вибрационного катка, максимальное значение контактной силы и составляющие времени воздействия на грунт вибрационным катком DM-614, имеющие важное значение для определения результатов уплотнения грунта вибрационным катком в рамках разработанной методологии определения влияния технических характеристик на технологические возможности вибрационных катков [35].

Таблица 1

Параметры вычислительного эксперимента по исследованию влияния характеристик катка и грунта на особенности взаимодействия с грунтом вибрационного катка DM-614

Источник: составлено авторами.

Table 1

Parameters of a computational experiment to study the effect of roller and ground characteristics on the interaction between the soil and a DM-614 vibratory roller

Source: compiled by the author.

Параметр	Значения			
Вынуждающая сила P , кН	200	250	300	350
Частота колебаний f , Гц	20	30	40	50
Коэффициент упругого сопротивления грунта k_s , МН/м	30	70	110	150

Для исследования был взят гладковальцовый вибрационный грунтовой каток модели DM-614 производства ООО «Завод «Дорожных машин»» (г. Рыбинск, Ярославская область) с характеристиками: эксплуатационная масса 14 000 кг, масса вибрационного вальца $m_d = 4\,041$ кг, масса рамы вальца $m_r = 3\,659$ кг, частота колебаний вибровозбудителя $f = 30$ Гц, вынуждающая сила $P = 230$ кН, применяемые виброизоляторы – GMT 58200715 (20 штук).

На основании результатов, проведенных на кафедре «Строительные и дорожные машины» ЯГТУ экспериментальных исследований динамических характеристик амортизаторов GMT 58200715 (частично представленных в работах^{14,15}), значение коэффициента упругого сопротивления одного виброизолятора GMT 58200715 принималось равным $k_f = 0,487$ МН/м, а значение коэффициента вязкого сопротивления $b_f = 1,3$ кН·с/м. Таким образом, для 20 виброизоляторов GMT 58200715 значения k_f и b_f составили соответственно: $k_f = 9,74$ МН/м и $b_f = 26$ кН·с/м.

По разработанной трёхмассной реологической модели с деформируемым рабочим органом был проведен полнофакторный вычислительный эксперимент с параметрами и диапазонами их изменения, представленными в таблице 1.

Диапазон изменения $k_s = 30...150$ МН/м соответствует диапазону изменения коэффициента уплотнения песчаных грунтов $K_y \approx 0,88...1,01$.

Для каждого сочетания параметров (см. таблицу 1) формировались осциллограммы изменения во времени различных параметров катка и по ним определялись: максимальное значение контактной силы $F_c^{\max}$, продолжительность нагружения грунта t_n , продолжительность разгрузки грунта t_p , а также размах колебаний вальца x_d и рамы x_r . Одновременно определялся режим колебаний вальца. С учетом недопущения реализации вибрационным катком режима «двойной прыжок» [28], для каждого сочетания параметров определялось критическое значение k_s^* , при котором возникает режим «двойной прыжок». То есть рассматривались только такие сочетания параметров вибрационного катка и грунта, при которых колебания осуществлялись в режимах «постоянный контакт» или «частичный отрыв».

Графические представления результатов вычислительного эксперимента представлены на рисунках 4, 5, 6, 7, 8, 9.

Полученные по осциллограммам значения t_n , t_p и $F_c^{\max}$ сводились в таблицу для последующей обработки программе STATISTICA и получения регрессионных зависимостей (таблица 2).

¹⁴ Тихонов Д.Н., Тюремнов А.И., Шорохов Д.А. К вопросу экспериментального определения значений коэффициентов вязкого сопротивления и динамической жесткости амортизаторов вальца вибрационных катков // XVIII Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых: материалы Всероссийской научной конференции (с международным участием), Вологда, 25–29 ноября 2024 года. Вологда: ВоГУ, 2025. С. 849–852.

¹⁵ Тюремнов А.И., Тихонов Д.Н., Шорохов Д.А. Некоторые особенности экспериментального определения значений коэффициента вязкого сопротивления амортизаторов вальца вибрационных катков // 100 лет кафедре «Наземные транспортно-технологические средства»: история становления, основные направления научной деятельности, перспективы развития: материалы Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 25 октября 2024 года. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. С. 156–161. https://elibrary.ru/download/elibrary_75173659_56191689.pdf

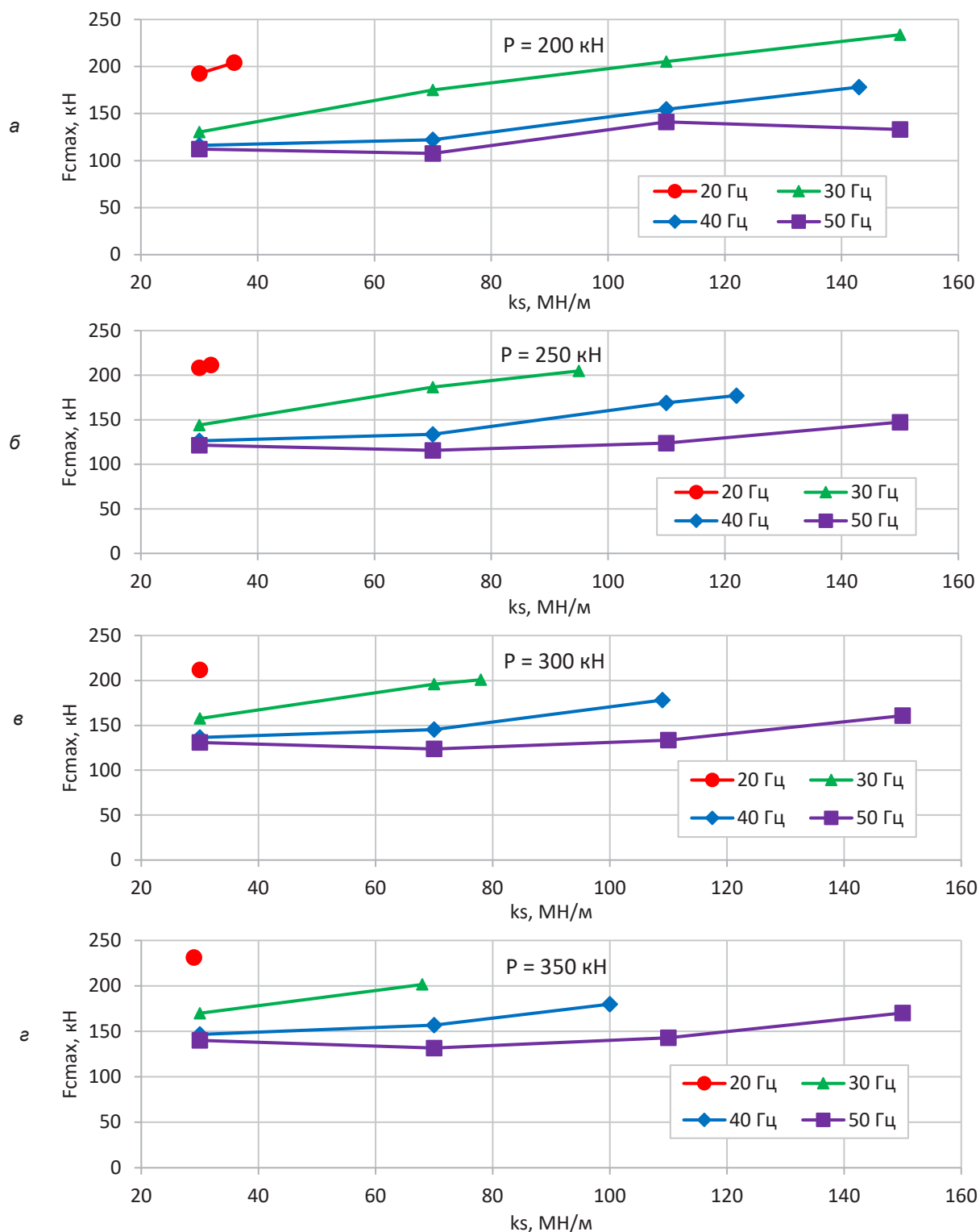


Рисунок 4 – Значения максимальной контактной силы $F_c^{\max}$ катка DM-614 при значениях вынуждающей силы: а – 200 кН; б – 250 кН; в – 300 кН; г – 350 кН
Источник: составлено автором.

Figure 4 – The values of the maximum contact force $F_c^{\max}$ of the DM-614 roller for the driving force values: а – 200 кН; б – 250 кН; в – 300 кН; г – 350 кН
Source: compiled by the author.

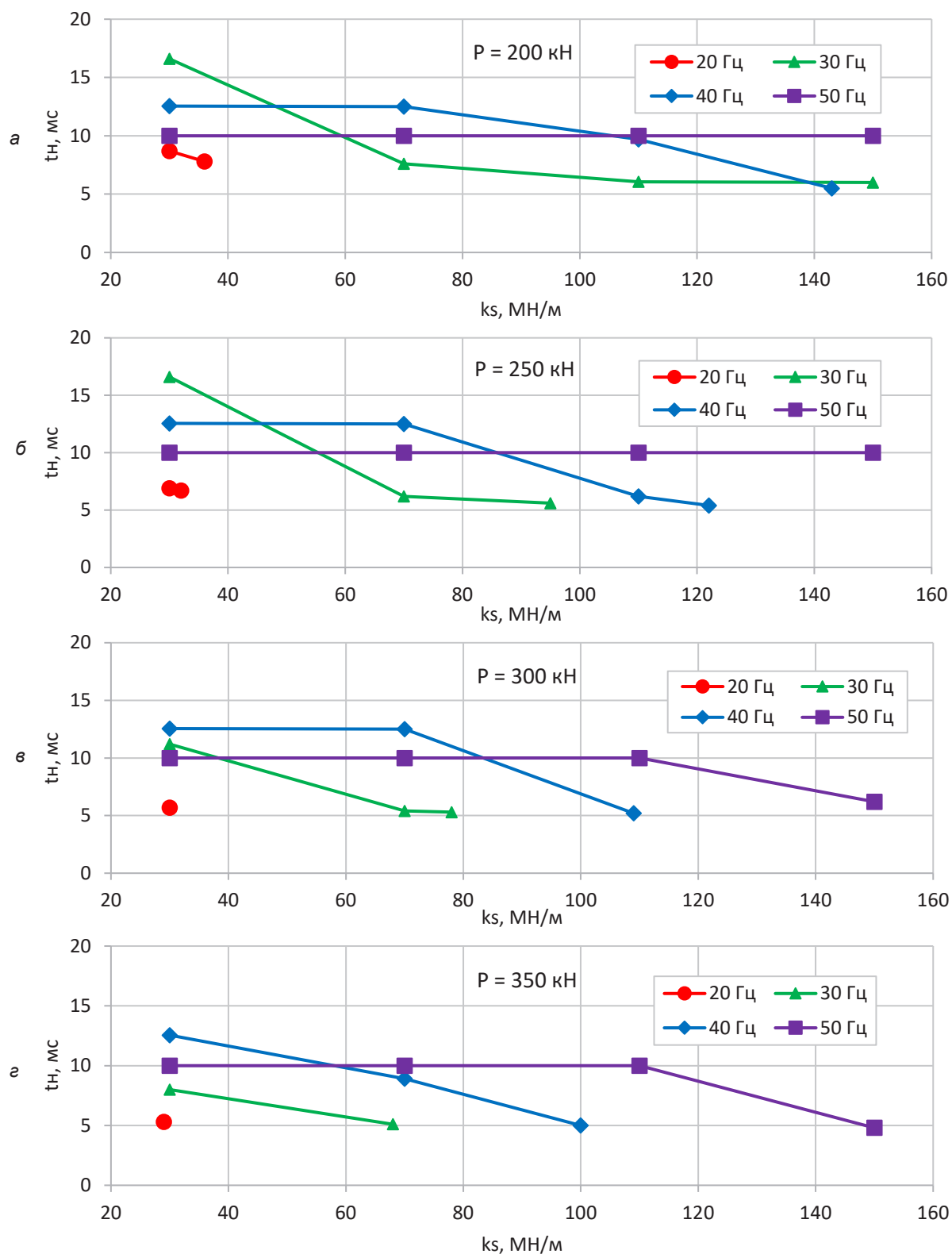


Рисунок 5 – Значения продолжительности нагружения грунта t_n катком DM-614 при значениях вынуждающей силы: а – 200 кН; б – 250 кН; в – 300 кН; г – 350 кН
Источник: составлено автором.

Figure 5 – The values of soil loading duration t_n for the DM-614 roller with the driving force values: а – 200 кН; б – 250 кН; в – 300 кН; г – 350 кН
Source: compiled by the author.

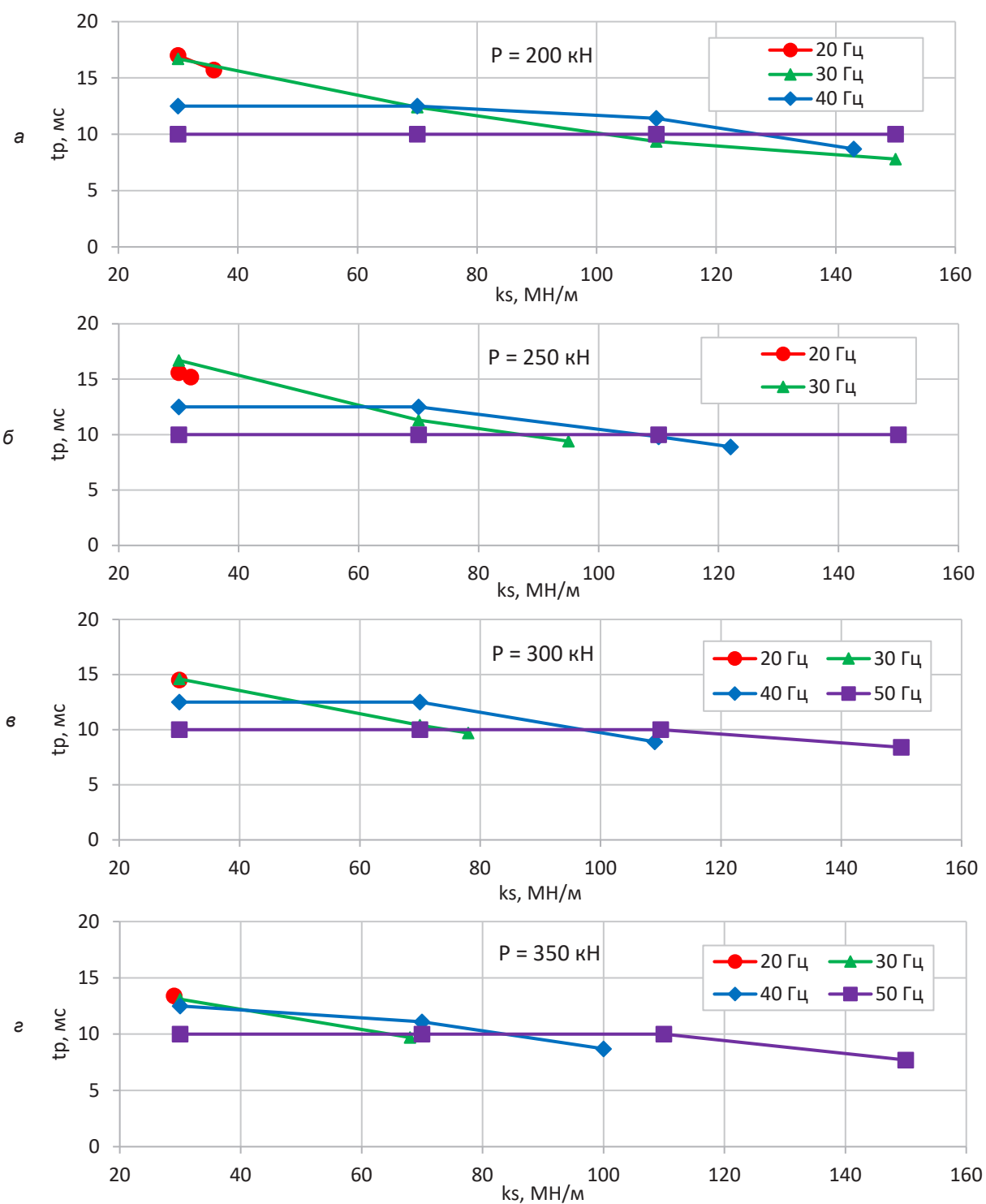


Рисунок 6 – Значения продолжительности разгрузки грунта t_p катком DM-614 при значениях вынуждающей силы: а – 200 кН; б – 250 кН; в – 300 кН; г – 350 кН
Источник: составлено автором.

Figure 6 – The values of soil unloading duration t_p by DM-614 roller with the driving force values: а – 200 kN; б – 250 kN; в – 300 kN; г – 350 kN
Source: compiled by the author.

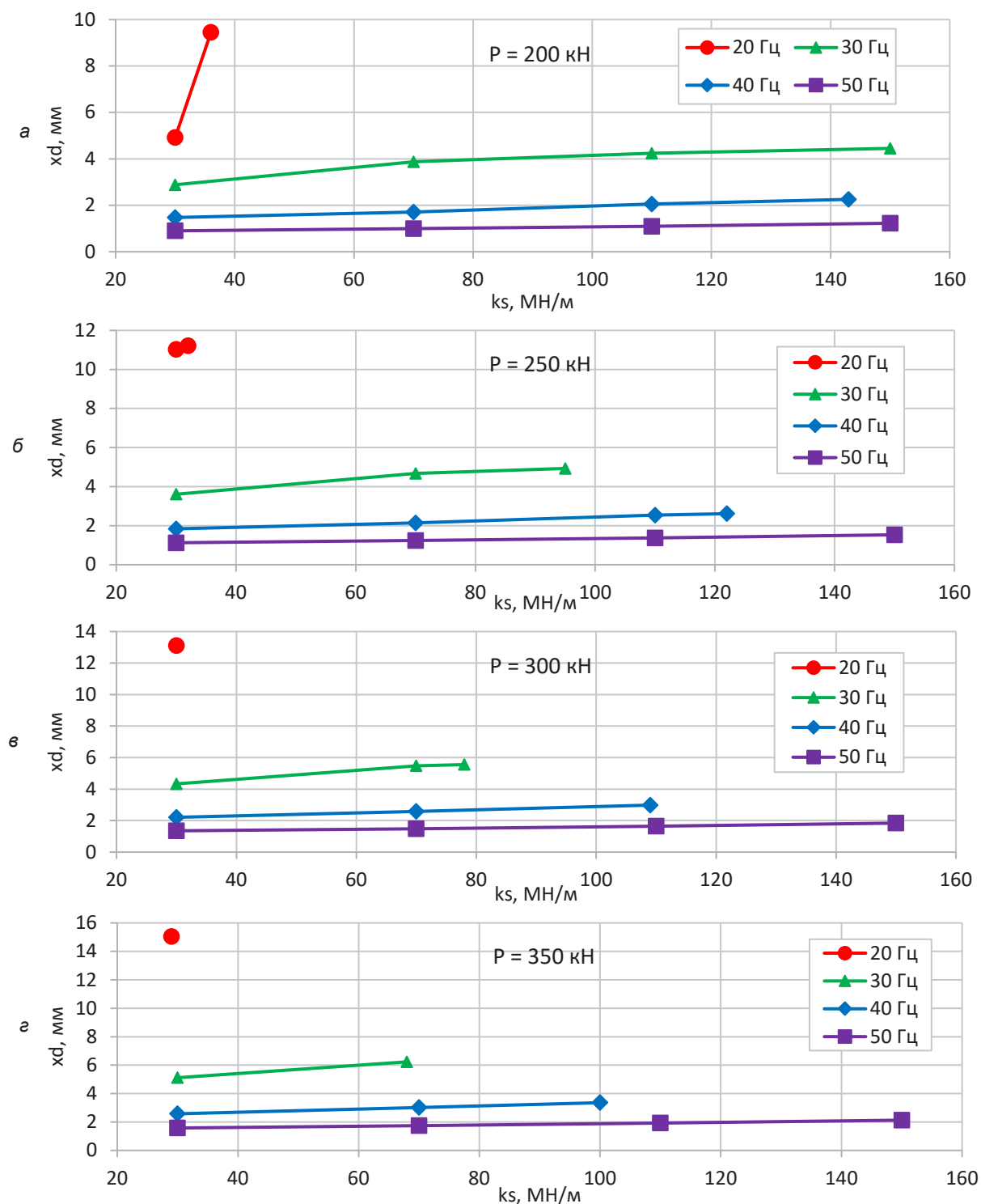


Рисунок 7 – Значения размаха x_d колебаний вальца катка DM-614 при значениях вынуждающей силы: а – 200 кН; б – 250 кН; в – 300 кН; г – 350 кН
Источник: составлено автором.

Figure 7 – The values of the double amplitude x_d of the DM-614 drum for the driving force values: а – 200 kN; б – 250 kN; в – 300 kN; г – 350 kN
Source: compiled by the author.

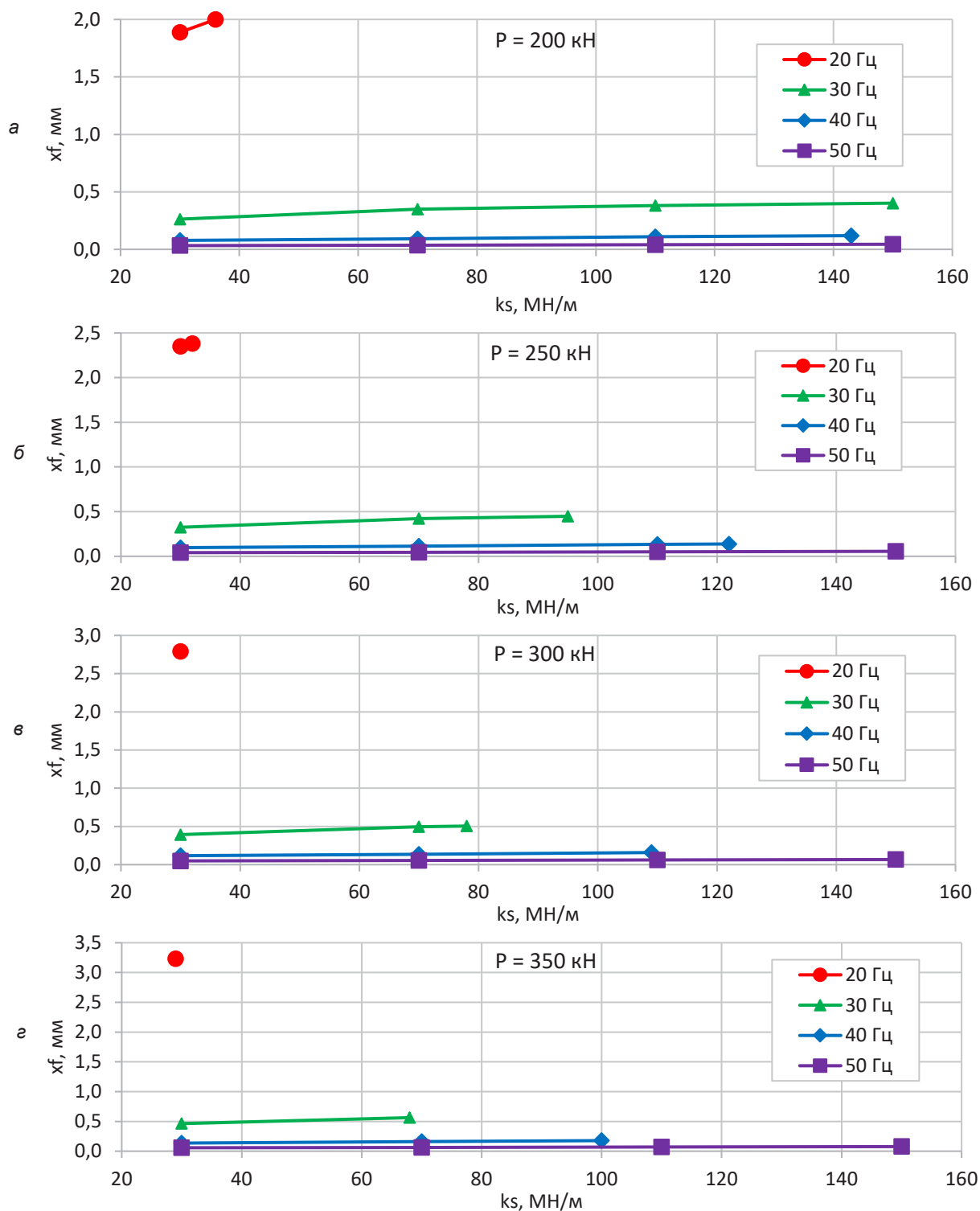


Рисунок 8 – Значения размаха x_f колебаний рамы катка DM-614 при значениях вынуждающей силы: а – 200 кН; б – 250 кН; в – 300 кН; г – 350 кН
Источник: составлено автором.

Figure 8 – The values of the double amplitude x_f of the roller frame DM-614 for the driving force values: а – 200 кН; б – 250 кН; в – 300 кН; г – 350 кН
Source: compiled by the author.

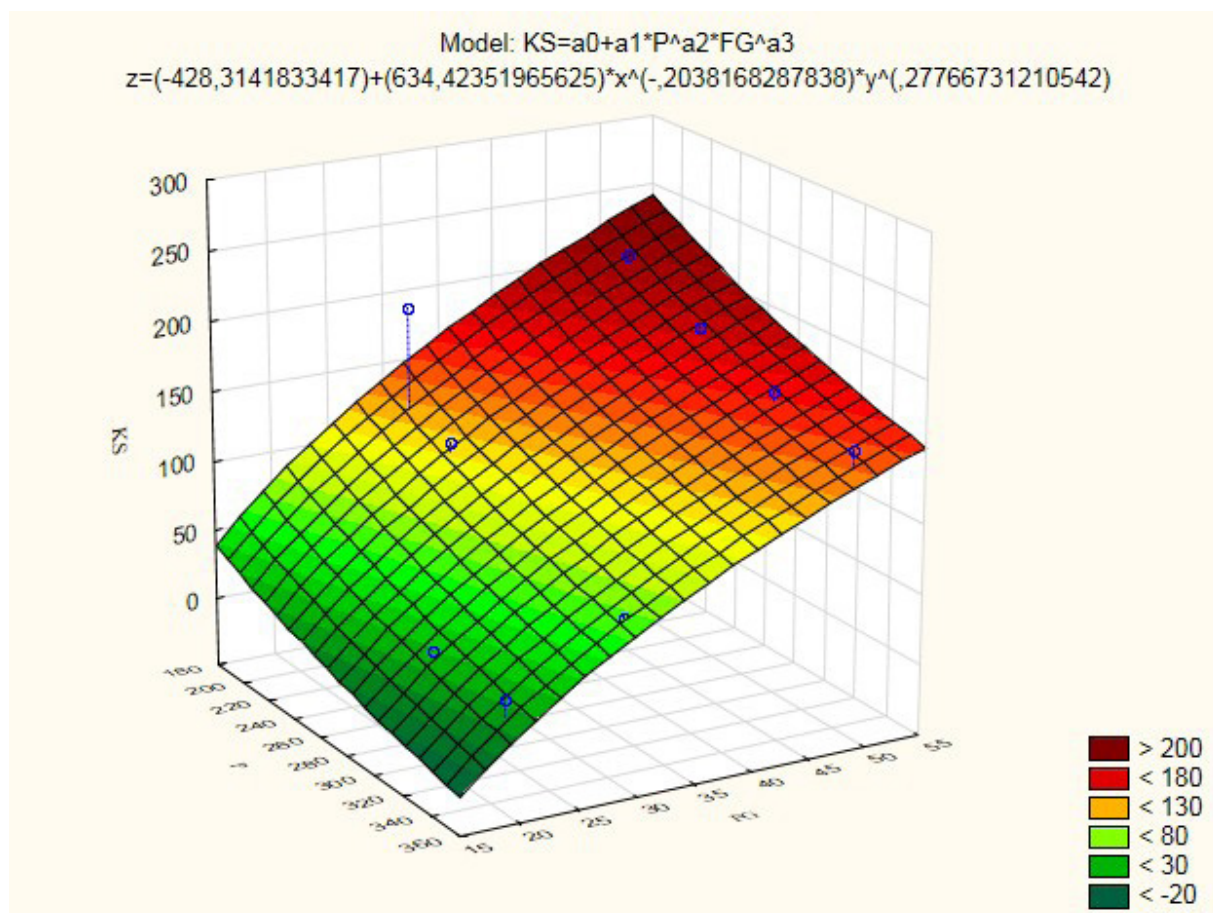


Рисунок 9 – Влияние частоты f и вынуждающей силы P колебаний вальца вибрационного катка DM-614 на значения k^*s , при которых возникает режим «двойной прыжок»
 Источник: составлено автором.

Figure 9 – The effect of the frequency f and the driving force P of the DM-614 vibratory roller drum on the k^*s values at which the "double jump" mode occurs
 Source: compiled by the author.

В таблице 2 применяются следующие единицы измерения параметров: t_n , мс; t_p , мс; $F_c^{\max}$, кН; P , кН; f , Гц; k_s^* , МН/м.

Таблица 2
 Регрессионные зависимости для расчета значений t_n , t_p и $F_c^{\max}$ при взаимодействии вибрационного катка DM-614 с грунтом
 Источник: составлено автором.

Table 2
 Regression dependencies for calculating the values of t_n , t_p and $F_c^{\max}$ during the interaction of the DM-614 vibratory roller with the soil
 Source: compiled by the author.

№	Вид зависимости	Значение R
1	$t_n = -30,667 + 282,98 \cdot P^{-0,01085} \cdot f^{0,008468} \cdot k_s^{0,05908} - 65,096 \cdot f^{-0,7822} - 220,53 \cdot k_s^{0,07975}$	0,7459
2	$t_p = 7,7413 + 39748 \cdot P^{-0,6597} \cdot f^{-0,6951} \cdot k_s^{-0,8086}$	0,8744
3	$F_c^{\max} = 105,3 + 85,44 \cdot P^{0,7991} \cdot f^{-2,396} \cdot k_s^{0,8598}$	0,976
4	$k_s^* = -428,3 + 634,4 \cdot P^{-0,2038} \cdot f^{0,2777}$	0,9205

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов вычислительного эксперимента (см. рисунки 4, 5, 6, 7, 8, 9 и таблицу 2) показывает, что главные динамические характеристики вибрационного катка, в качестве которых выступают вынуждающая сила и частота колебаний, сложным образом влияют на особенности взаимодействия вибрационного катка DM-614 с грунтом.

В соответствии с разработанной методологией определения влияния технических характеристик вибрационных катков на результаты уплотнения грунта [35] деформация приповерхностных слоев грунта, а следовательно, и коэффициент уплотнения на поверхности грунта, преимущественно определяются значениями амплитудных контактных напряжений σ_0 , которые, в свою очередь, будут определяться значением максимальной контактной силы $F_c^{\max}$ (см. рисунок 4). Глубина же распространения напряжений, а значит и глубина уплотнения, будет зависеть от продолжительности действия соответствующих значений напряжений на поверхности грунта. При этом необходимо учитывать дополнительные ограничения в виде недопущения перехода колебаний вальца катка в режим «двойного прыжка», а также недопущения чрезмерно высоких амплитуд колебаний вальца и рамы катка.

Значения максимальной контактной силы $F_c^{\max}$, передаваемой вальцом на грунт, как правило, не совпадают со значением вынуждающей силы P , генерируемой вибровозбудителем катка. В большинстве случаев наблюдается ситуация, когда $F_c^{\max} < P$ (см. рисунок 4). При увеличении значения вынуждающей силы P значение контактной силы $F_c^{\max}$ возрастает, но в меньшей степени (при увеличении вынуждающей силы с 200 до 350 кН (т.е., в 1,75 раза) значение контактной силы увеличивается в 1,14...1,3 раза (в зависимости от частоты колебаний и характеристик грунта)).

Частота колебаний оказывает существенное влияние на значения $F_c^{\max}$. Влияние частоты колебаний на значения $F_c^{\max}$, x_d и другие параметры системы «рама-валец-грунт» не ограничиваются окolorезонансными эффектами, а носят более сложный характер, требующий отдельного исследования, выходящего за рамки данной статьи. При частоте 20 Гц наблюдается наибольший размах колебаний вальца, что приводит к переходу колебаний в недопустимый режим «двойного прыжка» и резко ограничивает диапазон значений k_s для работы катка (см. рисунок 4), позволяя

работать на частоте 20 Гц лишь в начальной стадии уплотнения. При увеличении частоты колебаний уменьшаются значения размаха вертикальных колебаний вальца и его рамы (см. рисунки 7, 8), а также значения контактной силы $F_c^{\max}$ (см. рисунок 4) во всем диапазоне допустимых значений k_s . Сам же диапазон значений k_s , при котором колебания осуществляются в безопасных режимах («постоянный контакт» и «частичный отрыв») расширяется при увеличении частоты колебаний (см. рисунок 9). Это позволяет увеличивать значение вынуждающей силы P (и эффективность уплотнения приповерхностных слоев грунта) без перехода колебаний в нежелательный режим «двойного прыжка» за счет ограничения размаха колебаний при увеличении их частоты. Однако эффективность преобразования вынуждающей силы P в силу, передаваемую вальцом уплотняемому грунту (контактную силу $F_c^{\max}$), уменьшается с увеличением частоты колебаний (см. рисунок 4).

В процессе уплотнения грунта (увеличения значения k_s) значения контактной силы $F_c^{\max}$ незначительно возрастают. При увеличении значения k_s в 5 раз (от 30 до 150 МН/м) значения $F_c^{\max}$ увеличиваются в 1,2...1,8 раза (в зависимости от вынуждающей силы и частоты колебаний).

На глубину уплотнения грунта будет влиять продолжительность действия напряжений на поверхности грунта [36, 37], определяемая продолжительностью нагружения t_n и разгрузки t_p грунта. Значения t_n и t_p определяются не только частотой колебаний, но реализуемым режимом колебаний.

В режиме «постоянный контакт» осциллограмма контактной силы имеет симметричный вид (см. рисунок 2). Таким образом, в режиме «постоянный контакт» продолжительность нагружения и разгрузки грунта равны между собой (см. рисунки 5, 6) и определяются частотой колебаний f :

$$t_n = t_p = 1/(2f).$$

В режиме «частичный отрыв» осциллограмма контактной силы становится асимметричной (см. рисунок 3) и продолжительность нагружения будет меньше продолжительности разгрузки ($t_n < t_p$). При этом вследствие периодического отрыва вальца от грунта значения t_n и t_p становятся меньше, чем при режиме «постоянный контакт» (см. рисунки 5, 6). Таким образом, в режиме «частичный отрыв»

$$t_n < 1/(2f); t_p < 1/(2f); t_n < t_p.$$

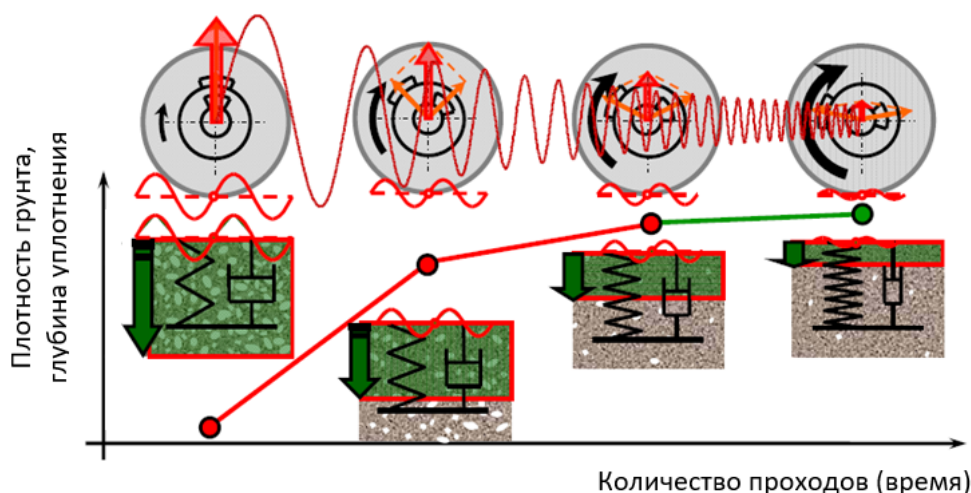


Рисунок 10 – Рекомендации AMMANN/CASE по изменению вынуждающей силы и частоты колебаний «интеллектуальных» вибраторных катков [11]

Figure 10 – AMMANN/CASE recommendations on changing the driving force and frequency of «intelligent» vibratory rollers [11]

Этим объясняется наблюдаемая на рисунках 5, 6 особенность, при которой с увеличением частоты колебаний вместо ожидаемого уменьшения значений t_n и t_p наблюдается их увеличение при определенных сочетаниях значений вынуждающей силы P , частоты колебаний f и свойств грунта k_s . При частоте колебаний 50 Гц диапазон значений k_s , в котором сохраняется режим «постоянный контакт» больше, чем при частотах колебаний 30 Гц и 40 Гц. Поэтому при уплотнении грунта в завершающей стадии (при высоких значениях k_s и, следовательно, коэффициента уплотнения K_y) целесообразно увеличение частоты колебаний не только с целью предотвращения перехода в нежелательный режим «двойной прыжок» (см. рисунок 9), но и для увеличения продолжительности действия контактных напряжений, определяющих глубину их распространения и глубину зоны уплотнения грунта, что согласуется с рекомендациями одного из ведущих производителей вибраторных катков (AMMANN/CASE) по изменению режима работы «интеллектуальных» вибраторных катков в процессе уплотнения грунта [11, 36, 38, 39] (рисунок 10).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе для вибраторного катка DM-614 с использованием разработанной трёхмассной реологической модели с деформируемым валом проведено исследование

влияния вынуждающей силы и частоты колебаний на размах колебаний вальца и рамы катка, максимальное значение контактной силы, продолжительности нагружения и разгрузки грунта, а также диапазон состояний грунта, в которых колебания реализуются в безопасных режимах («постоянный контакт» и «частичный отрыв»), т.е. в котором возможно применение одной и той же машины без изменения режима вибрации («максимальная вибрация», «минимальная вибрация» или статический режим) или без перехода на другой каток.

Результаты исследования позволяют получить не только качественное описание влияния основных динамических характеристик вибраторного катка на его технологическую эффективность, динамические нагрузки на элементы конструкции и вибробезопасность, но и дать количественную оценку этих показателей. Полученные результаты позволяют конструкторам вибраторных катков решать задачи улучшения технологических возможностей и технических характеристик проектируемых машин (например, увеличивать вынуждающую силу колебаний и достигаемый коэффициент уплотнения грунта катка с заданной массой) при сохранении в требуемых диапазонах размаха колебаний вальца и рамы катка, сохранении (и даже расширении) диапазона свойств уплотняемого грунта, в которых возможно применение вибраторного катка без изменения режима вибрации или перехода на другую модель катка.

Проведенный анализ показал необходимость учета реализуемого режима колебаний при проектировании новых и модернизации существующих отечественных вибрационных катков. Реализуемый режим колебаний зависит от сочетания характеристик грунта, количества и характеристик виброизоляторов, вынуждающей силы и частоты колебаний вальца, масс вальца и его рамы, а также скорости движения катка (с учетом возможных диапазонов изменения этих параметров). В практике отечественного дорожно-строительного машиностроения в такой постановке задача ранее не ставилась, и режим колебаний не рассматривался в качестве одного из ограничений при обосновании технических характеристик вибрационных грунтовых катков при их проектировании или модернизации. Но без учета этого фактора невозможно производство отечественных вибрационных катков, не уступающих лучшим мировым образцам, в т.ч. по сочетанию вынуждающей силы и частоты колебаний при сопоставимой общей массе, что является важной составляющей процесса импортозамещения и обеспечения технологического суверенитета РФ в сфере дорожно-строительного машиностроения.

Для дальнейшего совершенствования методологии обоснования технических характеристик вибрационных грунтовых катков при их проектировании или модернизации целесообразно исследование влияния количества и характеристик виброизоляторов вальца и соотношения масс вальца и рамы на реализуемые режимы колебаний, характеристики колебаний элементов вибрационного катка, значения максимальной контактной силы, а также продолжительность нагружения и разгрузки грунта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тюремнов И.С., Игнатьев А.А., Филатов И.С. Статистический анализ технических характеристик грунтовых вибрационных катков // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2014. № 3(34). С. 81–88. DOI: <https://vestnik.pnu.edu.ru/vestnik/pub/articles/1987/>
2. Тюремнов И.С. Анализ технических характеристик различных типов ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6(94). С. 706–716. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>
3. Fathi A. et al. Assessing depth of influence of intelligent compaction rollers by integrating laboratory testing and field measurements // Transp. Geotech. 2021. Vol. 28. P. 100509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100509>
4. Shen J. et al. Co-simulation for optimal working parameter selection during soil vibratory compaction process // J. Terramechanics. 2024. Vol. 112. P. 45–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.12.002>
5. Li S. et al. Dynamic characteristics of subgrade-bridge transitions in heavy-haul railways under roller excitation // Transp. Geotech. 2021. Vol. 29. P. 100589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100589>
6. Wu K. et al. Discrete Element Modeling of Vibration Compaction Effect of the Vibratory Roller in Roundtrips on Gravels // J. Test. Eval. 2021. Vol. 49. P. 20190910. DOI: <https://doi.org/10.1520/JTE20190910>
7. Peng H. et al. Discrete element simulation of vibration compaction of slag subgrade // Sci. Rep. 2024. Vol. 14. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55276-2>
8. Quist J. et al. UNDERSÖKNING AV SEPARATIONSEFFEKTER VID KOMPakterING AV OBUNDNA MATERIAL. SBUF ID: 13820. 2021. 56 p.
9. Li Y., She C. Discrete Simulation of Vibratory Roller Compaction of Field Rockfills // Shock Vib. 2021. Vol. 2021. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9246947>
10. Попов Г.Н. Выбор параметров прицепных вибрационных катков для уплотнения грунтовых оснований // Тр. ЛПИ, вып. 321. 1972. С. 114–119.
11. Anderegg R., Von Felten D.A., Kaufmann K. Compaction monitoring using intelligent soil compactors // GeoCongress 2006 Geotech. Eng. Inf. Technol. Age. Atlanta, 2006. Vol. 2006, № Jönsson. P. 41.
12. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Обоснование способа регулирования контактного усилия вибрационного вальца с уплотняемым материалом // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 1(53). С. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-1-36-42>
13. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Исследование спектра ускорения вибрационного вальца в процессе уплотнения грунта // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22(2). С. 182–192. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-182-192>
14. Yoo T.-S., Selig E.T. Dynamics of Vibratory-Roller Compaction // J. Geotech. Eng. Div. ASCE. 1979. № 105 (GT10). P. 1211–1231.
15. Siminiati D., Hren D. Simulation on vibratory roller-soil interaction // Adv. Eng. 2008. Vol. 2, № 1. P. 111–120.
16. Pistol J. et al. Consideration of the Variable Contact Geometry in Vibratory Roller Compaction // Infrastructures. 2023. Vol. 8, № 110. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures8070110>
17. Шабанова Г.И., Савельев С.В., Бурый Г.Г. Математическое описание колебательной системы “вибрационный рабочий орган - грунт” // Вестник СибАДИ. 2013. № 3(31). С. 102–107.
18. Susante P., Mooney M. Capturing Nonlinear Vibratory Roller Compactor Behavior through Lumped Parameter Modeling // J. Eng. Mech. 1996. P. 684–693. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2008\)134:8\(684\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2008)134:8(684))

19. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Моделирование взаимодействия вибрационного вальца дорожного катка с уплотняемым грунтом // Транспортное, горное и строительное машиностроение наука и производство. 2024. № 26. С. 60–67. DOI: <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-26-60-67>
20. Тюремнов И.С., Шорохов Д.А. Моделирование взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 2. С. 202–216. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216>
21. Михеев В.В., Савельев С.В. Математическая модель уплотнения упруговязкопластичной грунтовой среды при взаимодействии с рабочим органом дорожной машины в рамках модифицированного подхода сосредоточенных параметров // Вестник СибАДИ. 2017. № 2(54). С. 28–36. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2\(54\)-28-36](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-28-36)
22. Тарасов В.Н., Бояркина И.В., Серебренников В.С. Аналитический метод исследования вертикальных перемещений вибровальца дорожного катка при уплотнении материалов и грунтов // Строительные и дорожные машины. 2019. № 7. С. 13–18.
23. Савельев С.В., Михеев В.В., Белодед А.С. Математическая модель процесса динамического деформирования уплотняемой упруго вязкой пластичной среды // Вестник СибАДИ. 2016. № 3(49). С. 99–105. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-3\(49\)-99-105](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-3(49)-99-105)
24. Носов С.В. Математическое моделирование динамики наземных транспортно-технологических средств при взаимодействии с деформируемым опорным основанием: Монография. Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2016. 164 с.
25. Lu Y. et al. Research on vibratory & oscillatory coexistence nonlinear dynamics based on drum-subgrade coupling model // Int. J. Non. Linear. Mech. 2023. Vol. 157. P. 104536. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2023.104536>
26. Adam D., Kopf F. Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device) // Proc. Int. Semin. Geotech. Pavement Railw. Des. Constr. Athens, Greece. 2004. P. 97–106.
27. Mooney M. et al. Intelligent Soil Compaction Systems. NCHRP Report 676. Washington, D.C.: Transportati on Research Board, 2010. 178 p.
28. Anderegg R., Kaufmann K. Intelligent compaction with vibratory rollers: feedback control systems in automatic compaction and compaction control // Transp. Res. 2004. Vol. 1868. P. 124–134.
29. Dobrescu C. The dynamic response of the vibrating compactor roller, depending on the viscoelastic properties of the soil // Appl. Syst. Innov. 2020. Vol. 3, № 2. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.3390/asi3020025>
30. Dobrescu C. Comparative Analysis of the Voigt–Kelvin and Maxwell Models in the Compaction by Vibration Process // Springer Proc. Phys. Springer International Publishing, 2021. № 251. P. 359–366. DOI: [10.1007/978-3-030-54136-1_36](https://doi.org/10.1007/978-3-030-54136-1_36)
31. Мерданов Ш.М. Изготовление опытного образца вибрационного гидрошинного катка // Современные наукоемкие технологии. 2016. Т. 5, № 2. С. 270–275.
32. Савельев С.В., Михеев В.В., Сачук Ю.С. Эффективность использования вибрации в пневматических дорожных катках при устройстве автомобильных дорог // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 12. С. 640–641. DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-12-640-641>
33. Захаренко А.В. Определение параметров резинового слоя на гладком вальце дорожного катка // Строительные и дорожные машины. 2018. № 1. С. 25–26.
34. Pistol J. et al. Theoretical and experimental investigation of continuous compaction control (CCC) systems // 17th Nord. Geotechn. Meet. Challeng. Nord. Geotech. 25. P. 865–872. https://publik.tuwien.ac.at/file s/PubDat_249454.pdf
35. Тюремнов И.С. О разработке методологии прогнозирования технологических возможностей ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9. С. 689–692. DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-9-689-690>
36. Тюремнов И.С., Игнатьев А.А. Уплотнение грунтов вибрационными катками: монография. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2012. 140 p.
37. Тюремнов И.С., Игнатьев А.А. Расчёт распределения напряжений в грунтах с линейным законом изменения плотности по глубине от динамической поверхностной нагрузки // Строительные и дорожные машины. 2013. № 1. С. 40–42.
38. Тюремнов И.С. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 3. Особенности функционирования и “интеллектуальное уплотнение” // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 2(41). С. 115–122.
39. Тюремнов И.С., Игнатьев А.А., Попов Ю.Г. Анализ рекомендаций по назначению режимов работы вибрационных катков при уплотнении грунтов // Строительные и дорожные машины. 2011. № 12. С. 31–35.

REFERENCES

1. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A., Filatov I.S. Statistical analysis of technical characteristics for the soil vibrating rollers. *Bulletin of PNU*. 2014; 3(34): 81–88. (in Russ.)
2. Tyuremnov I.S. Technical parameters analyses of different types of impact-vibration soil compacting machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(6): 706–716. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>
3. Fathi A. et al. Assessing depth of influence of intelligent compaction rollers by integrating laboratory testing and field measurements. *Transp. Geotech.* 2021; Vol. 28: 100509.

4. Shen J. et al. Co-simulation for optimal working parameter selection during soil vibratory compaction process. *J. Terramechanics*. 2024; Vol. 112: 45–57.
5. Li S. et al. Dynamic characteristics of sub-grade-bridge transitions in heavy-haul railways under roller excitation. *Transp. Geotech.* 2021; Vol. 29: 100589.
6. Wu K. et al. Discrete Element Modeling of Vibration Compaction Effect of the Vibratory Roller in Roundtrips on Gravels. *J. Test. Eval.* 2021; 49: 20190910.
7. Peng H. et al. Discrete element simulation of vibration compaction of slag subgrade. *Sci. Rep.* 2024; Vol. 14.
8. Quist J. et al. UNDERSÖKNING AV SEPARATIONSEFFEKTER VID KOMPakterING AV OBUNDNA MATERIAL. SBUF ID: 13820. 2021. 56 p.
9. Li Y., She C. Discrete Simulation of Vibratory Roller Compaction of Field Rockfills. *Shock Vib.* 2021; Vol. 2021: 1–15.
10. Popov G.N. Selection parameters of trailed vibratory rollers for compaction of soil bases. *Tr. LPI*. 1972; vyp. 321: 114–119. (in Russ.)
11. Anderegg R., Von Felten D.A., Kaufmann K. Compaction monitoring using intelligent soil compactors. *GeoCongress 2006 Geotech. Eng. Inf. Technol.* Age. Atlanta, 2006. Vol. 2006, № Jönsson. P. 41.
12. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Justification of the method of regulating the contact force of the vibrating roller with the compacted material. *Systems. Methods. Technologies*. 2022; 1 (53): 36-42 36 (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-1-36-42>
13. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Investigation of the Acceleration Spectrum of a Vibratory Roller in the Process of Soil Compaction. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22(2): 182-192. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-182-192>. EDN: WLRDCA
14. Yoo T.-S., Selig E.T. Dynamics of Vibratory-Roller Compaction. *J. Geotech. Eng. Div. ASCE*. 1979; 105 (GT10):1211–1231.
15. Siminiati D., Hren D. Simulation on vibratory roller-soil interaction. *Adv. Eng.* 2008; 2, no 1: 111–120.
16. Pistol J. et al. Consideration of the Variable Contact Geometry in Vibratory Roller Compaction. *Infrastructures*. 2023; 8, no 110: 1–15.
17. Shabanova G.I., Savelyev S.V., Bury G.G. Mathematical description of the vibrating system “vibrating working body - soil”. *Vestnik SibADI*. 2013; 3(31): 102-107. (in Russ.)
18. Susante P., Mooney M. Capturing Nonlinear Vibratory Roller Compactor Behavior through Lumped Parameter Modeling. *J. Eng. Mech.* 1996; 684–693.
19. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Modeling of interaction between road roller vibrating drum and soil being compacted. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2024; 26: 60–67. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-26-60-67>
20. Tyuremnov I.S., Shorohov D.A. Vibrating roller with compacted soil interaction modelling. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024;21(2):202-216. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-202-216>.
21. Mikheyev V.V., Savelyev S.V. Modeling of properties of deformable soil media during compaction by cylindrical roller drums mathematical modeling of compaction for elastoviscoplastic soil media caused by the interaction with work tool of compacting machine in the framework of modified. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017; (2(54)): 28-36. (In Russ.) DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2\(54\)-28-36](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-28-36)
22. Tarasov V.N., Boyarkina I.V., Serebrennikov V.S. Analytical method for studying the vertical displacements of the road roller vibratory roller during the compaction of materials and soils. *Construction and road building machines*. 2019; 7: 13–18. (in Russ.)
23. Savelyev S.V., Mikheev V.V., Beloded A.S. Mathematical model of dynamic deformation of compacted elastic viscous plastic medium. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016; (3(49)): 99-105. (In Russ.) DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-3\(49\)-99-105](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-3(49)-99-105)
24. Nosov S.V. Mathematical modelling of the dynamics of land transport and technological vehicles in interaction with a deformable support foundation: Monografiya. Lipetsk, 2016:164. (in Russ.)
25. Lu Y. et al. Research on vibratory & oscillatory coexistence nonlinear dynamics based on drum-subgrade coupling model. *Int. J. Non. Linear. Mech.* 2023; Vol. 157: 104536.
26. Adam D., Kopf F. Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device). *Proc. Int. Semin. Geotech. Pavement Railw. Des. Constr. Athens, Greece*. 2004: 97–106.
27. Mooney M. et al. Intelligent Soil Compaction Systems. NCHRP Report 676. Washington, D.C.: *Transportation Research Board*, 2010: 178.
28. Anderegg R., Kaufmann K. Intelligent compaction with vibratory rollers: feedback control systems in automatic compaction and compaction control. *Transp. Res.* 2004; Vol. 1868: 124–134.
29. Dobrescu C. The dynamic response of the vibrating compactor roller, depending on the viscoelastic properties of the soil. *Appl. Syst. Innov.* 2020; Vol. 3, no 2: 1–10.
30. Dobrescu C. Comparative Analysis of the Voigt–Kelvin and Maxwell Models in the Compaction by Vibration Process. *Springer Proc. Phys. Springer International Publishing*. 2021; 251: 359–366.
31. Merdanov SH.M. Production of a prototype of a vibrating hydraulic tyre roller. *Modern high technologies*. 2016; 5, no 2: 270–275. (in Russ.)
32. Savelyev S.V., Mikheev V.V., Sachuk YU.S. The effectiveness of the use of vibration in pneumatic tire road rollers in the construction of highways. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU)*. 2023; 12: 640–641. (in Russ.)
33. Zakharenko A.V. Determination of rubber layer parameters on the smooth roller of a road roller. *Construction and road building machines*. 2018; 1: 25–26. (in Russ.)

34. Pistol J. et al. Theoretical and experimental investigation of continuous compaction control (CCC) systems. *17th Nord. Geotechn. Meet. Challeng. Nord. Geotech.* 25: 865–872.

35. Tyuremnov I.S. On development of methodology for predicting technological capabilities of impact-vibration soil compacting machines. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU)*. 2024; 9: 689–692. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-9-689-690>

36. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A. *Soil compaction with vibrating rollers*: monograph. Yaroslavl': Izd-vo YAGTU, 2012:140. (in Russ.)

37. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A. Calculation of stress distribution in soils with linear law of density variation with depth from dynamic surface loading. *Construction and road building machines*. 2013; 1: 40–42. (in Russ.)

38. Tyuremnov I.S. Overview of continuous soil compaction monitoring systems for vibratory rollers. Part 3. Functional features and 'intelligent compaction'. *Bulletin of PNU*. 2016; 2(41):115–122. (in Russ.)

39. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A., Popov YU.G. Analysis of recommendations on assigning operating

modes of vibratory rollers for soil compaction. *Construction and road building machines*. 2011; 12: 31–35. (in Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

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

SPIN-код: 9976-0728,

e-mail: tyuremnovis@yandex.ru

INFORMATION ABOUT AUTHOR

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

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

SPIN-код: 9976-0728,

e-mail: tyuremnovis@yandex.ru

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

Научная статья

УДК 636.5:658.286.2

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-418-433>

EDN: WWTHEA



ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА СОХРАННОСТЬ ЖИВОЙ ПТИЦЫ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ

М.В. Грязнов¹ ✉, П.П. Журавский², Е.А. Тимофеев³¹Магнитогорский государственный технический университет,
г. Магнитогорск, Россия²ООО «Урал-Ситно»,

г. Магнитогорск, Россия

³Администрация Нагайбакского муниципального района Челябинской области,
с.п. Фершампенуаз, Россия✉ ответственный автор
gm-autolab@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье обоснована актуальность научных разработок, направленных на обеспечение сохранности живой птицы в процессе её перевозки на забой автомобильным транспортом. В соответствии с действующим законодательством пояснено понятие сохранности перевозки живого груза. В расчётах использовано понятие эффективной температуры как корректного измерителя исследуемого параметра. Установлена зависимость утраченного в процессе перевозки поголовья цыплят-бройлеров от продолжительности их доставки на забой при различной эффективной температуре окружающей среды. Обоснована неравномерность распределения температуры внутри кузова движущегося автомобиля-птицевода в тёплое время года, что позволяет разработать рекомендации по повышению сохранности перевозимой птицы.

Материалы и методы. Анализ нормативно-правовой и научной литературы, статистический и технико-экономический анализ автотранспортного обслуживания птицеводческого комплекса, инструментальные измерения.

Результаты. Обладающие научной новизной: зависимость числа утраченного в процессе перевозки поголовья цыплят-бройлеров от продолжительности их доставки на забой при различной эффективной температуре окружающей среды, а также график отклонений температуры внутри кузова автомобиля-птицевода от эффективной температуры внешней среды в тёплое время года; - имеющие практическую значимость: величина ущерба, наносимого выращиваемому поголовью утратой груза вследствие задержек при движении птицевода.

Обсуждение и заключение. Поставленные задачи выполнены в полном объёме, в результате чего получены методические рекомендации по повышению сохранности живой птицы при перевозке автомобильным транспортом. Реализация предложенных рекомендаций обеспечит сокращение потерь птицы при перевозке на забой на 15%.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: температура окружающей среды, автомобиль-птицевоз, перевозка живой птицы, транспортный контейнер, сохранность перевозимого поголовья

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы благодарят научных работников и специалистов-практиков, обсуждавших результаты исследования на всех этапах его выполнения, а также рецензентов данной статьи за высказанные рекомендации и пожелания.

Статья поступила в редакцию 28.04.2025; одобрена после рецензирования 13.05.2025; принята к публикации 16.06.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Грязнов М.В., Журавский П.П., Тимофеев Е.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Грязнов М.В., Журавский П.П., Тимофеев Е.А. Влияние температуры окружающей среды на сохранность живой птицы при перевозке автомобильным транспортом // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 3. С. 418-433. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-418-433>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-418-433>

EDN: WWTHEA

INFLUENCE OF AMBIENT TEMPERATURE ON THE SAFETY OF LIVE POULTRY DURING AUTOMOBILE TRANSPORTATION

Mikhail V. Gryaznov¹ ✉, Pavel P. Zhuravskiy², Egor A. Timofeev³

¹Magnitogorsk State Technical University,
Magnitogorsk, Russia

²«Ural-Sitno» Ltd,
Magnitogorsk, Russia

³Administration of Nagaybak municipal district, Chelyabinsk region,
Fershampenuaz settlement, Chelyabinsk region, Russia

✉ corresponding author
gm-autolab@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The article substantiates the relevance of scientific developments aimed at ensuring the safety of live poultry in the process of its transportation to slaughter by road transport. The concept of safety of live cargo transportation is explained in accordance with the current legislation. In calculations the concept of effective temperature as a correct measure of the studied parameter is used. The dependence of broiler chicken lost in the process of transportation on the duration of their delivery to the slaughterhouse at different effective ambient temperature is established. The non-uniformity of temperature distribution inside the body of a moving poultry car in the warm season has been proved, that allows to develop recommendations on improving the safety of transported poultry.

Materials and methods. Analysis of regulatory and legal, scientific literature, statistical, technical and economic analysis of motor transport service of poultry complex, instrumental measurements.

Results. Possessing scientific novelty: the dependence of the number of broiler chickens lost in the process of transportation on the duration of their delivery to the slaughterhouse at different effective temperature of the environment, as well as the graph of temperature deviations inside the body of the poultry truck from the effective temperature of the environment in the warm season; - having practical significance: the amount of damage to the growing livestock by the loss of cargo due to delays in the movement of the poultry truck.

Discussion and conclusions. The set tasks have been executed completely, resulting in received methodical recommendations on increasing the safety of live poultry during transportation by automobile transport. Implementation of the proposed recommendations will ensure decrease of poultry losses during transportation to slaughter by 15%.

KEYWORDS: ambient temperature, poultry car, transportation of live poultry, transportation container, safety of transported poultry

ACKNOWLEDGMENTS. The authors would like to thank the researchers and practitioners who discussed the results of the study at all stages of its implementation, as well as the reviewers of this article, for their recommendations and suggestions.

The article was submitted: April 28, 2025; approved after reviewing: May 13, 2025; accepted for publication: June 16, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Gryaznov M.V., Zhuravsky P.P., Timofeev E.A. Influence of ambient temperature on the safety of live poultry during automobile transportation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (3): 418-433. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-418-433>

© Gryaznov M.V., Zhuravsky P.P., Timofeev E.A., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Технология современного птицеводства предусматривает территориальное рассредоточение площадок выращивания птицы [1]. Этим вызвана необходимость организации транспортного обслуживания птицеводческого хозяйства, связанного с доставкой автомобильным транспортом кормов на бройлерные площадки и с вывозом живой птицы на забой. Существенные потери выращенного поголовья, без учёта падежа от инфекций, происходят при его доставке от мест выращивания в цех убой и переработки.

Согласно ст. 796 Гражданского кодекса РФ¹ потерей груза при перевозке считается его утрата или недостача, а также повреждение (порча). Применительно к перевозке живой птицы утратой груза является гибель части перевозимой партии. Недостачей при этом считается отклонение количества загруженных в транспортировочные контейнеры голов к моменту отправления птицевода в рейс до момента сдачи груза получателю в приёмном отделении цеха убой и переработки. О повреждении (порче) живого груза свидетельствует наличие к моменту разгрузки транспортировочных контейнеров переломов, гематом и других следов механического воздействия на перевозимую птицу. Как правило, все виды потерь возникают вследствие нарушения технологии перевозок или воздействия факторов внешней среды.

В научной монографии², а также в работе [2] приведены результаты экспертной оценки значимости факторов по числу их проявлений в падеже живой птицы при перевозке. Экспертами установлено, что высокую значимость имеет плотность посадки птицы в транспортировочные ящики – 60,52%, подверженность стрессу от нахождения в непривычных условиях – 30,06% и температура окружающей среды – 7,03%. Негативное воздействие указанных факторов усиливается при задержках на любом этапе перевозки (погрузка-разгрузка птицевода, его движение с грузом), а также в ожидании подготовленной к перевозке партии живого груза транспортного средства. По мнению авторов, около 65% причин задержек в перевозке происходит во время движения гружёного птицевода [3]. Объектом настоящего

исследования является влияние температуры окружающей среды на сохранность перевозимого поголовья. Учёту влияния температуры окружающей среды при обеспечении сохранности живого груза уделяется большое внимание в зарубежных научных работах [4, 5, 6, 7].

Результаты проведённого анализа научной литературы показывают, что имеющиеся методические рекомендации по развитию перевозок живой птицы в основном направлены на совершенствование конструктивных свойств подвижного состава, а также на механизацию выполнения технологических операций, сопутствующих перевозке. В настоящее время востребованы методы организации и управления перевозкой живой птицы, основанные на использовании возможностей современных технических средств автоматизации мониторинга движения автотранспортных средств и коммуникационных систем передачи информации о ходе транспортного процесса [8, 9, 10, 11], повышения эффективности транспортно-технологических систем [12], надёжности и безопасности автомобильных перевозок [13, 14]. Однако развитие современных методов управления перевозкой живой птицы требует наличия исходной информации для оптимизации параметров транспортирования, в первую очередь направленного на сокращение ущерба перевозимого груза. Поэтому установление зависимостей количественных измерителей факторов, влияющих на сохранность перевозимой птицы от продолжительности её доставки на забой, представляет собой актуальную научно-практическую задачу.

Целью настоящего исследования является установление числа утраченного в процессе перевозки поголовья на примере цыплят-бройлеров, от продолжительности их доставки на забой при различной эффективной температуре окружающей среды. Поставленная цель достигается последовательным решением следующих задач:

- характеристика эффективной температуры как корректного измерителя рассматриваемого фактора;
- установление зависимости числа утраченного в процессе перевозки поголовья цыплят-бройлеров от продолжительности их доставки на забой при различной эффективной температуре окружающей среды;

¹ ГК РФ ч. 2 от 26.01.1996 г. № 14-ФЗ (ред. от 13.12.2024 г.).

² Тимофеев Е.А., Грязнов М.В., Курганов В.М. Перевозка живой птицы автомобильным транспортом на современном птицеводческом комплексе: монография. Магнитогорск: Изд-во «Магнитогорский Дом печати», 2020. 120 с.

- обоснование неравномерности распределения температуры внутри кузова движущегося автомобиля-птицевода в тёплое время года, что позволяет разработать рекомендации по повышению сохранности перевозимой птицы.

Структура публикации соответствует последовательности изложения задач проведённого исследования. Теоретическая значимость работы состоит в развитии теоретической базы обоснования решений по оптимизации параметров транспортного процесса перевозки живой птицы автомобильным транспортом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Комплекс стандартных методов и процедур включал анализ нормативно-правовой и научной литературы, статистический и технико-экономический анализ автотранспортного обслуживания птицеводческого комплекса. Анализ нормативно-правовой базы, регламентирующей потерю груза при перевозке, позволил дифференцировать и охарактеризовать данное понятие применительно к перевозке живой птицы, а также обозначить причины возникновения этих потерь. Установлению искомым зависимостей предшествовал анализ научной литературы. На этом этапе исследования было выявлено, что температура окружающей среды является одним из значимых факторов, определяющих сохранность живой птицы при перевозке. Был выбран объект исследования и инструментарий построения зависимостей, основанный на обработке статистики и экстраполяции полученных результатов. Установлены конструктивные особенности автомобиля-птицевода, позволяющие регулировать температуру внутри кузова посредством управления открытием вентиляционных клапанов и правильной расстановкой на грузовой платформе транспортировочных контейнеров с птицей разной устойчивости к стрессу от нахождения в непривычных условиях.

Формирование необходимого для расчётов массива исходных данных производилось по результатам сбора и обработки представительного объема производственной статисти-

ческой информации о задержках в пути следования автомобиля-птицевода с фиксацией температуры окружающей среды, влажности воздуха, скорости ветра, падежа птицы. Информационной основой выполнения этого этапа послужила отчётность за три календарных года по десяти бройлерным площадкам ООО «Ситно-Продукт» (г. Магнитогорск), расположенных в Агаповском и Нагайбакском муниципальных районах Челябинской области. Неравномерность распределения температуры внутри кузова движущегося автомобиля-птицевода была обоснована инструментальными измерениями с использованием температурных самописцев (логгеров). Посредством технико-экономического анализа оценивался экономический эффект от практической реализации предлагаемых рекомендаций.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Эффективная температура как корректный измеритель температуры окружающей среды

Практически во всех странах измерение температуры предметов, а также воздуха на улице и в помещении производится в градусах Цельсия. Следует отметить, что согласно ГОСТ-8.417–2002³ основным измерителем термодинамической температуры (основной единицей СИ) является градус Кельвина, отчёт которой ведётся от абсолютного нуля. Несмотря на приспособленность к арифметическим вычислениям, в быту, на производстве и в торговле использование градуса Кельвина неудобно, поэтому тем же ГОСТом⁴ допускается применять для измерения температуры градусы Цельсия.

Известно, что нагретость тел зависит не только от температуры воздушной среды, в которой оно находится, но также от влажности воздуха и скорости ветра, имеющего охлаждающий эффект. Ветер сильно влияет на конвекционный теплообмен и степень ощущаемого живым объектом дискомфорта. Пример одной из шкал охлаждающего эффекта ветра приведён в таблице 1.

³ ГОСТ-8.417–2024 «Межгосударственный стандарт. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин». Дата введения 2024-09-30. М.: ФГБУ «РСТ», 2024.

⁴ ГОСТ-8.417–2024. Там же.

Таблица 1
Пример шкалы охлаждающего эффекта ветра⁵

Table 1
Example of wind chilling effect scale⁴

Скорость ветра		Охлаждающий эффект, °С
м/с	км/ч	
0,1	0,36	0
0,25	0,9	0,5
1,5	5,4	4,0
3,0	10,8	6,0
5,0	18,0	7,0
8,0	28,8	8,0

Воздействие комплекса перечисленных метеозаэментов учитывает такой биометеорологический индекс, как эффективная температура, введённый в обращение в первой половине XX века для оценки теплового состояния и степени дискомфорта человека, находящегося на улице. Данное понятие содержится в Большой медицинской энциклопедии⁶. Из научной литературы известны примеры реперных шкал эффективной температуры. Реперные шкалы сложно применять в расчётах, поэтому в настоящем исследовании эффективная температура рассчитывается по эмпирической формуле Стидмана:

$$T_{\text{эф.}} = -2,7 \cdot 1,04 \cdot T + 2 \cdot P - 0,65 \cdot V,$$

где T – температура воздуха, °С; P – парциальное давление водяного пара, кПа; V – скорость ветра на 10 м над уровнем земли, км/ч.

Парциальное давление водяного пара P характеризует влажность атмосферного воздуха. Газы (кислород, азот, инертные газы, переменные компоненты и прочие примеси) и водяной пар, составляющие воздух, вносят вклад в суммарное давление воздушной среды на расположенные в ней тела. Давление водяного пара в воздушной среде, при условии отсутствия остальных газов, компонентов

и примесей, называется парциальным давлением водяного пара, измеряемого в паскалях или миллиметрах ртутного столба.

Зависимость числа, утраченного в процессе перевозки поголовья цыплят-бройлеров, от продолжительности их доставки на забой

Искомая зависимость устанавливалась по результатам статистической обработки данных отбраковки поголовья, доставленного в приёмное отделение цеха убой и переработки. На основе данных ГЛОНАСС было проанализировано порядка 3300 оборотных рейсов автомобилей-птицевозов. Эта работа позволила сформировать выборку с продолжительностью технологических операций оборотных рейсов, включая продолжительность погрузочных операций, ездки с грузом, выгрузки птицевоза, холостого пробега.

Для расчёта эффективной температуры по каждой дате забоя апостериорно определялись значения метеозаэментов (среднесуточной температуры, влажности воздуха и скорости ветра). Число утраченного поголовья живой птицы в процессе доставки на забой отслеживалось по журналам отбраковки в цехе убой и переработки. В таблице 2 приведено математическое ожидание утраты цыплят-бройлеров за оборотный рейс.

⁵ Технические таблицы. <https://dpva.ru/Guide/GuideTricks/WindChillingEffect/> (дата обращения: 29.04.2025).

⁶ Большая медицинская энциклопедия. <https://xn--90aw5c.xn--c1avg/> (дата обращения: 29.04.2025).

Таблица 2

Математическое ожидание утраты живой птицы за оборотный рейс*

Источник: разработано Е.А. Тимофеевым

Table 2

Mathematical expectation of live bird loss per roundtrip

Source: compiled by E.A. Timofeev

$T_{эф}, ^\circ\text{C}$	Утрата, шт.	$T_{эф}, ^\circ\text{C}$	Утрата, шт.
- (35-30)	32,5	+ (0-5)	13,0
- (30-25)	29,8	+ (5-10)	5,3
- (25-20)	26,1	+ (10-15)	4,9
- (20-15)	21,4	+ (15-20)	5,0
- (15-10)	16,1	+ (20-25)	10,0
- (10-5)	14,4	+ (25-30)	12,0
- (5-0)	15,4	+ (30-35)	15,0

Примечание: *здесь и далее значения получены для максимальной устойчивости птицы к стрессу от нахождения в непривычных условиях (более 95%), рассчитываемого отношением размера отбракованного поголовья (погибшего, больного, травмированного) в процессе выращивания до забойного дня к размеру заселяемого поголовья на бройлерную площадку.

Данные таблицы 2 в виде зависимости приведены на рисунке 1.

Используя имеющиеся статистические данные, удалось рассчитать средние значения утраты птицы от времени движения загрузки

женного автомобиля-птицевоза лишь для двух значений эффективной температуры: - (10-5) и +(5-10), названные в работе базовыми значениями (таблица 3).

Таблица 3

Базовые значения утраты живой птицы при различном времени движения автомобиля-птицевоза, шт.

Источник: разработано Е.А. Тимофеевым

Table 3

Basic values of live bird loss at different movement time of a poultry transport vehicle, pcs.

Source: compiled by E.A. Timofeev

$T_{эф}, ^\circ\text{C}$	Время года	Время движения автомобиля-птицевоза с грузом, ч				
		1,5	1,75	2,0	2,25	2,5
- (10-5)	Холодное	5,92	8,3	10,1	13,7	20,0
+ (5-10)	Тёплое	5,3	7,4	8,9	12,5	19,4

По данным таблицы 4 построена регрессионная кривая (рисунок 2).

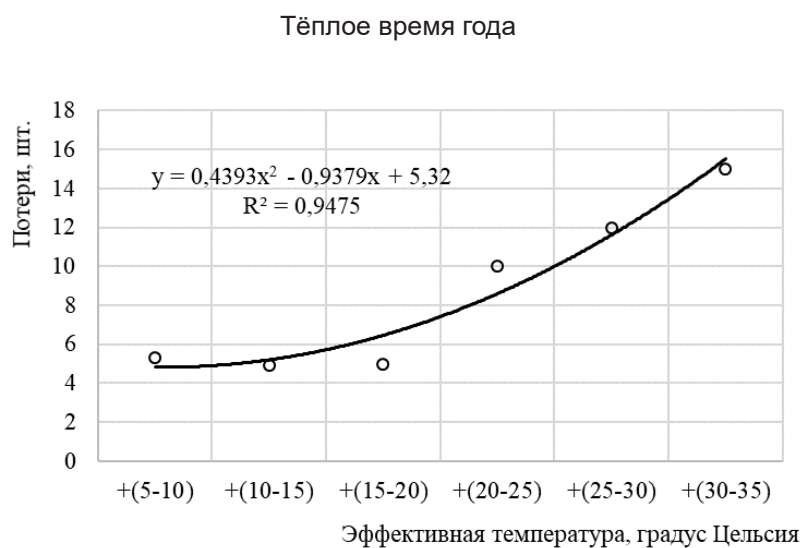


Рисунок 1 – Зависимости утраты живой птицы за оборотный рейс от эффективной температуры
Источник: разработано Е.А. Тимофеевым.

Figure1 – Dependences of the loss of live birds during the round trip transportation on the effective temperature
Source: compiled by E.A. Timofeev.

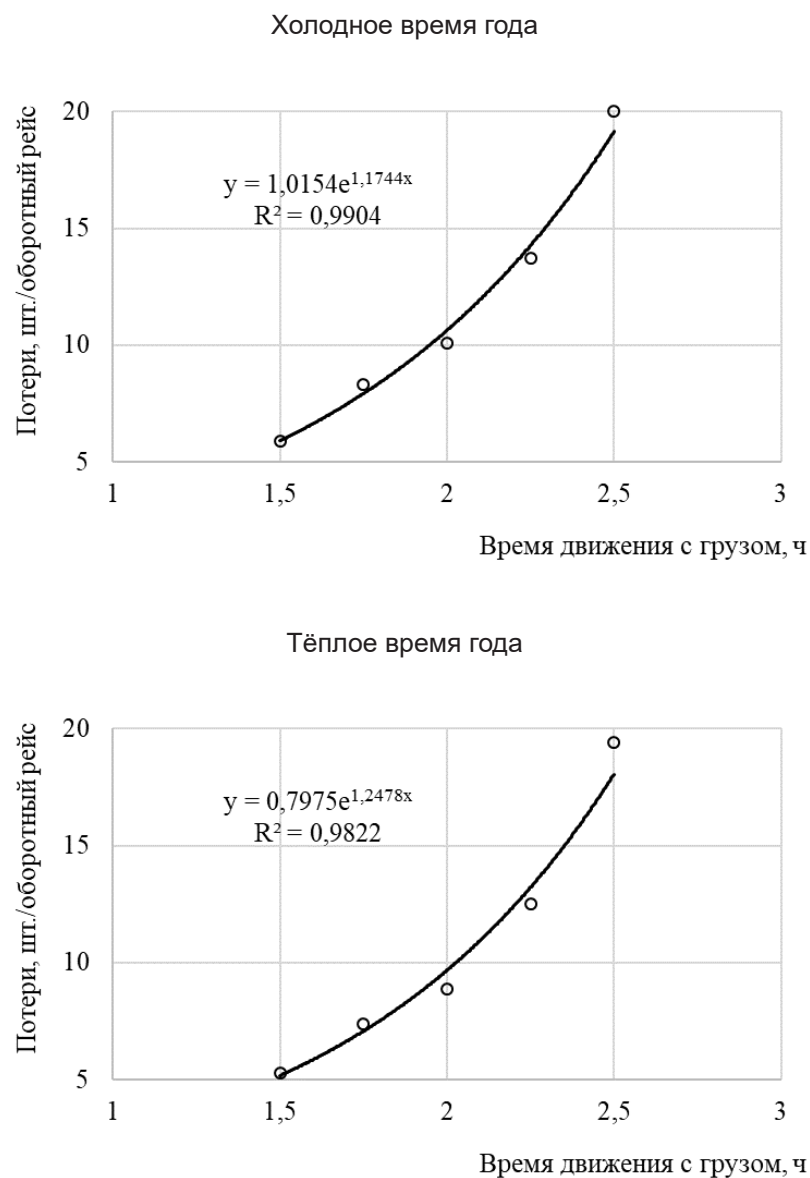


Рисунок 2 – Регрессионная кривая утраты живой птицы от времени движения автомобиля-птицевоза с грузом
Источник: разработано Е.А. Тимофеевым.

Figure 2 – Regression curve of live bird loss from the travel time of a poultry truck with cargo
Source: compiled by E.A. Timofeev.

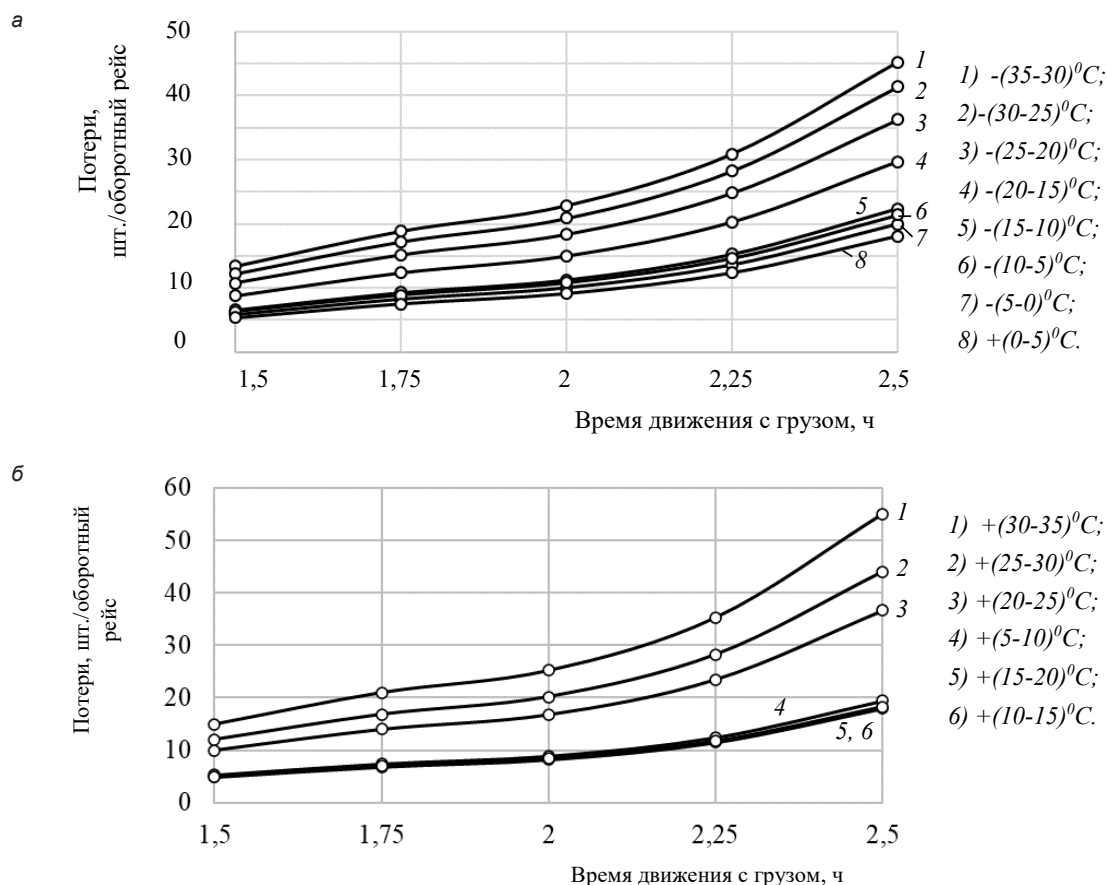


Рисунок 3 – Расчётная зависимость числа утраченного в процессе перевозки поголовья цыплят-бройлеров от продолжительности их доставки на забой в холодное (а) и тёплое (б) время года
 Источник: разработано Е.А. Тимофеевым.

Figure 3 – Estimated dependence of the number of broiler chickens lost during transportation on the duration of their delivery to slaughter in the cold (a) and warm (b) seasons
 Source: compiled by E.A. Timofeev.

Для остальных значений эффективной температуры величина утраты живой птицы была экстраполирована. Шаг экстраполяции принимался равным математическому ожиданию утраты птицы за оборотный рейс, выраженное в долях. За 1,0 принималась утрата при значении эффективной температуры, для кото-

рой построена базовая регрессионная кривая. Умножением величины потерь, рассчитанных по базовой кривой, на соответствующий шаг экстраполяции, определяется недостающая величина утраты живой птицы для всех значений эффективной температуры. Результаты экстраполяции приведены на рисунке 3.

Таблица 4
Ущерб, наносимый выращиваемому поголовью утратой груза
вследствие задержек при движении птицевоза, %
Источник: разработано Е.А. Тимофеевым.

Table 4
Damage caused to poultry livestock by loss of cargo due to delays in movement of poultry carrier, %
Source: compiled by E.A. Timofeev.

$T_{эф.}, ^\circ C$	Время движения с грузом, ч				
	1,5	1,75	2	2,25	2,5
- (35-30)	0,0149	0,0358	0,0611	0,0954	0,1457
$T_{эф.}, ^\circ C$	Время движения с грузом, ч				
	1,5	1,75	2	2,25	2,5
- (30-25)	0,0136	0,0327	0,0559	0,0873	0,1333
- (25-20)	0,0119	0,0287	0,0490	0,0766	0,1169
- (20-15)	0,0098	0,0236	0,0402	0,0628	0,0958
- (15-10)	0,0073	0,0177	0,0302	0,0472	0,0721
- (10-5)	0,0066	0,0158	0,0270	0,0422	0,0645
- (5-0)	0,0070	0,0169	0,0289	0,0451	0,0689
- (0-5)	0,0059	0,0142	0,0243	0,0380	0,0581
+ (5-10)	0,0059	0,0141	0,0240	0,0379	0,0595
+ (10-15)	0,0054	0,0131	0,0222	0,0350	0,0550
+ (15-20)	0,0056	0,0133	0,0227	0,0357	0,0561
+ (20-25)	0,0111	0,0267	0,0453	0,0715	0,1122
+ (25-30)	0,0133	0,0320	0,0544	0,0858	0,1346
+ (30-35)	0,0167	0,0400	0,0680	0,1072	0,1683

Используя установленную зависимость, рассчитывается ущерб, наносимый выращиваемому поголовью утратой груза вследствие задержек при движении птицевоза. Результаты расчёта с нарастающим итогом в относительных величинах для холодного и теплого времени года приведены в таблице 4.

Из таблицы 4 следует, что каждые 15 мин нахождения гружёного птицевоза в пути добавляют в среднем к потерям поголовья, вывозимого в этот день на забой, 0,022% зимой и 0,02% летом.



Рисунок 4 – Расположение грузовых мест в полуприцепе-птицевозе ТОНАР-98882 для размещения транспортировочных контейнеров
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Arrangement of cargo spaces for placing transport containers in the TONAR-98882 poultry semi-trailer
Source: compiled by the authors.

а



б

Основные технические характеристики:

- точность измерения – 0,5 0С;
- диапазон измерений – (- 40 до + 140) 0С;
- измерительный цикл – от 1 мин до 24 ч;
- габаритные размеры, мм – 44 x 12 x 97;
- масса не более – 0,45 кг;
- директивы, стандарты, сертификаты – 2014/30/ЕС, EN 12830, сертифицирован HACCP, сертификат калибровки по температуре в соответствии с ISO 17025;
- тип батареи – CR2450, сменная;
- ресурс батареи (для многоразовых приборов) – 500 дней (цикл измерения 15 мин, 25 °С;
- объем памяти – 64 показания.

Рисунок 5 – Внешний вид (а) и основные технические характеристики (б) логгера Thermo Button⁷

Figure 5 – Appearance (a) and main technical characteristics (b) of the Thermo Button Temperature Data Logger⁷

⁷ Логгеры (регистраторы) данных testo 184. Руководство по эксплуатации. https://www.ecounit.ru/public/catalog/files/561_0970-1842-ru-07.pdf (дата обращения: 29.04.2025).

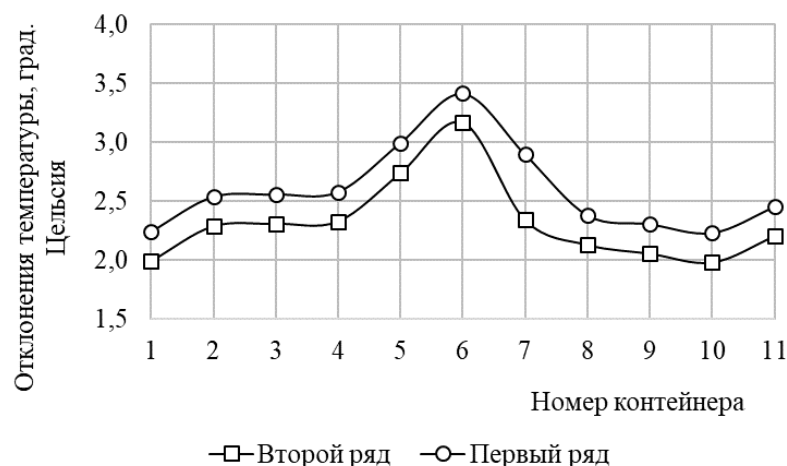


Рисунок 6 – График отклонений температуры внутри кузова автомобиля-птицевоза от эффективной температуры внешней среды в тёплое время года
Источник: разработано авторами.

Figure 6 – Graph of temperature deviations inside the body of a poultry truck from the effective temperature of the external environment in the warm seasons
Source: compiled by the authors.

Неравномерность распределения температуры внутри кузова движущегося автомобиля-птицевоза

При организации процесса доставки живой птицы важно учитывать неравномерность распределения температуры внутри кузова при движении птицевоза, что является следствием ряда конструктивных особенностей автопоездов с тентованными полуприцепами. Для установления этой неравномерности был проведён производственный эксперимент, в процессе которого измерялась температура в пространстве грузовых мест, на которых размещаются транспортировочные контейнеры с птицей. В эксперименте были задействованы полуприцепы-птицевозы ТОНАР-98882, вмещающие 22 транспортировочных контейнера по одиннадцать штук в верхнем и в нижнем рядах (рисунок 4).

Температура внутри кузова и за его пределами фиксировалась температурными самописцами (логгерами) Thermo Button. Внешний вид и основные технические характеристики логгера приведены на рисунке 5.

Работой встроенного программного обеспечения управляет микропроцессор, расположенный внутри корпуса прибора на электронной плате. Электронный блок выдает питающее напряжение на первичные преобразователи и получает от них сигнал, который

преобразуется в цифровой код и поступает на обработку микропроцессором и микросхемами поддержки микропроцессора. Логгеры закрепляются на транспортировочных контейнерах. Дополнительный логгер устанавливался на раме полуприцепа так, чтобы ограничить попадание солнечных лучей, а также влаги или снега от дороги.

В процессе эксперимента было произведено порядка 850 замеров. На рисунке 6 приведён график отклонений температуры внутри кузова автомобиля-птицевоза от эффективной температуры внешней среды в тёплое время года.

Анализ полученных данных позволил установить, что максимальное отклонение температуры внутри кузова птицевоза от температуры внешней среды происходит в районе местоположения шестого контейнера. Отклонение в сторону нагрева перевозимой птицы здесь достигает в среднем 3,3 °С за рейс. Во всех произведённых замерах температура первого ряда повышается интенсивнее, чем второго ряда в среднем на 0,3 °С.

Это происходит из-за циркуляции воздушных потоков внутри кузова в процессе движения автомобиля несмотря на то, что груз накрыт тентом. Воздушные потоки наиболее интенсивно обдувают птицу в первых и в последних контейнерах по ходу движения ав-

томобиля. Однако поскольку задняя стенка полуприцепа сплошная, температура птицы в последнем контейнере несколько повышается.

Результаты производственного эксперимента позволяют разработать рекомендации по повышению сохранности перевозимой птицы в тёплое время года, посредством, например, открытия вентиляционных клапанов тента в различных частях полуприцепа. В жаркую погоду перевозка может осуществляться при частичной растентовке полуприцепа. При отрицательной температуре сохранность птицы может повышаться укрыванием теплоизоляционной тканью первых и последних контейнеров, расположенных во втором ряду, либо обеспечением различной плотности посадки птицы в транспортировочную тару с учётом самонагрева перевозимого груза. Управление тепловым балансом перевозимой живой птицы за счёт оптимизации плотности её посадки в транспортировочную тару является задачей последующих исследований.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставленные в работе задачи выполнены в полном объёме. По итогам исследования получены методические рекомендации по обеспечению сохранности живой птицы в процессе её перевозки на забой автомобильным транспортом. Научная новизна исследования состоит в:

- установлении зависимости числа утраченного в процессе перевозки поголовья цыплят-бройлеров от продолжительности их доставки на забой при различной эффективной температуре окружающей среды;
- обосновании графика отклонений температуры внутри кузова автомобиля-птицевоза от эффективной температуры внешней среды в тёплое время года.

Практическая значимость полученных результатов заключается в определении величины ущерба, наносимого выращиваемому поголовью утратой груза вследствие задержек при движении птицевоза.

Предложенные методические рекомендации были апробированы в ООО «Ситно-Продукт» (г. Магнитогорск). Расчётами установлено, что снижение задержек в перевозке на 5–15% позволит сократить экономические потери птицеводческого комплекса от неадекватной её организации на 14,11–21,03 млн руб./год.

Основные выводы по результатам проведенных исследований состоят в следующем:

1. Актуальность проблемы обеспечения сохранности живой птицы в процессе её перевозки на забой автомобильным транспортом вызвана спецификой технологии современного птицеводческого комплекса, предусматривающей территориальное рассредоточение площадок выращивания и длительное нахождение птицы в пути.

2. Потеря живого груза при перевозке состоит из его утраты (гибели части перевозимой партии), недостачи (отклонения количества загруженных в транспортировочные контейнеры голов к моменту отправления транспортного средства до момента сдачи груза получателю) и повреждения или порчи (наличия следов механического воздействия на перевозимую птицу). Одной из основных причин потери живого груза является воздействие факторов внешней среды.

3. Большое влияние на сохранность живой птицы при перевозке автомобильным транспортом имеет температура окружающей среды, негативное воздействие которой усиливается при задержках на любом этапе перевозки (погрузка-разгрузка, движение транспортного средства с грузом).

4. Для корректной количественной характеристики температуры окружающей среды предложено использовать эффективную температуру, учитывающую комплекс таких метеозадающих факторов, как скорость ветра, имеющего охлаждающий эффект, температуру и влажность атмосферного воздуха, характеризующейся парциальным давлением водяного пара.

5. Статистическая обработка информации об отбраковке поголовья, доставленного в приёмное отделение цеха убой и переработки, на основе данных ГЛОНАСС и фиксации значений среднесуточной температуры, влажности воздуха и скорости ветра в день забоя, позволила установить зависимость числа утраченного в процессе перевозки поголовья цыплят-бройлеров от продолжительности их доставки на забой при различной эффективной температуре окружающей среды в холодное и теплое время года.

6. Используя установленную зависимость, был рассчитан ущерб, наносимый выращиваемому поголовью утратой груза вследствие задержек при движении птицевоза. Результаты расчёта показывают, что каждые 15 мин нахождения гружёного птицевоза в пути добавляют в среднем к потерям поголовья, вывозимого в этот день на забой, 0,022% зимой и 0,02% летом.

7. Обоснование неравномерности распределения температуры внутри кузова при движении птицевоза производилось посредством производственного эксперимента, в процессе которого измерялась температура в пространстве грузовых мест, на которых размещаются транспортировочные контейнеры с птицей. Температура внутри кузова и за его пределами фиксировалась температурными самописцами (логгерами).

8. Анализ полученных по итогам производственного эксперимента данных позволил установить, что в тёплое время года максимальное отклонение температуры внутри кузова птицевоза в сторону нагрева перевозимой птицы от температуры внешней среды происходит в районе грузовых мест, расположенных в центральной его части, что позволяет разработать рекомендации по повышению сохранности перевозимой птицы.

9. Наличие положительных результатов апробации предложенных методических рекомендаций в условиях крупного птицеводческого комплекса позволяет утверждать о научной состоятельности и практической целесообразности результатов проведённого исследования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Курганов В.М., Грязнов М.В., Тимофеев Е.А. Оптимизация перевозок живой птицы автомобильным транспортом // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2021. № 3 (66). С. 105–113.
2. Kurganov V., Gryaznov M., Timofeev E., Polyakova L. Key factors in reducing live poultry losses during transportation // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2021. 113. pp. 115–134.
3. Курганов В.М., Грязнов М.В., Тимофеев Е.А. Фактор времени в ситуационном управлении автомобильными перевозками живой птицы // Транспорт Урала. 2021. № 3 (70). С. 15–21.
4. Voslazhova E., Hanazalek Z., Vecherek V., Strakova E., Suchy P. Comparison between laying hen performance in the cage system and the deep litter system on a diet free from animal protein // Acta Veterinaria Brno. 2006. 75 (2). pp. 219–225.
5. Vecherek V., Grbalova S., Voslazhova E., Yanachkova B., Malena M. Effects of travel distance and the season of the year on death rates of broilers transported to poultry processing plants // Poult Sci. 2006. 85. pp. 1881–1884.
6. Nijdam E., Arens P., Lambooij E., Decuyperre E., Stegeman J. Factors influencing bruises and mortality of broilers during catching, transport and lairage // Poult Sci. 2004. 83. pp. 1610–1615.

7. Voslazhova E., Yanachkova B., Rubeshova L., Kozak A., Bedashova I., Steinhäuser L., Evener V. Mortality Rates in Poultry Species and Categories during Transport for Slaughter // Acta Veterinaria Brno. 2007. 76. pp. 101–108.

8. Корчагин В.А., Ризаева Ю.Н., Сухатерина С.Н. Теоретико-прикладные методы доставки сельскохозяйственных культур // Аграрный научный журнал. 2019. № 2. С. 92–96.

9. Монгуш С.Ч., Чооду О.А., Евтюков С.А. Моделирование процессов влияния климатических факторов и рельефа местности на производительность транспортно-технологических машин // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2019. № 3 (47). С. 108–111.

10. Филиппова Н.А., Власов В.М., Беляев В.М. Навигационный контроль доставки грузов в условиях севера России // Мир транспорта. 2019. Т. 17, № 4 (83). С. 218–231. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-4-218-231>

11. Филиппова Н.А. Научные пути решения проблем организации и планирования перевозок грузов в районы Крайнего Севера и арктические зоны России // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2024. № 2. С. 11–22. DOI: <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-2-11>

12. Карелина М.Ю., Ризаева Ю.Н., Баев В.В., Пупышев М.В., Карагодин В.И., Дидманидзе О.Н. Повышение эффективности работы транспортно-технологической системы // Транспортное дело России. 2024. № 2. С. 192–196.

13. Дорофеев А.Н., Курганов В.М., Король А.А., Лим Д.Ю., Захаров З.З. Оценка надёжности автомобильного перевозчика в цифровой транспортной платформе // Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 2-2 (85). С. 115–122.

14. Ильина И.Е., Витвицкий Е.Е. Индексы для оценки уровня безопасности дорожного движения в регионах // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22 (1). С. 68–77. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-1-68-77>. EDN: XVCDWQ

REFERENCES

1. Kurganov V.M., Gryaznov M.V., Timofeev E.A. Optimization of live bird transportation by road transport. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*. 2021; 3 (66):105–113. (in Russ.)
2. Kurganov V., Gryaznov M., Timofeev E., Polyakova L. [Key factors in reducing live poultry losses during transportation]. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2021; 113: 115–134.
3. Kurganov V.M., Gryaznov M.V., Timofeev E.A. The time factor in the situational management of road transport of live poultry. *Transport of the Urals*. 2021; 3 (70):15–21. (in Russ.)
4. Voslazhova E., Hanazalek Z., Vecherek V., Strakova E., Suchy P. Comparison between laying hen performance in the cage system and the deep litter system on a diet free from animal protein. *Acta Veterinaria Brno*. 2006; 75 (2): 219–225.

5. Vecherek V., Grbalova S., Voslazhova E., Yanachkova B., Malena M. Effects of travel distance and the season of the year on death rates of broilers transported to poultry processing plants. *Poult Sci.* 2006; 85: 1881-1884.

6. Nijdam E., Arens P., Lambooij E., Decuypere E., Stegeman J. Factors influencing bruises and mortality of broilers during catching, transport and lairage. *Poult Sci.* 2004; 83: 1610-1615.

7. Voslazhova E., Yanachkova B., Rubeshova L., Kozak A., Bedashova I., Steinhäuser L., Evener V. Mortality Rates in Poultry Species and Categories during Transport for Slaughter. *Acta Veterinaria Brno.* 2007; 76: 101–108.

8. Korchagin V.A., Rizaeva Yu.N., S.N. Sukhat'erina Theoretical and applied methods of delivery of agricultural products. *The agrarian scientific journal.* 2019; 2: 92-96. (in Russ.)

9. Mongush S.Ch., Choodu O.A., Evtyukov S.A. Modeling of the influence of climatic factors and terrain on the performance of transport and technological machines. *POLYTECHNICAL BULLETIN. Series: Engineering Studies.* 2019; 3 (47):108-111. (in Russ.)

10. Filippova N.A., Vlasov V.M., Belyaev V.M. Navigation Control of Cargo Transportation in the North of Russia. *World of Transport and Transportation.* 2019; 17(4): 218–231. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-4-218-231>

11. Filippova N.A. Scientific ways for solving problems of organizing and planning cargo transportation to the areas of the far north and arctic zones of Russia. *INTELLECT. INNOVATIONS. INVESTMENTS.* 2024; 2: 11-22. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-2-11>

12. Karelina M.Yu., Rizaeva Yu.N., Baev V.V., Pupyshev M.V., Karagodin V.I., Didmanidze O.N. Improving the efficiency of the transport and technological system. *Transport business of Russia.* 2024; 2: 192-196. (in Russ.)

13. Dorofev A.N., Kurganov V.M., Korol A.A., Lim D.Yu., Zakharov Z.Z. Assessment of the reliability of a road carrier in a digital transport platform. *World of transport and technological machines.* 2024; 2-2 (85): 115–122. (in Russ.) DOI:10.33979/2073-7432-2024-2-2(85)-115-122

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

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Грязнов М.В. Научное руководство исследованием, включая формулировку проблемы, ее актуальность, постановку задач, формирование общей схемы проведения и выбор методов исследования, контроль корректности используемой терминологии и полученных результатов, научная редакция статьи и отчетных материалов.

Журавский П.П. Организация производственного эксперимента, выбор средств контроля из-

мерительной информации, автоматизации её сбора и обработки, анализ практической применимости полученных в ходе исследований результатов, апробация предложенных методических рекомендаций в ООО «Урал-Ситно».

Тимофеев Е.А. Анализ научной и нормативно-правовой литературы по изучаемой проблеме, систематизация организационно-технологических особенностей функционирования промышленного птицеводства, координация инструментальных замеров, анализ статистической информации, моделирование зависимостей, расчёт экономического эффекта.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

M.V. Gryaznov Scientific guidance of the research, including formulation of the problem, its relevance, setting of objectives, formation of the general scheme of the research conduction and selection of research methods, monitoring of the used terminology and obtained result correctness, scientific revision of the article and reporting materials.

P.P. Zhuravskiy Organization of the experiment, selection of control means for measuring information, automation of data collection and processing, analysis of practical applicability of the obtained research results, testing of the proposed methodological recommendations in Limited Liability Company "Ural-Sitno".

E.A. Timofeev Analysis of scientific and regulatory literature on the studied problem, systematization of organizational and technological peculiarities of industrial poultry farming functioning, coordination of instrumental measurements, analysis of statistical information, modeling of dependencies, calculation of economic effect.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Грязнов Михаил Владимирович – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Логистика и управление транспортными системами» Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова (455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38), член комиссии (эксперт) Общественного совета Министерства транспорта Российской Федерации".

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3142-1089>,

SPIN-код: 2885-7112,

e-mail: gm-autolab@mail.ru

Журавский Павел Павлович – генеральный директор ООО «Урал-Ситно» (455013, г. Магнитогорск, ул. Лазника, д. 19).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8331-9556>,

e-mail: nfo@sitno.ru

Тимофеев Егор Анатольевич – канд. техн. наук, глава Нагайбакского муниципального района Челябинской области (457650, Нагайбакский муниципальный район, с.п. Фершампенуаз, ул. К. Маркса, д. 53)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6187-5121>,

e-mail: wolf_tea@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail V. Gryaznov – Dr. of Sci. (Eng.), Professor of the Department of Logistics and Management of Transport Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov” (38, Lenin Avenue, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia, 455000), member of the commission (expert) of the Public Council of the Ministry of Transport of the Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3142-1089>,

SPIN-code: 2885-7112,

e-mail: gm-autolab@mail.ru

Pavel P. Zhuravskiy – General Director, Limited Liability Company “Ural-Sitno” (19, Laznika street, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia, 455013).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8331-9556>,

e-mail: nfo@sitno.ru

Egor A. Timofeev – Cand. of Sci. (Eng.), Head of Nagaybak municipal district, Chelyabinsk region (53, Karl Marks Street, Fershampenuaz settlement, Nagaybak municipal district, Chelyabinsk region, Russia, 457650).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6187-5121>,

e-mail: wolf_tea@mail.ru

Научная статья
УДК 629.113
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-434-446>
EDN: WWBXUR



ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ДАВЛЕНИЮ ВОЗДУХА В ШИНАХ АВТОМОБИЛЕЙ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА РОЛИКОВЫХ СТЕНДАХ

А.И. Федотов¹, О.С. Яньков¹, А.В. Камнев² ✉

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

²Братский государственный университет,
г. Братск, Россия
dadestone@yandex.ru

✉ ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Контроль тягово-мощностных параметров колесных транспортных средств часто выполняют на роликовых стендах. Точность определения силы тяги в пятне контакта эластичной шины автомобильного колеса с цилиндрической поверхностью роликов зависит от множества факторов. При заданных характеристиках стендов наиболее значимо на результаты измерения сил влияет давление рабочего тела в шинах, нагрузка на колеса и остаточная высота протектора шин. Эти параметры оказывают существенное влияние на скоростные и силовые потери мощности в шинах.

Для учета силовой и скоростной составляющих потерь мощности в шинах колес при испытании автомобилей была предложена методика, позволяющая в значительной мере уменьшить их влияние на результаты исследований, а также представлены результаты измерений, полученные при испытании автомобилей на роликовом стенде и в дорожных условиях.

Материалы и методы. Для определения силовой составляющей потерь в шине были проведены экспериментальные исследования с целью определения коэффициента сопротивления качению шин по двум кинематически не связанным роликам силового стенда. Учет скоростной составляющей потерь производился путем определения радиуса качения колеса по беговым барабанам стенда и оценки его влияния на результаты измерений тягово-мощностных параметров автомобиля.

Результаты. Результатом проведенных исследований является разработка новой методики испытания тягово-мощностных параметров автомобилей с полным приводом и приводом на одну ось, позволяющая учитывать влияние давления воздуха и остаточной высоты протектора шины на измеренные значения силы тяги на колесах.

Обсуждение и заключение. С учетом предложенной методики измерения сил тяги на ведущих колесах автомобилей категории М1 в условиях роликовых стендов оптимальными с точки зрения влияния силовых и скоростных потерь на результаты измерения тяговых параметров является давление воздуха в шинах, не менее 150% от значений, установленных заводом-изготовителем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: контроль, тяговые и мощностные параметры КТС, коэффициент сопротивления качению, колесо с эластичной шиной, стенд с беговыми барабанами, силовые и скоростные потери в шинах, износ шин, измерение силовых параметров

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность редактору и рецензентам данной статьи.

Статья поступила в редакцию 03.12.2024; одобрена после рецензирования 2025; принята к публикации 16.06.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Федотов А.И., Яньков О.С., Камнев А.В. Обоснование требований к давлению воздуха в шинах автомобилей при испытаниях на роликовых стендах // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 3. С. 434-446. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-434-446>

© Федотов А.И., Яньков О.С., Камнев А.В., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-434-446>

EDN: WWBXUR

JUSTIFICATION OF REQUIREMENTS FOR AIR PRESSURE IN CAR TIRES DURING TESTS ON ROLLER STANDS

Alexandr I. Fedotov¹, Oleg S. Yankov¹, Aleksey V. Kamnev² ✉

¹Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia

²Bratsk State University,
Bratsk, Russia

✉ corresponding author
dadestone@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Traction and power parameter's monitoring of wheeled vehicles are often performed on roller stands. The accuracy of determining the traction force in the contact patch of the elastic tire of an automobile wheel with the cylindrical surface of the rollers depends on many factors. With the specified characteristics of the stands, the working air pressure in the tires, the load applied on the wheels and the residual tread height of the tires most significantly affect the results of measuring forces. These parameters have a considerable impact on the speed and force losses of power in tires.

To take into account the force and speed components of power losses in wheel tires while testing cars, a technique was proposed that allows to reduce their impact on test results considerably, and measurement results obtained by testing cars on the roller stand and in road conditions were presented.

Materials and methods. To determine the force component of losses in a tire, the experimental studies were conducted to define the rolling resistance coefficient of tires on two kinematically unrelated rollers of the power stand. The role of the speed component of losses was specified by determining the rolling radius of the wheel on the running drums of the stand and evaluating its effect on the measurement results of traction and power parameters of the car.

Results and discussion. The result of the conducted research is the development of a new methodology for testing traction and power parameters of vehicles with all-wheel drive and single-axle drive, which allows to take into account the influence of air pressure and the residual height of the tire tread on the measured values of traction force on the wheels.

Conclusion. According to the proposed method for measuring traction forces on the driving wheels of M1 category cars on roller stands, the optimal value in terms of the effect of force and speed losses on the results of measuring traction parameters is the air pressure in tire that is not least then 150% of the values set by the manufacturer.

KEYWORDS: control, traction and force parameters of wheeled vehicles, rolling resistance coefficient, wheel with elastic tire, stand with running drums, force and speed losses in tires, tire wear, measurement of force parameters

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

The article was submitted: December 3, 2024; **approved after reviewing:** April, 2025; **accepted for publication:** June, 16, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Fadeev A.I., Yankov O.S., Kamnev A.V. Justification of requirements for air pressure in car tires during tests on roller stands. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (3): 434-446. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-434-446>

© Fadeev A.I., Yankov O.S., Kamnev A.V., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач при испытании, экспертизе и контроле технического состояния КТС является измерение их тяговых параметров, выполняемых как дорожным, так и стендовым методами. И если для измерений силовых параметров дорожным методом требуются специализированные полигоны и советующие погодные условия, то стендовые методы не требуют наличия значительных площадей, не зависят от погодных условий и позволяют реализовать уникальный принцип обратимости движения, когда автомобиль стоит, а «дорога» под его колесами движется¹.

На результаты измерения тяговой силы F_k на колесах КТС, колесной мощности, а также мощности двигателя $N_{дв}$ автомобиля, значительно влияют два основных вида потерь: потери мощности в трансмиссии, образующиеся в результате работы сил трения и на взбалтывание масла в агрегатах, а также силовые и кинематические потери мощности, связанные с работой шин ведущих колес.

Влияние потерь мощности в шинах ведущих колес можно оценить коэффициентом полезного действия (КПД) шины $\eta_{ш}$, который определяется из выражения (1):

$$\eta_{ш} = \frac{M_k - M_f}{M_k} \cdot \frac{r_k}{r_{к0}}, \quad (1)$$

где M_k – момент, подведенный к колесу, Н·м;
 M_f – момент сопротивления качению, Н·м;
 r_k – радиус качения колеса (учитывающий скоростные потери), м;

$r_{к0}$ – радиус колеса в ведомом режиме «силовой радиус», м.

В первом сомножителе уравнения (1) отражаются силовые (гистерезисные) потери мощности – это потери на трение в шине при её качении (между шиной и дорогой, а также внутри элементов шины) [1].

Во втором сомножителе уравнения (1) – потери мощности, связанные с её проскальзыванием и тангенциальной эластичностью, т.е. учитывают, что число сделанных колесом оборотов и пройденный им путь, которые для колеса с эластичной шиной не соответствуют кинематике качения жесткого тела и проявляются в частичном повороте обода колеса относительно его пятна контакта [1].

Многочисленные исследования^{2,3}[2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11] показывают, что результаты измерения тяговых параметров КТС стендовым методом можно значительно улучшить, если уменьшить влияние силы сопротивления качению F_f шины, величина которой вычитается из измененной на стенде силы тяги F_k на колесе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Факторы, влияющие на результаты измерения тяговых параметров КТС стендовым методом, можно условно разделить на три типа:

- факторы первого типа – это конструктивные параметры стенда. К ним относятся кривизна опорной поверхности беговых барабанов и межосевое расстояние между барабанами;

- факторы второго типа – это факторы технологические, связанные технологией проведения испытаний. К ним относится продольное перемещение КТС по беговым барабанам стенда (вперед – назад);

- факторы третьего типа – это эксплуатационные факторы. К ним относятся давление рабочего тела в шине и высота её протектора (износ шины).

Эксплуатационные факторы в той или иной степени оказывают влияние на силы сопротивления качению эластичных шин автомобильных колес, которая зависит от силовых и скоростных потерь мощности.

¹ Федотов А.И. Основы теории эксплуатационных свойств автомобилей: учебник для аспирантов вузов по направлению подготовки 23.06.01 «Техника и технологии наземного транспорта» / А.И. Федотов; Иркутский национальный исследовательский технический университет. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2016. 254 с.

² Работа автомобильной шины / В.И. Кнороз, Е.В. Кленников, И.П. Петров, А.С. Шелухин, Ю.М. Юрьев. М.: Транспорт, 1976. 238 с.

³ Мамаев А.Н., Балабина Т.А., Гаевский В.В. Механика взаимодействия колеса с барабаном // Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации: материалы 106-й Международной научно-технической конференции. 2019. С.333–345.

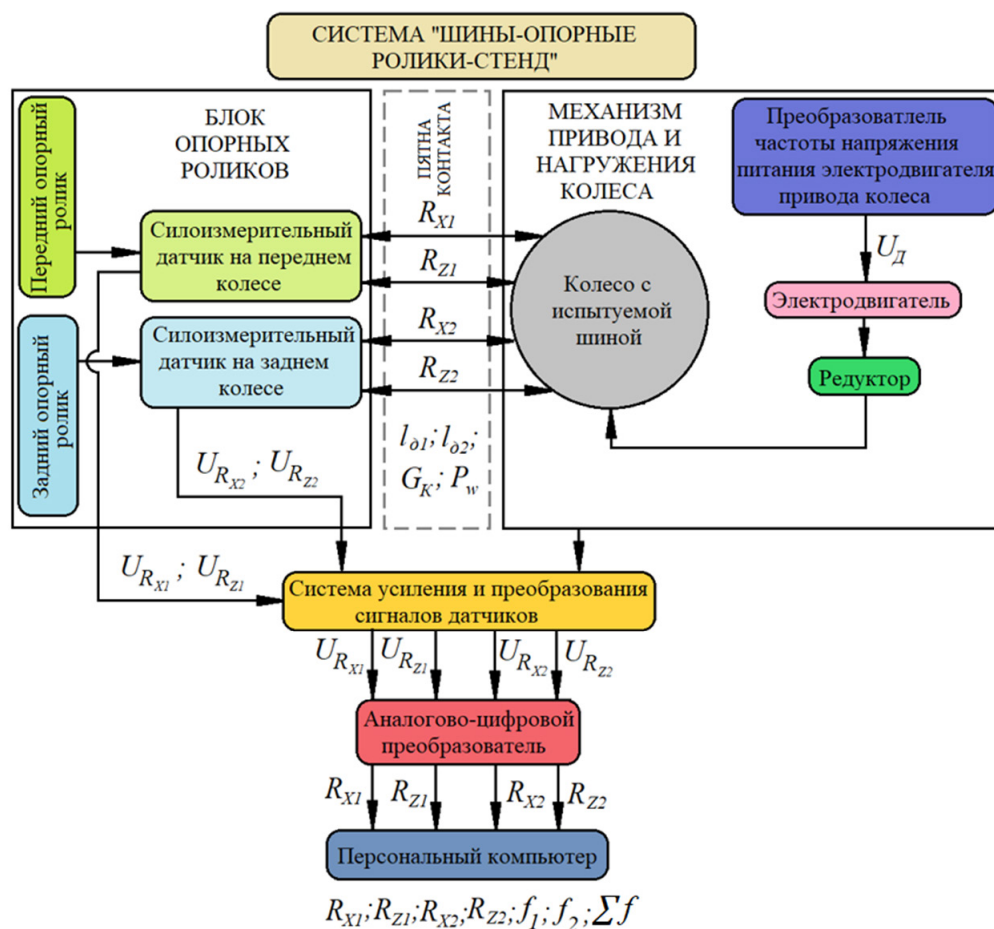


Рисунок 1 – Структурная схема комплекса для экспериментального исследования процесса движения автомобильного колеса с эластичной шиной на двух кинематически несвязанных цилиндрических роликах стенда
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Structural diagram of the complex for experimental study of the movement process of the car wheel with an elastic tire on two kinematically unrelated cylindrical rollers of the stand.
Source: compiled by the authors.

На кафедре автомобильного транспорта ИрННТУ были проведены исследования силовых⁴ [8] и скоростных [2] потерь в мощности в эластичной шине с учетом влияния эксплуатационных факторов.

Для экспериментальных исследований зависимости коэффициента сопротивления качению шин от приложенной к колесу нагрузки с учетом давления воздуха в шине были проведены исследования в ИрННТУ в лаборатории кафедры АТ на стенде, позволяющем измерять силы в пятне контакта шины с беговыми бара-

банами [8]. Стенд представляет собой несущую систему, состоящую из совокупности жестких конструкций крепления механизмов привода колеса, самого колеса, опорных роликов, привода опорных роликов. Структурная схема данного стенда представлена на рисунке 1.

Перед проведением экспериментов была сделана калибровка датчиков стенда согласно методики и предложена программа проводимых экспериментов. Были проведены исследования двух шин Bridgestone 185/65 R14 с различной остаточной высотой протектора 3 и 8 мм.

⁴ Камнев А.В., Федотов А.И., Яньков О.С. Влияние давления рабочего тела в шине на силу сопротивления качению КТС на стендах с беговыми барабанами // 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. 86–92.

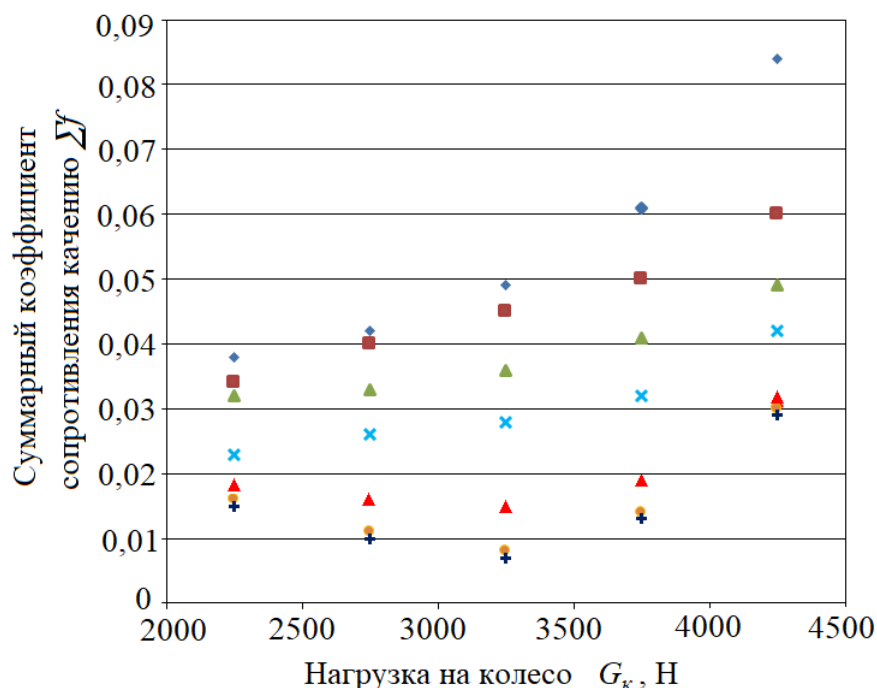


Рисунок 2 – График зависимости коэффициента сопротивления качению шины от нагрузки и давления воздуха в шине: ♦ – 0,05 МПа; ■ – 0,1 МПа; ▲ – 0,15 МПа; × – 0,2 МПа; ▲ – 0,25 МПа; ● – 0,3 МПа; + – 0,35 МПа.
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Graph of the dependence of the tire rolling resistance coefficient on the tire load and air pressure in it. ♦ – 0,05 MPa; ■ – 0,1 MPa; ▲ – 0,15 MPa; × – 0,2 MPa; ▲ – 0,25 MPa; ● – 0,3 MPa; + – 0,35 MPa.
Source: compiled by the authors.

Нормальная нагрузка на колесо создавалась дискретно в интервале от 2250 Н до 4250 Н с шагом 500 Н при помощи специальных грузов, устанавливаемых на раму нагружения. Кроме этого, в каждом цикле испытаний дискретно изменялось давление рабочего тела в шине от 0,05 МПа до 0,35 МПа с интервалом 0,05 МПа. Давление воздуха в шине определялось при помощи образцового манометра.

В результате были получены эпюры распределения нормальной и касательной реакции шины по длине пятна контакта при качении шин по опорным роликам стенда при варьировании нормальной нагрузки на колесо и давления рабочего тела в шине [8].

По результатам исследований была определена зависимость коэффициента сопротивления качению шины от нагрузки для шины модели Bridgestone 185/65 R14, представленная на рисунке 2.

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что:

- с ростом нагрузки на колесо и снижении

давления рабочего тела в шине потери в шине растут, при этом измеренные значения сил на колесах уменьшаются [4];

- «силовой» радиус качения колеса в ведомом режиме $r_{ко}$ учитывает скоростные потери в шине, обусловленные угловым смещением обода колеса относительно пятна контакта шины [9];

- наиболее частое рекомендуемое заводом-изготовителем давление рабочего тела в шинах для КТС категории М1 составляет 0,2 МПа при его эксплуатации по плоской опорной поверхности, но при диагностировании автомобиля на роликовых стендах рекомендуемое давление приводит к значительным силовым потерям в шине, а минимальные потери при качении колес по роликам наблюдаются при повышении давления до 0,3 МПа, что установлено и экспериментально подтверждено [8].

В результате проведенных исследований была предложена новая методика, позволяющая минимизировать влияние скоростных и силовых потерь в шинах испытуемых авто-

мобилей на роликовых стендах на результаты измерения тяговых и мощностных параметров автомобиля при испытаниях на стендах с беговыми барабанами.

Методика испытаний КТС на стендах с беговыми барабанами, при качении каждого колеса по двум кинематически не связанным между собой опорным роликам, может быть реализована при следующих требованиях к стендам:

1. Обеспечение синхронного вращения всех опорных роликов стенда под каждым колесом ведущей оси (осей) испытуемого КТС.

2. Наличие у стенда нагружающего устройства, позволяющего подводить тормозной момент к колесам ведущей оси (осей).

3. Возможность подведения крутящего момента для вращения колес ведущей оси (осей) КТС для их качения в ведущем режиме.

4. Возможность изменения колесной базы стенда при испытаниях полноприводных автомобилей.

5. Возможность непрерывного измерения силовых и кинематических параметров на ведущих колесах автомобилей в процессе их контроля на силовых роликовых стендах.

Для реализации методики были обоснованы требования к измерительным системам стендов и их метрологическому обеспечению:

- измерение нагрузки на колеса ведущей оси (осей) автомобиля $G_{ки}$ должно осуществляться с погрешностью не более 0,5 Н;

- измерение давления P_w рабочего тела в эластичных шинах должно проходить с погрешностью не более 0,01 МПа;

- измерение угловой скорости ω_k вращения колес ведущих осей на беговых барабанах должно выполняться с погрешностью не более 1% [1/с];

- измерение угловой скорости ω_e вращения коленчатого вала двигателя КТС должно осуществляться с погрешностью не более 1% [1/с];

- измерение угловой скорости ω_6 вращения опорных роликов должно совершаться с погрешностью не более 1% [1/с];

- определение силы F_k тяги на ведущих колесах автомобиля должно выполняться с погрешностью не более 1%, Н;

- определение силы F_f сопротивления качению шин колес ведущей оси должно осуществляться с погрешностью не более 1%, Н.

Все измерительные системы и оборудование, используемые при измерении силовых и кинематических параметров, характеризующих тяговые качества КТС на стендах с беговыми барабанами, должны быть проверены согласно ГОСТ Р.

Для проверки корректности разработанной методики был выполнен анализ скоростных и силовых потерь в шинах и определено их влияние на результаты измерения тяговых параметров автомобилей на роликовых стендах.

Для учета скоростной составляющей потерь необходимо знать значение радиуса качения $r_{ко}$ с эластичной шиной в ведомом режиме [2, 5, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]. Его можно определить по известной формуле⁵ [5, 12, 13]:

$$r_{ко} = \frac{\omega_6 \cdot r_6}{\omega_k}, \quad (2)$$

где ω_k – угловая скорость колеса [1/с];

ω_6 – угловая скорость роликов стенда [1/с];

r_6 – радиус опорного ролика стенда, м.

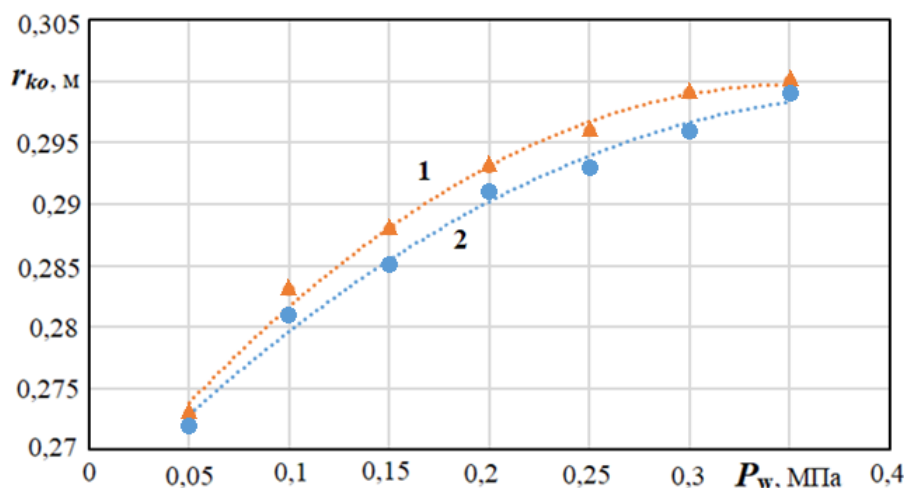
Определение радиусов качения $r_{ко}$ в ведомом режиме производили для двух шин одной модели *Bridgestone 185/65 R14*, но с двумя состояниями остаточной высоты протектора: 8 и 3 мм. Давление P_w рабочего тела в шинах при измерении $r_{ко}$ варьировали в диапазоне от 0,05 МПа до 0,35 МПа с шагом 0,05 МПа. Нормальная нагрузка G_k на колесо в процессе измерений радиуса составляла 3250 Н. Результаты измерений радиусов $r_{ко}$ на стенде при варьировании давления P_w в шинах с разной высотой протектора представлены на графике (рисунок 3).

Для шины *Bridgestone 185/65 R14* с высотой протектора 8 мм устанавливаемые значения давлений P_w воздуха представлены в столбце 1 таблицы 1. Значения радиуса качения $r_{ко}$ в ведомом режиме представлены в столбце 2 таблицы 1.

Для шины *Bridgestone 185/65 R14*, но с высотой протектора 3 мм, результаты аналогичных измерений приведены в таблице 2.

Для учета силовых потерь в шинах было выполнено измерение коэффициента f сопротивления качению. Как уже было отмечено ранее, нормальная нагрузка G_k на колеса в течение данного эксперимента составляла 3250 Н, а давление P_w рабочего тела в шинах при измерении $r_{ко}$ варьировало от 0,05 МПа до 0,35 МПа с шагом 0,05 МПа.

⁵ Работа автомобильной шины / Кнороз В.И., Кленников Е.В., Петров И.П., Шелухин А.С., Юрьев Ю.М. М.: Транспорт, 1976. 238 с.



$$1 - r_{ko} = -0,281 \cdot P_w^2 + 0,1988 \cdot P_w + 0,2646; R^2 = 0,994;$$

$$2 - r_{ko} = -0,2048 \cdot P_w^2 + 0,1669 \cdot P_w + 0,265; R^2 = 0,99.$$

Рисунок 3 – Графики зависимости силового радиуса колеса (радиуса качения в ведомом режиме) с шиной модели Bridgestone 185/65 R14 от давления воздуха в ней, при нормальной нагрузке $G_k = 3250$ Н: для шины с остаточной высотой протектора 3 мм ● – эксперимент; – аппроксимация; для шины с остаточной высотой протектора 8 мм ▲ – эксперимент; – аппроксимация
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Graphs of the dependence of the wheel's force radius (rolling radius in a drive mode) for the Bridgestone 185/65 R14 tire model on the air pressure in it, at normal load $G_k = 3250$ N: for a tire with a residual tread height of 3 mm ● – experiment; – approximation; for a tire with a residual tread height of 8 mm ▲ – experiment; – approximation.
Source: compiled by the authors.

Определенные коэффициенты f сопротивления качению шины с высотой протектора 8 мм представлены в столбце 3 таблицы 1, а для шины с высотой протектора 3 мм – в столбце 3 таблицы 2.

На следующем этапе исследования определили суммарное значение сил ΣF_f сопротивления качению шин автомобиля в режиме их прокручивания. Для шин с высотой протектора шины 8 мм и приводом на одну ось (4×2), силы ΣF_f представлены в столбце 4 таблицы 1,

а для полноприводного автомобиля (4×4) – в столбце 5. Для шин с высотой протектора 3 мм в аналогичных столбцах таблицы 2.

Зная величину подведенного к ведущим колесам КТС крутящего момента M_k , можно определить величину силы тяги $\Sigma F_{k(подв)}$, подведенной к его ведущим колесам, используя известное выражение,⁶

$$\Sigma F_{k(подв)} = \frac{\Sigma M_k}{r_{ko}}, \quad (3)$$

⁶ Фалькевич Б.С. Теория автомобиля. М.: Машгиз, 1963. 239 с.

Таблица 1

Результаты реализации разработанной методики измерения тяговых параметров автомобиля с шинами Bridgestone 185/65 R14 с высотой протектора 8 мм с учетом потерь в шинах

Источник: составлено авторами.

Table 1

Implementation results of the developed methodology for measuring the traction parameters of the car with the Bridgestone 185/65 R14 tires with a tread height of 8 mm, taking into account losses in tires

Source: compiled by the authors.

Давление воздуха в шине, МПа	Силовой радиус колеса, м	Коэффициент сопротивления качению	Сила сопротивления качению для КТС, Н		Сила тяги на колесах			Потери силы тяги, □, □ %	
			ΣF_{fj} (4×2)	ΣF_{fj} (4×4)	подведенная к колесам, Н $\Sigma F_{k(подв)}$	измеренная на стенде, Н $\Sigma F_{k(изм)}$ (4×2)	$\Sigma F_{k(изм)}$ (4×4)	(4×2)	(4×4)
P_w	r_{ko}	f	4	5	6	7	8	9	10
0,05	0,273	0,049	318	637	1477	1159	839	21,5	43,2
0,1	0,283	0,045	292	585	1435	1142	839	20,4	41,1
0,15	0,288	0,036	234	468	1400	1166	931	16,7	33,4
0,2	0,293	0,028	182	364	1376	1194	1011	13,2	26,5
0,25	0,296	0,019	123	247	1362	1239	1114	9,1	18,1
0,3	0,299	0,008	52	104	1348	1296	1244	3,9	7,7
0,35	0,3	0,007	46	91	1344	1298	1252	3,4	6,8

Таблица 2

Результаты реализации разработанной методики измерения тяговых параметров автомобиля с шинами Bridgestone 185/65 R14 с высотой протектора 3 мм с учетом потерь в шинах

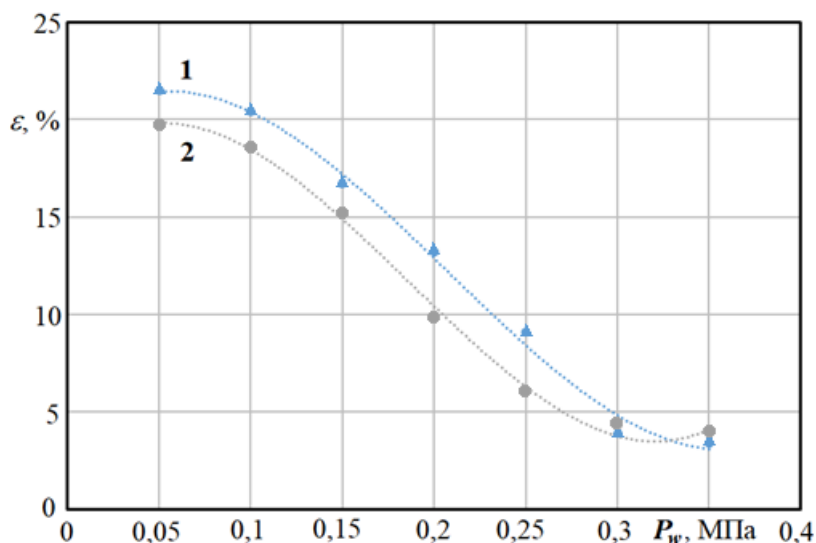
Источник: составлено авторами.

Table 2

The results of the implementation of the developed methodology for measuring the traction parameters of the car with Bridgestone 185/65 R14 tires with a tread height of 3 mm, taking into account losses in tires

Source: compiled by the authors.

Давление воздуха в шине, МПа	Силовой радиус колеса, м	Коэффициент сопротивления качению	Сила сопротивления качению для КТС, Н		Сила тяги на колесах			Потери силы тяги, □, □ %	
			ΣF_{fj} (4×2)	ΣF_{fj} (4×4)	подведенная к колесам, Н $\Sigma F_{k(подв)}$	измеренная на стенде, Н $\Sigma F_{k(изм)}$ (4×2)	$\Sigma F_{k(изм)}$ (4×4)	(4×2)	(4×4)
P_w	r_{ko}	f	4	5	6	7	8	9	10
0,05	0,272	0,045	293	585	1482	1189	897	19,7	39,5
0,1	0,281	0,041	267	533	1434	1168	901	18,6	37,2
0,15	0,285	0,033	215	429	1414	1200	985	15,2	30,3
0,2	0,291	0,021	137	273	1385	1248	1112	9,9	19,7
0,25	0,293	0,013	85	169	1375	1291	1206	6,1	12,3
0,3	0,296	0,009	59	117	1361	1303	1244	4,3	8,6
0,35	0,299	0,008	52	104	1348	1296	1244	3,9	7,7



$$1 - \epsilon = 1333,3 \cdot P_w^3 - 827,1 \cdot P_w^2 + 79,7 \cdot P_w + 19,3; R^2 = 0,994;$$

$$2 - \epsilon = 1688,9 \cdot P_w^3 - 944,2 \cdot P_w^2 + 84,706 \cdot P_w + 17,7; R^2 = 0,997.$$

Рисунок 4 – График зависимости потерь силы тяги на сопротивление качению шин Bridgestone 185/65 R14 автомобиля с приводом на одну ось (4x2) от давления воздуха в них, при испытаниях на роликовых стендах: для высоты протектора шины 8 мм ▲ – эксперимент; – аппроксимация; для высоты протектора 3 мм ● – эксперимент; – аппроксимация. Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Graph of the dependence of the loss of traction force on the rolling resistance of Bridgestone 185/65 R14 tires of the car with a single-axle drive (4x2) on the air pressure in them, while testing on the roller stands: for a tire tread height of 8 mm ▲ – experiment; – approximation; for tread height of 3 mm ● – experiment; – approximation. Source: compiled by the authors.

При подведении к ведущим колесам момента ΣM_k , равного 403 Н·м, при нормальной нагрузке на колесо $G_k = 3250$ Н и варьировании давления воздуха в шинах, были получены значения силы тяги $\Sigma F_{k(\text{подв})}$, подведенной к ведущим колесам автомобиля, представленные в столбце 6 таблиц 1 и 2.

Если же подведенный к ведущим колесам КТС момент M_k неизвестен, то согласно классической теории автомобиля суммарная сила тяги, подведенная к этим колесам $\Sigma F_{k(\text{подв})}$, может быть определена согласно выражению

$$\Sigma F_{k(\text{подв})} = \Sigma F_{ki(\text{изм})} + \Sigma F_{fj}, \quad (4)$$

где $\Sigma F_{k(\text{подв})}$ – сила тяги, подведенная к ведущим колесам автомобиля, Н;

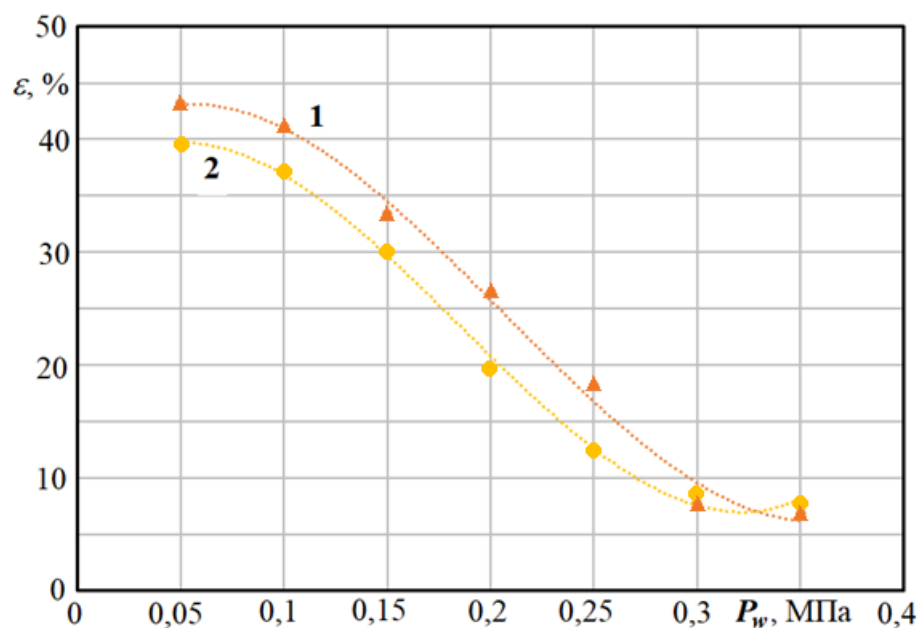
$\Sigma F_{ki(\text{изм})}$ – сила тяги, измеренная на ведущих колесах автомобиля, Н;

ΣF_{fj} – сила сопротивления качению, Н.

Подставив в выражение (4) значения измеренной силы тяги $F_{ki(\text{изм})}$ и сил сопротивления

качению ΣF_{fj} , определяли значения силы тяги $\Sigma F_{k(\text{подв})}$, подведенной к ведущим колесам КТС. Для автомобиля с высотой протектора шин 8 мм и приводом на одну ось (4 × 2) значения этого параметра представлены в столбце 7, а для полноприводного автомобиля (4 × 4) в 8-м столбце таблицы 1. Для автомобилей с шинами, имеющими высоту протектора 3 мм, эти результаты вынесены в аналогичные столбцы таблицы 2.

В столбце 9 таблицы 1 показаны значения измеренных на стенде потерь силы тяги на сопротивление качению колес с эластичными шинами по роликам стенда в % для автомобиля с приводом на одну ось (4 × 2). В столбце 10 – потери силы тяги для полноприводного автомобиля (4 × 4) для шин с остаточной высотой протектора 8 мм. В таблице 2 приведены результаты потерь силы тяги на ведущих колесах автомобиля с шинами, имеющими остаточную высоту протектора 3 мм.



$$1 - \epsilon = 2733,3 \cdot P_w^3 - 1690 \cdot P_w^2 + 163,5 \cdot P_w + 38,7; R^2 = 0,994;$$

$$2 - \epsilon = 3288,9 \cdot P_w^3 - 1833,3 \cdot P_w^2 + 159,2 \cdot P_w + 35,9; R^2 = 0,997.$$

Рисунок 5 – График зависимости потерь силы тяги на сопротивление качению шин Bridgestone 185/65 R14 автомобиля с полным приводом (4 x 4) от давления воздуха в них, при испытаниях на роликовых стендах: для высоты протектора шины 8 мм ▲ – эксперимент; – аппроксимация; для высоты протектора 3 мм ● – эксперимент; – аппроксимация
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Graph of the dependence of the loss of traction on the rolling resistance of Bridgestone 185/65 R14 tires of the car with all-wheel drive (4x4) on the air pressure in them, when tested on roller stands: for a tire tread height of 8 mm ▲ – experiment; – approximation; for tread heights of 3 mm ● – experiment; – approximation.
Source: compiled by the authors.

По результатам расчета был построен график (рисунок 4) зависимости потерь силы тяги на сопротивление качению колес с эластичными шинами по роликам стенда автомобиля с приводом на одну ось, от давления рабочего тела в шине, при испытании на роликовом стенде. Аналогичный график получен для автомобиля с полным приводом (4 × 4). Он представлен на рисунке 5.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Из графиков (см. рисунки 2 и 3) видно, что с увеличением давления воздуха в шине влияние остаточной высоты протектора на потери силы тяги при качении по цилиндрическим роликам стендах значительно снижается. Влияние остаточной высоты протектора на силовые потери в шине минимальны при высоком

давлении воздуха в шине, 0,30 МПа и более.

Анализируя полученные результаты, можно наблюдать следующее: при нормативной величине давления воздуха в шинах КТС, равном 0,2 МПа, потери силы тяги на сопротивление качению шины по роликам стенда, для автомобиля с приводом на одну ось (4x2), снижаются с 13,2% (для остаточной высоты протектора 8 мм) до 9,9% (при высоте протектора 3 мм), что составляет изменение на 3,3%.

При давлении воздуха в шине 0,3 МПа эти потери значительно меньше. Они составляют 3,9% – для автомобилей с шинами, имеющими остаточную высоту протектора 8 мм, а для автомобилей с шинами, имеющими остаточную высоту протектора 3 мм потери на сопротивление качению шин составляют 4,3%. Изменение потерь в данном случае составляет 0,4%.

Наблюдая такие изменения, можно сказать, что при повышении давления до 0,3 МПа на данном типе шин влияние остаточной высоты протектора на потери силы тяги при испытаниях на роликовых стендах КТС можно минимизировать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования показывают, что давление рабочего тела в эластичных шинах значительно влияет на результаты измерений параметров тяговых свойств автомобилей при их испытаниях на роликовых стендах.

В зависимости от износа шин величина потерь силы тяги на сопротивление качению шин автомобилей категории М1 на роликовых стендах, при наиболее распространённом значении давления рабочего тела в шине, равного 0,2 МПа, составляет $9,9 \div 13,2\%$ – у автомобилей с колесной формулой 4×2 , а у автомобилей с колесной формулой 4×4 находится в интервале $19,7 \div 26,5\%$.

В зависимости от износа шин КТС категории М1 повышение давления рабочего тела в шине до 0,3 МПа (что составляет 150% от нормы) только на период диагностики на роликовом стенде позволяет уменьшить величину потерь силы тяги, затрачиваемую на сопротивление качению шин по опорной поверхности роликов на $3,9 \div 4,3\%$ – у автомобилей с колесной формулой 4×2 , а для полноприводного автомобиля с колесной формулой 4×4 на $7,7 \div 8,6\%$.

Увеличение давления рабочего тела в шине свыше 0,3 МПа не приводит к дальнейшему значительному снижению потерь силы тяги на сопротивление качению шин при измерении тяговых параметров КТС на роликовом стенде и, согласно результатам проведенных исследований, оптимальным давлением является давление, равное 150% от значений, установленных заводом-изготовителем.

Следует помнить, что все рекомендации по повышению давления рабочего тела в шине нужно соблюдать только на период диагностирования автомобиля на роликовом стенде, а по окончании диагностики, для дальнейшей эксплуатации КТС на дороге, давление в шине необходимо привести в норму, рекомендованную заводом-изготовителем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федотов А.И., Власов В.Г., Кривцов С.Н. Расчет скоростных потерь в шинах автомобиля в условиях эксплуатации // Автомобильная промышленность. 2012. № 9. С. 16–19.
2. Федотов А.И., Яньков О.С., Камнев А.В. О силовом радиусе колеса с эластичной шиной // Труды НАМИ. 2022. № 1(288). С. 52–60. DOI: <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2022-1-52-60>
3. Котиев Г.О., Горелов В.А., Захаров А.Ю. Исследование динамики колесных машин на стенде с беговыми барабанами // Автомобильная промышленность. 2014. № 7. С. 9–12.
4. Балабина Т.А., Карелина М.Ю., Мамаев А.Н. Теоретические основы испытаний шин и трехосных полноприводных автомобилей на барабанных стендах: монография. М.: МАДИ, 2020. 76 с.
5. Дик А.Б. О радиусе эластичного колеса // Автомобильная промышленность. 2010. № 10. С. 21–30.
6. Мамаев А.Н., Арбузов В.И. Качение эластичного колеса по двум жестким барабанам // Автомобильная промышленность. 2012. № 10. С. 19.
7. Федотов А.И., Власов В.Г., Яньков О.С., Камнев А.В. Расчет силы сопротивления качению эластичной шины по цилиндрическим поверхностям беговых барабанов стенда // Автомобильная промышленность. 2022. № 11. С. 26–31.
8. Камнев А.В., Федотов А.И., Яньков О.С. Влияние давления воздуха в шинах на силовые потери при качении колес автомобиля по опорным роликам стенда // Автомобильная промышленность. 2022. № 10. С. 28–32.
9. Федотов А.И., Бойко А.В., Яньков О.С., Марков А.С. Экспериментальное исследование радиуса качения колеса в ведомом режиме на роликовом стенде // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 1(108). С. 152–157.
10. Кривошапов С.И. Влияние конструкции стенда с беговыми барабанами на коэффициент сопротивления качению колеса автомобиля // Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. 2014. № 4. С. 36–42.
11. Карабцев В.С. Методика определения коэффициентов аэродинамического сопротивления и сопротивления качению шин автопоезда в режиме выбега // Механика машин, механизмов и материалов. 2024. № 3(68). С. 21–27. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-3-68-21-27>
12. Pacejka H., Besselink I., Schmeitz A.J.C. An improved Magic Formula/Swift tyre model that can handle inflation pressure changes // Vehicle System Dynamics. 2010. 48 (sup1): 337–352. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423111003748088>.
13. Pasterkamp W.R., Pacejka H.B. The Tyre as a Sensor to Estimate Friction // Vehicle System Dynamics. 1997. No. 7, 27 (5). P. 409–422. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423119708969339>.
14. Клименко В.И., Шуклинов С.Н., Леонтьев Д.Н., Губин А.В. Анализ методов определения коэффициента сопротивления качению колёс автомобиля // Автомобильный транспорт (Харьков). 2020. № 46. С. 33–39. DOI: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2020.46.0.33>
15. Мамаев А.Н., Карелина М.Ю., Балабин А.О. Качение эластичного колеса по жесткой поверхности

сти // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2024. № 1(76). С. 67–75.

16. Копотилов В.И. О физическом смысле коэффициента сопротивления качению ведущего колеса автомобиля // Автомобильная промышленность. 2013. № 1. С. 20–23.

17. Balabina T.A., Simonov D.S., Rogov V.R. [et al.] Determination of Power and Kinematic Wheel Parameters when Rolling against a Drum // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019, Cholpon-Ata, Vol. 832. BRISTOL: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012077. DOI 10.1088/1757-899X/832/1/012077.

REFERENCES

1. Fedotov A.I., Vlasov V.G., Krivtsov S.N. Calculating of high-speed losses of automobile tires in exploitation conditions. *Avtomobilnaya promyshlennost'*. 2012; 9: 16-19. (in Russ.)

2. Fedotov A.I., Yan'kov O.S., Kamnev A.V. On the issue of the wheel power radius with an elastic tire. *Trudy NAMI*. 2022; (1): 52-60. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2022-1-52-60>

3. Kotiev G.O., Gorelov V.A., Zakharov A.Yu. Research of dynamics wheeled vehicles on the stand "roller". *Avtomobilnaya promyshlennost'*. 2014; 7: 9-12. (in Russ.)

4. Balabina T.A., Karelina M.Y., Mamaev A.N. *Theoretical foundations of tire testing and three-axle four-wheel drive vehicles on drum stands: monograph*. Moscow: MADI, 2020: 76. (in Russ.)

5. Dick A.B. On the radius of an elastic wheel. *Avtomobilnaya promyshlennost'*. 2010; 10: 21-30. (in Russ.)

6. Mamaev A.N., Arbuzov V.I. Rolling of elastic wheel on two hard drums. *Avtomobilnaya promyshlennost'*. 2012; 10: 19. (in Russ.)

7. Fedotov A.I., Vlasov V.G., Yankov O.S., Kamnev A.V. Calculation of the rolling resistance force of an elastic tire on the cylindrical surfaces of the running drums of the stand. *Avtomobilnaya promyshlennost'*. 2022; 11: 26-31. (in Russ.)

8. Kamnev A.V., Fedotov A.I., Yankov O.S. The effect of tire air pressure on power losses when the car wheels are rolling on the support rollers of the stand. *Avtomobilnaya promyshlennost'*. 2022; 10: 28-32. (in Russ.)

9. Fedotov A.I., Boyko A.V., Yankov O.S., Markov A.S. Experimental study of the wheel rolling radius in a slave mode on a roller test bench. «Proceedings of Irkutsk State Technical University» (*Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*). 2016; 1(108): 152-157. (in Russ.)

10. Krivoshapov S.I., The influence of the design of a stand with running drums on the coefficient of rolling resistance of a car wheel. *Vestnik Doneckoj akademii avtomobil'nogo transporta*. 2014; 4: 36-42. (in Russ.)

11. Karabtsev V.S. Methodology for determining the coefficients of aerodynamic drag and rolling resistance of road train tires in coasting mode. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. 2024; 3(68): 21-27. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-3-68-21-27>

12. Pacejka H., Besselink I., Schmeitz A.J.C. An improved Magic Formula/Swift tyre model that can handle inflation pressure changes. *Vehicle System Dynamics*. 2010; 48 (sup1): 337–352. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423111003748088>

13. Pasterkamp W.R., Pacejka H.B. The Tyre as a Sensor to Estimate Friction. *Vehicle System Dynamics*. 1997; 7, 27 (5): 409–422. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423119708969339>.

14. Klimenko V.I., Shuklinov S.N., Leontiev D.N., Gubin A.V. Analysing the methods for determining coefficient of resistance to car wheels rolling. *Automobile transport (Kharkov)*. 2020; 46: 33-39. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2020.46.0.33>

15. Mamaev A.N., Karelina M.Y., Balabin A.O. Rolling of an elastic wheel on a hard surface. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*. 2024; 1(76): 67-75. (In Russ.)

16. Kopotilov V.I. On the physical meaning of the coefficient of rolling resistance of the driving wheel of a car. *Avtomobilnaya promyshlennost'*. 2013; 1: 20-23. (In Russ.)

17. Balabina T.A., Simonov D.S., Rogov V.R. [et al.] Determination of Power and Kinematic Wheel Parameters when Rolling against a Drum. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019, Cholpon-Ata, November 01, 2019. Vol. 832. BRISTOL: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012077. DOI 10.1088/1757-899X/832/1/012077.

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.

Камнев А.В. Оформление рисунков и описание их, подготовка текста статьи, выполнение экспериментальных и аналитических исследований.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

A.I. Fedotov Scientific supervising, consulting, writing the manuscript.

O.S. Yankov General organization, development of the experimental methods, research data processing and analysis, text writing.

A.V. Kamnev Design of graphs and diagrams and its description, writing the manuscript, experiment performance, 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

Камнев Алексей Васильевич – старший преподаватель кафедры «Машиностроения и транспорта» Братского государственного университета (665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40).

ORCID: 0009-0001-6053-9441,
SPIN-код: 5248-2430,
e-mail: dadestone@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander I. Fedotov – Dr. of Sci. (Eng.), Professor, Head of the Automobile Transport Department, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov Street, Irkutsk, 664074).

ORCID: 0009-0002-8329-6785,
SPIN-code: 1342-4073,
Scopus Author ID: 56341065000,
Researcher ID: AAZ-7059-2021,
e-mail: fai.abs@yandex.ru

Oleg S. Yankov – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Automobile Transport Department, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov Street, Irkutsk, 664074).

ORCID: 0000-0001-6709-4820,
SPIN-code: 3127-7106,
Scopus Author ID: 57212165852,
Researcher ID: AAG-5898-2022,
e-mail: yos913005@mail.ru

Aleksey V. Kamnev – Senior Lecturer, Machine Building and Transport Department, Bratsk State University (40, Makarenko Street, Bratsk, 665730).

ORCID: 0009-0001-6053-9441,
SPIN-code: 5248-2430,
e-mail: dadestone@yandex.ru

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Научная статья
 УДК 691:666.952.1
 DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-448-459>
 EDN: WJQTGA



РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ МИНЕРАЛЬНЫМИ И ПЛАСТИФИЦИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ

В.С. Лесовик, Д.А. Толыпин ✉, А.Н. Ряпухин

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

✉ ответственный автор
 tolypin.daniil@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. На практике требуется получение смесей равной удобоукладываемости, оцениваемой стандартными техническими показателями (осадка конуса, расплыв и др.), но в то же время с различными реологическими характеристиками. Эффективно снижают предел текучести и вязкость добавки-разжижители, однако влияние минеральных добавок в комбинации с органическими ПАВ на реологические показатели цементных дисперсий мало изучено. Работа посвящена исследованию данного вопроса.

Материалы и методы. Использовали тонкодисперсные кварц ($S_{y0}=340 \text{ м}^2/\text{кг}$) и мрамор ($S_{y0}=320 \text{ м}^2/\text{кг}$), полученные помолотом в лабораторной мельнице; вяжущее ЦЕМ I 42,5 Н ЗАО «Осколцемент» ($t_{н.схв}=230 \text{ мин}$; $НГ=26\%$, $C_3S=61,59\%$, $C_2S=14,2\%$, $C_3A=6,83\%$, $C_4AF=3,73\%$); суперпластификатор «Полипласт СП-1», гиперпластификатор Sunbo 2021. Реологические показатели цементных дисперсий определяли при малых градиентах скорости сдвига $\dot{\epsilon}$ до 25 с^{-1} , что позволяет обеспечить подобие потока в лабораторных и в реальных условиях.

Результаты. Установлено, что чистые и смешанные цементные дисперсии без добавок-разжижителей являются реологически сложными телами с наибольшим предельным напряжением сдвига и пластической вязкостью. Минеральные модификаторы в комбинации с пластифицирующими добавками эффективно снижают пластическую вязкость и напряжение сдвига, их течение переходит в режим ньютоновской жидкости с вязкостью, не зависящей от градиента скорости сдвига. Реологические показатели бездобавочных смешанных цементных дисперсий зависели от вида минерального наполнителя. При этом с вводом добавок-разжижителей преобладающее влияние на реологические показатели оказывают дозировки и химическая основа добавок.

Заключение. Смешанные цементно-мраморные и цементно-кварцевые дисперсии с вводом добавок разжижающего действия характеризуются более высокой текучестью, чем чисто цементные. Введение пластифицирующих добавок при определенных дозировках позволяет полностью снимать нелинейность, а ввод минеральных наполнителей усиливает эффективность действия ПАВ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цементные системы, минеральный наполнитель, пластификатор, предел текучести, пластическая вязкость, реологические свойства

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. В.С.Лесовик – член редакционного совета журнала «Вестник СибАДИ». Журнал «Вестник СибАДИ» не освобождает от рецензирования рукописи ученых вне зависимости от их статуса.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект №25-19-00866). Авторы выражают благодарность редакции журнала «Вестник СибАДИ» и рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 17.01.2025; одобрена после рецензирования 17.02.2025; принята к публикации 16.06.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Лесовик В.С., Толыпин Д.А., Ряпухин А.Н., 2025



Контент доступен под лицензией
 Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Лесовик В.С., Толыпин Д.А., Ряпухин А.Н. Реологические свойства цементных систем, модифицированных минеральными и пластифицирующими добавками // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 3. С. 448-459. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-448-459>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-448-459>

EDN: WJQTGA

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF CEMENT SYSTEMS MODIFIED WITH MINERAL AND PLASTICIZING ADDITIVES

Valery S. Lesovik, Daniil A. Tolypin ✉, Alexander N. Ryapukhin

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

✉ corresponding author
tolypin.daniil@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. In practice, it is required to obtain mixtures both of equal workability, estimated by standard technical indicators (cone sediment, spreading, etc.) and of different rheological characteristics. Diluent additives effectively reduce the yield strength and viscosity, however, the effect of mineral additives in combination with organic surfactants on the rheological parameters of cement dispersions has been poorly studied. The paper is devoted to the study of this issue.

Research methods. Finely dispersed quartz ($S_{ud}=340 \text{ m}^2/\text{kg}$) and marble ($S_{ud}=320 \text{ m}^2/\text{kg}$) obtained by grinding in a laboratory mill were used; binder CEM I 42.5 H of Oskolcement CJSC ($t_{n,cw}=230 \text{ min}$; HF=26 %, C3S=61,59 %, C2S=14,2 %, C3A=6,83 %, C4AF=3,73 %); superplasticizer Polyplast SP-1, hyperplasticizer Sunbo 2021. Rheological parameters of cement dispersions were determined at low shear rate gradients $\dot{\epsilon}$ up to 25 sec^{-1} , which makes it possible to ensure the similarity of flow in laboratory and real conditions.

Results. It has been established that pure and mixed cement dispersions without diluent additives are rheologically complex bodies with the highest shear stress and plastic viscosity. Mineral modifiers in combination with plasticizing additives effectively reduce plastic viscosity and shear stress, and their flow transitions to the Newtonian fluid regime with a viscosity independent of the shear rate gradient. Rheological parameters without additional mixed cement dispersions depended on the type of mineral filler. At the same time, with the introduction of diluent additives, dosages and the chemical base of additives have a predominant effect on rheological parameters.

Conclusion. Mixed cement-marble and cement-quartz dispersions with the introduction of diluting additives are characterized by higher fluidity than cement dispersions. The introduction of plasticizing additives at certain dosages makes it possible to completely remove non-linearity, and the use of mineral fillers enhances the effectiveness of surfactants.

KEYWORDS: cement systems, mineral filler, plasticizer, yield strength, plastic viscosity, rheological properties

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest Lesovik V.S. member of the editorial council of The Russian Automobile and Highway Industry Journal. The Russian Automobile and Highway Industry Journal does not exempt scientists from reviewing the manuscript, regardless of their status.

ACKNOWLEDGEMENTS: The study was funded by the grant of the Russian Science Foundation (Project No. 25-19-00866). The authors express their gratitude to the editorial board of the journal The Russian Automobile and Highway Industry Journal and reviewers of the article.

The article was submitted: January 17, 2025; **approved after reviewing:** February 17, 2025; **accepted for publication:** June 16, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Lesovik V.S., Tolypin D.A. Rheological properties of cement systems modified with mineral and plasticizing additives. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (3): 448-459. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-448-459>

© Lesovik V.S., Tolypin D.A., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы возрастает внимание к исследованиям рео-технологических свойств портландцементных суспензий, которые широко применяются в строительстве и при креплении нефтяных и газовых скважин [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. На практике требуется получение смесей равной удобоукладываемости, оцениваемой стандартными техническими показателями (осадка конуса, расплыв и др.), но в то же время с различными величинами реологических свойств, характеризующими механическое поведение смесей при внешних воздействиях: предельное напряжение сдвига, эффективная вязкость. Применение данных показателей позволит оценить структурно-механические свойства систем и использовать добавки, которые обеспечат сохранение структуры строительных смесей при транспортировании и высокую текучесть при формовании [9, 10, 11, 12, 13]. К важным свойствам структурированных дисперсных систем можно отнести изменение их характеристик во времени, особенно с ростом или снижением скорости сдвига.

Большое внимание уделяется проведению исследований по использованию минеральных добавок как компонентов строительных материалов [12, 13, 14, 15]. Широкое применение находят добавки ПАВ, которые позволяют снизить реологические показатели, такие как предел текучести и вязкость, что дает возможность готовить самоуплотняющиеся строительные смеси, когда предел текучести приближается к нулевому уровню и отпадает необходимость механических воздействий [16, 17, 18, 19, 20, 21]. В то же время реоло-

гическим свойствам смесей портландцемента с минеральными и органическими добавками уделялось мало внимания. Эта работа посвящена исследованию данного вопроса.

Задачи исследования:

- исследовать влияние минеральных и пластифицирующих добавок на реологические показатели цементных дисперсий;
- выполнить анализ реологических моделей;
- провести сравнительный анализ полученных зависимостей реологической эффективности суперпластификаторов в цементных системах с минеральными модификаторами.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Использовались тонкодисперсные кварцевый ($S_{уд}=340 \text{ м}^2/\text{кг}$) и мраморный ($S_{уд}=320 \text{ м}^2/\text{кг}$) наполнители, полученные помолом в лабораторной мельнице (рисунок 1); вяжущее ЦЕМ I 42,5 Н ЗАО «Осколцемент» ($\tau_{H.CXB}=230 \text{ мин}$; НГ=26%, $C_3S=61,59\%$, $C_2S=14,2\%$, $C_3A=6,83\%$, $C_4AF=3,73\%$); суперпластификатор (СП) нафталинформальдегидного типа Полипласт СП-1 (ТУ 5870-005-58042865-05), гиперпластификатор (ГП) на поликарбоксилатной основе Sunbo 2021 (Suzhou Sunbo Chemical Building Materials Co., Ltd). Цементные дисперсии готовили с В/Т=0,3, пластифицирующие добавки (0,2; 0,4; 0,6%) вводили с водой затворения, дозировки указаны от массы порошкового компонента. Смешанные цементно-мраморные и цементно-кварцевые дисперсии готовили при соотношении ПЦ: наполнитель=70:30. Реологические характеристики цементных дисперсий исследовали при помощи ротационного вискозиметра Rheotest RN 4.1.

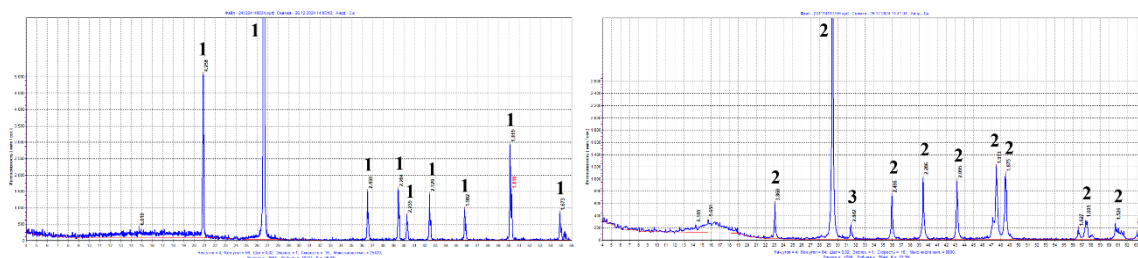


Рисунок 1 – Рентгенограммы применяемых наполнителей на основе кварцевого песка (а) и мрамора (б):
 1 – кварц ($d=4,24; 3,34; 2,45; 2,25; 2,123; 1,975; 1,813 \dots \text{Å}$);
 2 – кальцит ($d=3,84; 3,029; 2,49; 2,28; 2,19; 1,91; 1,87 \dots \text{Å}$);
 3 – доломит ($d=2,883; 2,191 \dots \text{Å}$)
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – X-ray images of applied fillers based on quartz sand (a) and marble (b):
 1 – quartz ($d=4,24; 3,34; 2,45; 2,25; 2,123; 1,975; 1,813 \dots \text{Å}$);
 2 – calcite ($d=3,84; 3,029; 2,49; 2,28; 2,19; 1,91; 1,87 \dots \text{Å}$);
 3 – dolomite ($d=2,883; 2,191 \dots \text{Å}$)
 Source: compiled by the author.

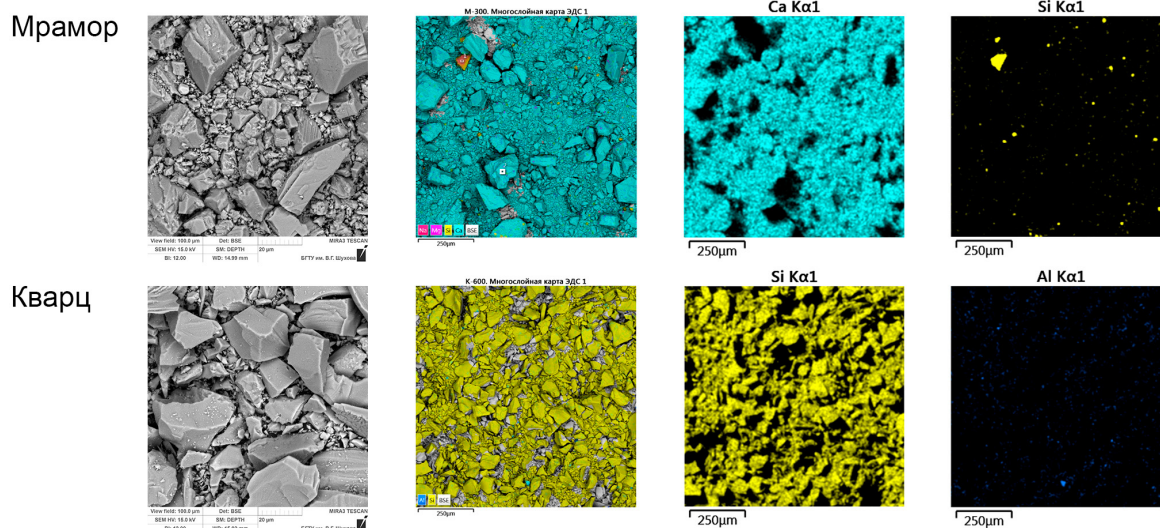


Рисунок 2 – Микроанализ поверхности частиц с помощью картирования

Figure 2 – Microanalysis of the particle surface using mapping
Source: compiled by the author.

Микроанализ поверхности мраморных и кварцевых порошков с помощью картирования с использованием растрового электронного микроскопа TESCAN MIRA 3 LM приведен на рисунке 2.

Молотые кварц и мрамор характеризуются стабильным химическим составом, содержат незначительное количество сопутствующих примесей и аксессуарных минералов. При помоле кварцевого песка образуется более однородная смесь частиц по размеру по сравнению с продуктом помола мрамора.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Исследования реологических свойств дисперсий на цементной основе проводились при малых градиентах скорости сдвига $\dot{\epsilon}$ до 25 с⁻¹, что в большой степени моделирует подобие потока в реометре и в реальных условиях течения. На рисунках 3, 4 приведены зависимости предельного динамического напряжения сдвига и пластической вязкости цементных, а также цементно-мраморных и цементно-кварцевых дисперсий от дозировок пластифицирующих добавок СП-1 и Sunbo 2021. Из представленных графиков следует, что чистые и смешанные цементные дисперсии без пластифицирующих добавок представляют собой реологически сложные тела с большим предельным напряжением сдвига и пластической вязкостью, которые снижаются по мере увеличения дозировки химических модификаторов.

Реограмма чистого цементного теста с $B/T=0,3$ показывает, что цементное тесто имеет большой предел текучести – 152,2 Па. В области малых градиентов скорости сдвига до $8\text{--}10\text{ с}^{-1}$ наблюдается течение в соответствии с моделью Шведова, с увеличением скорости сдвига от 10 до 25 с^{-1} происходит разрушение коагуляционной структуры, в результате кривая демонстрирует аномальное течение.

Смешанные цементно-мраморные (70:30, В/Ц=0,3) и цементно-кварцевые (70:30, В/Ц=0,3) дисперсии без супер- и гиперпластификатора проявляют свойства нелинейного вязко-пластичного тела с тиксотропными свойствами (см. рисунок 3). Цементно-мраморная суспензия без разжижителей в интервале градиента скорости сдвига $\dot{\epsilon} = 0,2\text{--}0,7\text{ с}^{-1}$ обладает свойствами упругого тела (модель Гука), предельное напряжение сдвига – 153,6 Па. С ростом градиента скорости сдвига от 0,8 до 9,1 с^{-1} напряжение сдвига увеличилось от 153,6 до 219,9 Па, при этом течение цементно-мраморной суспензии происходило с неразрушенной коагуляционной структурой и максимальной пластической вязкостью, что соответствует реологической модели Шведова. В интервале $\dot{\epsilon}=9,1\text{--}11,2\text{ с}^{-1}$ наблюдался перелом реологической кривой, связанный с резким разрушением коагуляционной структуры (кластеров частиц мрамора и портландцемента), а при градиенте скорости сдвига 12,3–24,8 с^{-1} происходит переход течения дисперсии на

чисто пластический режим по модели Сен-Венана, когда структура пластического тела разрушена и сопротивление напряжению отсутствует. Прямая и обратная ветви реограммы значительно расходятся, что свидетельствует об увеличении периода релаксации структуры цементного теста. Предел текучести на обратной ветви реограммы уменьшился почти в два раза с резким подъемом в конечной области $\dot{\epsilon}$, равной нескольким обратным секундам, до 83,1 Па.

Цементно-кварцевая суспензия без добавок-разжижителей демонстрирует свойства упругого тела в интервале градиента скорости сдвига $\dot{\epsilon} = 0,2\text{--}0,7 \text{ с}^{-1}$ (модель Гука), предельное напряжение сдвига – 181,3 Па (см. рисунок 3). Наблюдаются два участка в области течения: на первом участке в интервале $\dot{\epsilon} = 0,7\text{--}8,1 \text{ с}^{-1}$ течение происходит в соответствии с моделью Шведова с неразрушенной коагуляционной структурой, напряжение сдвига возрастает от 181,3 до 296,9 Па. Затем при $\dot{\epsilon} = 9,2\text{--}13,4 \text{ с}^{-1}$ происходит резкое разрушение структуры дисперсии в достаточно узкой области, около 4 с^{-1} , и переход в область линейного течения. При градиенте скорости сдвига $\dot{\epsilon} = 14,4\text{--}24,8 \text{ с}^{-1}$ цементно-кварцевая суспензия превращается в пластическое тело по модели Сен-Венана. Прямой и обратный ход ветвей реограмм демонстрируют расширение периода релаксации структуры цементного теста. Предел текучести на обратной ветви реограммы уменьшился до 62,1 Па.

В целом можно отметить схожесть реологических моделей цементных дисперсий и заметное влияние вида порошкообразного наполнителя на реологические показатели. Цементно-мраморные дисперсии отличаются от цементно-кварцевых более низким значением предела текучести при $\dot{\epsilon} \rightarrow 0$, на прямой реограмме – на 27,7 Па и более высоким на обратной реограмме – на 21,1 Па. А также более низкими значениями вязкости: при $\dot{\epsilon} \rightarrow 0$ на прямой реограмме – на 39,2 Па·с, на обратной реограмме – на 34,8 Па·с, а при максимальном градиенте скорости сдвига $\dot{\epsilon}$ – на 3,1 Па·с. Можно отметить несколько более узкую петлю гистерезиса у цементно-мраморных дисперсий.

Диаграммы течения цементно-мраморных и цементно-кварцевых суспензий с добавкой гиперпластификатора Sunbo 2021 показывают, что уже при вводе в суспензию 0,2% Sunbo реограммы приобретают линейный характер, а с дальнейшим увеличением дозировки гиперпластификатора степень нелинейности

реограмм снижается незначительно. Таким образом, ввод поликарбоксилатного гиперпластификатора уже минимальной дозировки (0,2%) практически снимает нелинейность и суспензия течет при заданных градиентах с постоянной скоростью. При этом наблюдается существенное снижение величины предельного напряжения сдвига до 1,53 Па (ПЦ:Мр) и 1,32 Па (ПЦ:Кв) практически независимо от вида минерального наполнителя. С повышением дозировок ГП от 0,2% до 0,4 и 0,6% изменение реологических параметров суспензий ослабевает, значения предельного напряжения сдвига опускаются до 0,74 и 0,67 Па с мраморным наполнителем; до 0,75 и 0,55 Па – с кварцевым. Наблюдается сильное разжижение смешанных дисперсий с течением, близким к ньютоновскому. Большое снижение предела текучести смешанных цементных суспензий от немодифицированных (153,6 Па (ПЦ:Мр) и 181,3 (ПЦ:Кв)) к модифицированным гиперпластификатором Sunbo 2021 способствует практически ликвидации участков с упругой деформацией. В интервале $\dot{\epsilon}$ от 0,5 до 5 с^{-1} прямая и обратная ветви реограмм цементно-мраморных дисперсий сливаются, что говорит о быстром периоде релаксации структуры, у цементно-кварцевых дисперсий релаксация внутренних напряжений несколько замедлена.

При добавлении в цементную суспензию суперпластификатора СП-1 в малой дозировке, 0,2%, проявляются вязко-пластические свойства (см. рисунок 3), что демонстрирует существенную разницу по эффективности влияния добавок-разжижителей с различной химической основой на реологические свойства смешанных цементных дисперсий. Цементно-кварцевые и цементно-мраморные суспензии с суперпластификатором СП-1 (0,2%) в интервале 15–20 Па проявляют свойства упругого тела (модель Гука). В интервале градиента скорости сдвига $0,5\text{--}2 \text{ с}^{-1}$ наблюдается кратковременный период течения суспензий с неразрушенной коагуляционной структурой и наибольшей вязкостью (модель Шведова), затем при $2\text{--}5 \text{ с}^{-1}$ быстрое разрушение коагуляционной структуры и далее течение с полностью разрушенной структурой и наименьшей вязкостью. Прямая и обратная ветви реограммы при $\dot{\epsilon} < 5 \text{ с}^{-1}$ совпадают, что говорит о быстром периоде релаксации структуры суспензий. Предел текучести на прямой ветви реограммы составил 23,52 Па (ПЦ:Кв) и 19,43 Па (ПЦ:Мр) на обратной ветви 28,81 Па (ПЦ:Кв) и 19,96 Па (ПЦ:Мр).

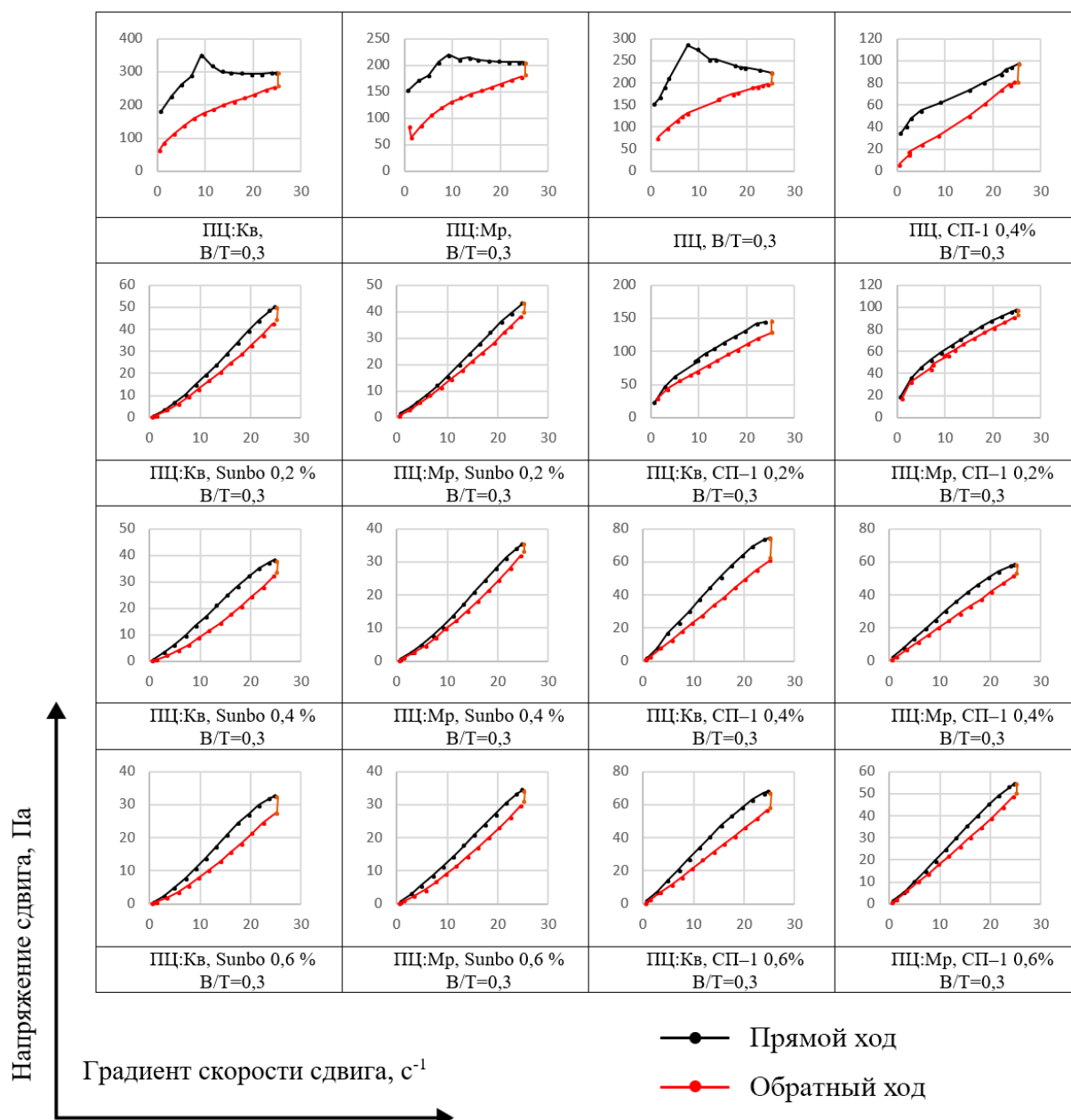


Рисунок 3 – Реограммы цементных дисперсий с минеральными и органическими модификаторами
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Rheograms of cement dispersions with mineral and organic modifiers
Source: compiled by the author.

С ростом дозировки СП-1 до 0,4 и 0,6% снижается степень нелинейности реограмм, при этом течение дисперсий при данных градиентах скорости идет, хотя с очень малой вязкостью, но приблизительно в 2-3 раза большей, чем при вводе гиперпластификатора Sunbo. Наблюдается петля гистерезиса между прямой и обратной ветвями реограмм, а в интервале малых значений градиента скорости

сдвига $\dot{\epsilon} < 5 \text{ с}^{-1}$ происходит совпадение прямой и обратной ветвей, что свидетельствует о коротечном периоде релаксаций внутренних напряжений. Прямая и обратная ветвь реограмм отражают отсутствие трансформации структуры течения. Пределы текучести очень близки и при СП-1=0,4% равны на прямой ветви 1,97 Па (ПЦ:Кв) и 2,53 Па (ПЦ:Мр), на обратной ветви 0,62 Па (ПЦ:Кв) и 0,78 Па (ПЦ:Мр).

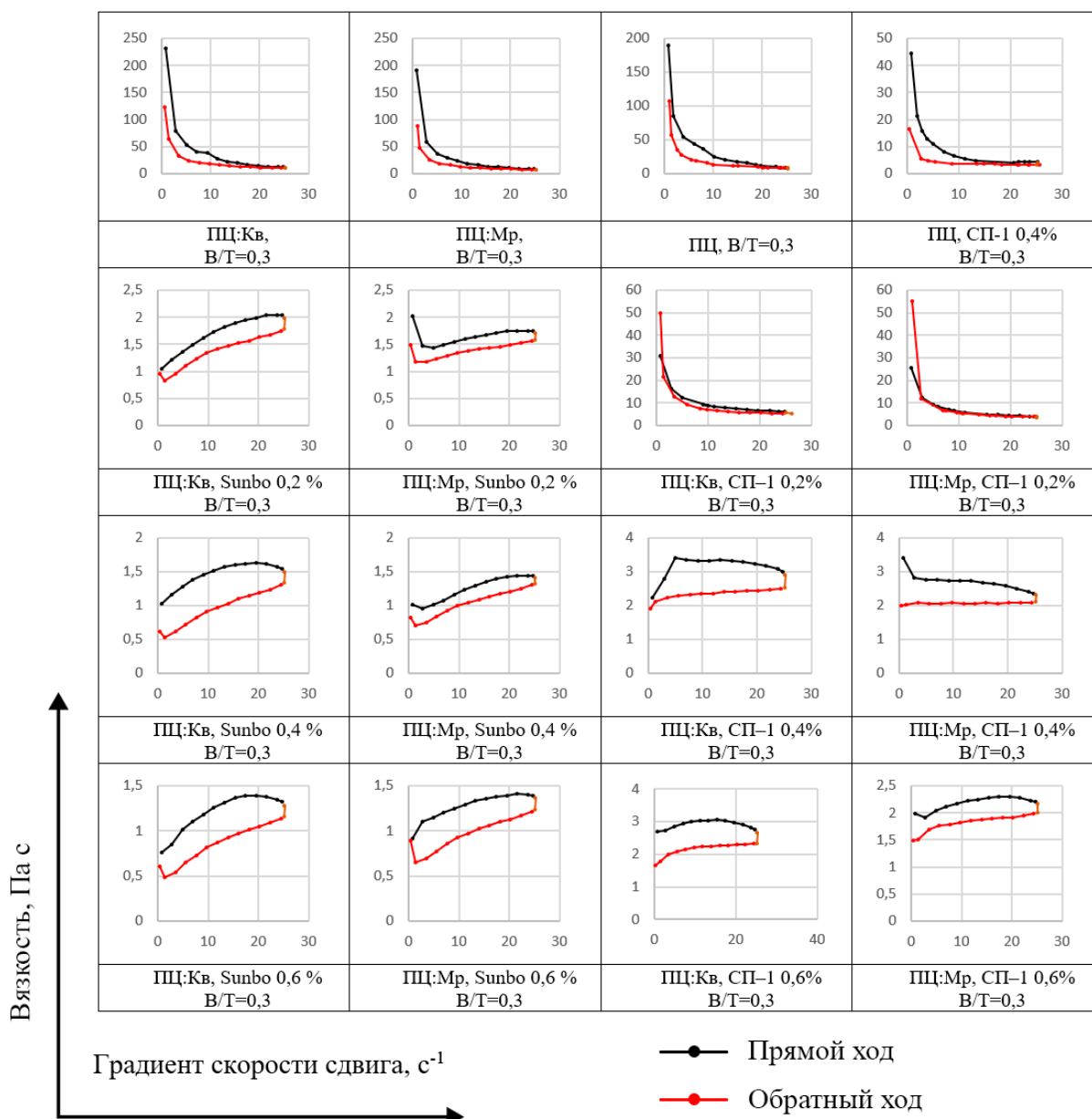


Рисунок 4 – Вязкость цементных дисперсий с минеральными и органическими модификаторами
Источник: составлено авторами.

Figure 4. – Viscosity of cement dispersions with mineral and organic modifiers
Source: compiled by the author.

Применение СП-1 в наибольшей дозировке 0,6% приводит к максимальному снижению предела текучести и суспензии приобретают свойства ньютоновской жидкости. Повышение дозировки СП-1 до 0,6% снизили пределы текучести на прямой ветви до 1,75 Па (ПЦ:Кв) и 1,56 Па (ПЦ:Мр), на обратной ветви до 0,77 Па (ПЦ:Кв) и 0,55 Па (ПЦ:Мр).

Кривые зависимости пластической вязкости смешанных цементных суспензий от градиента скорости сдвига (см. рисунок 4) де-

монстрируют резкое падение вязкости практически в 100 раз при вводе гиперпластификатора Sunbo 2021 уже в минимальной дозировке. Характер течения смешанных цементных суспензий приближен к ньютоновскому. К особенностям цементных суспензий с гиперпластификатором можно отнести некоторое повышение пластической вязкости с ростом градиента скорости сдвига, что является отражением дилатантных свойств.

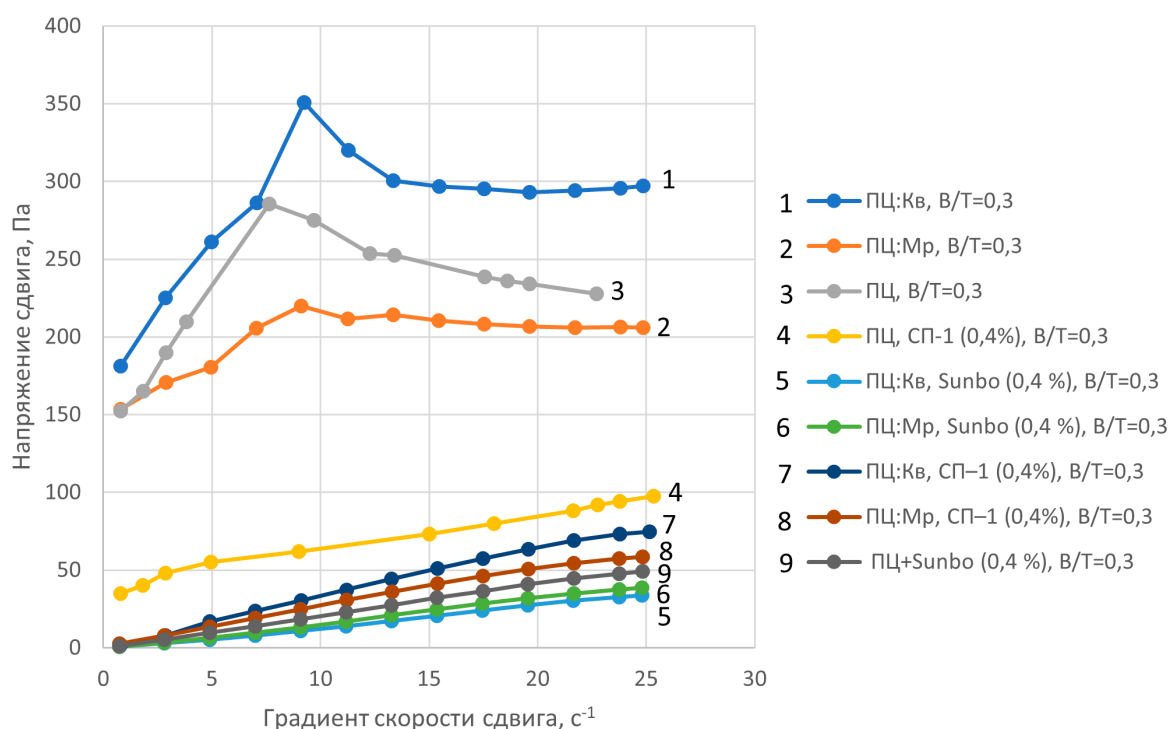


Рисунок 5 – Влияние минеральных и пластифицирующих добавок на напряжение сдвига цементных дисперсий
Источник: составлено авторами.

Figure 5. – The effect of mineral and plasticizing additives on the shear stress of cement dispersions
Source: compiled by the author.

В противоположность этим телам у тиксотропных дисперсных систем при увеличении скорости сдвига вязкость снижается. Однако проявление дилатантных свойств весьма слабое.

Как видно из рисунка 4, в зависимости от дозировки СП-1 происходит изменение показателей вязкости смешанных цементных дисперсий. При малой дозировке СП-1 (0,2%) вязкость цементно-кварцевых дисперсий существенно снижается от 30,86 до 5,92 Па·с, а цементно-мраморных от 25,43 до 3,92 Па·с в исследованном диапазоне $\dot{\epsilon}$. С повышением дозировки СП-1 до 0,4% вязкость цементно-мраморных суспензий снижается в интервале $\dot{\epsilon}=0,5-5 \text{ с}^{-1}$ приблизительно на 1–1,2 Па·с и остается практически постоянной (2,1–2,3 Па·с), а у цементно-кварцевых суспензий в интервале $\dot{\epsilon}=0,5-5 \text{ с}^{-1}$ незначительно повышается на 1–1,2 Па·с и стабилизируется на уровне 3,3 Па·с, обратные ветви представлены горизонтальными линиями. При дозировке СП-1 0,6% после незначительного снижения вязкости в интервале $\dot{\epsilon}=0,5-4 \text{ с}^{-1}$ на 0,2–0,4 Па·с происходит слабое увеличение, отражающее дилатантное течение.

Сравнительный анализ зависимостей предельного динамического напряжения сдвига цементных дисперсий различного состава (рисунок 5) свидетельствует о том, что чистые и смешанные цементные суспензии без добавок-разжижителей являются реологически сложными телами с наибольшим предельным напряжением сдвига и пластической вязкостью. Минеральные модификаторы в комбинации с пластифицирующими добавками эффективно снижают пластическую вязкость и напряжение сдвига, происходит снижение степени нелинейности реограмм. При добавлении в дисперсии одинаковых дозировок (0,4%) добавок-разжижителей видно, что с гиперпластификатором Sunbo реограммы характеризуются четко выраженным прямолинейным характером, а при добавлении 0,4% суперпластификатора СП-1 прямолинейная зависимость проявляется только у смешанных цементных дисперсий, что позволяет утверждать о проявлении в подобных случаях аддитивного дефлокуляционного действия минерального и органического компонентов.

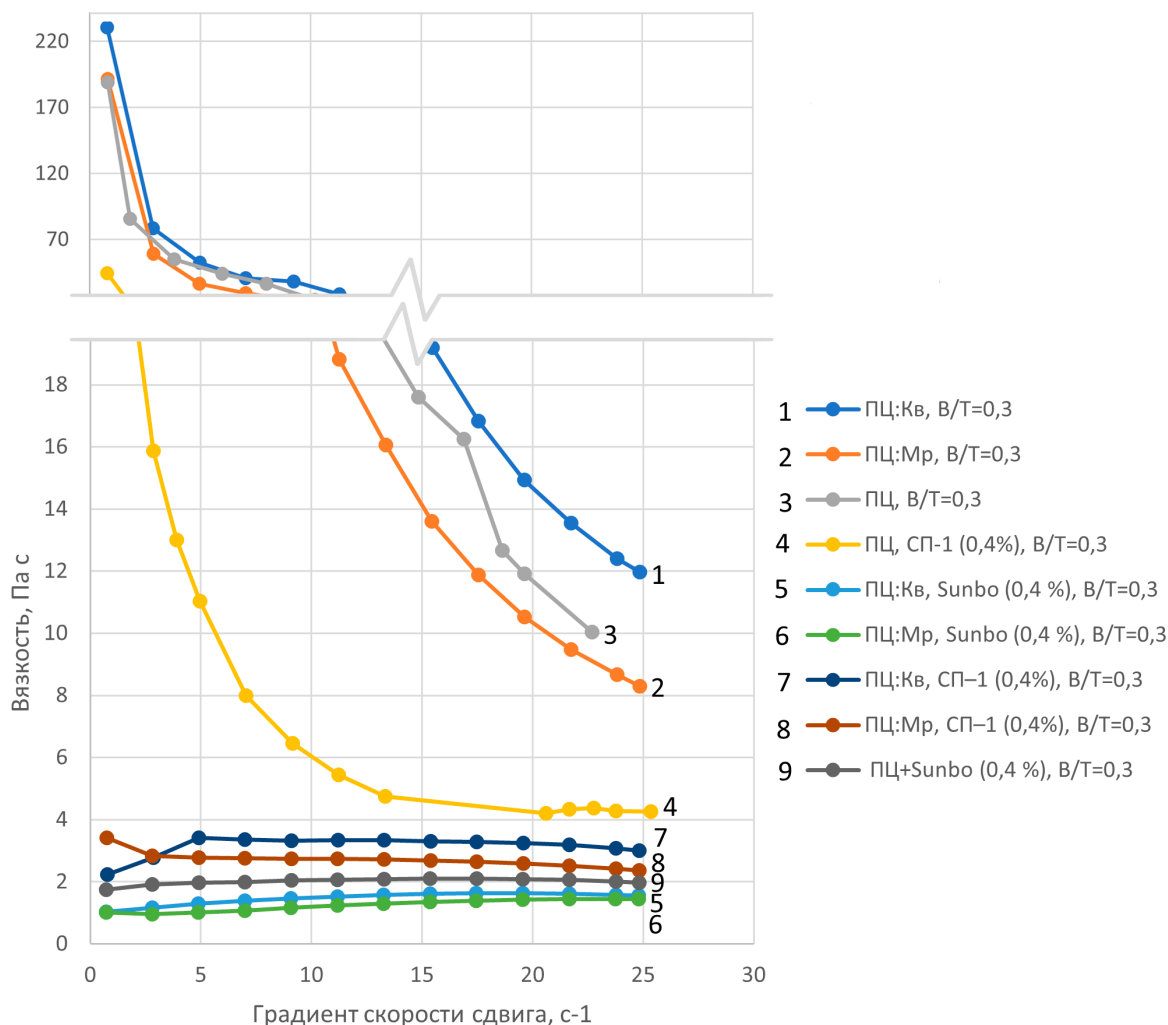


Рисунок 6 – Влияние минеральных и пластифицирующих добавок на пластическую вязкость цементных дисперсий
 Источник: составлено авторами.

Figure 5. – The effect of mineral and plasticizing additives on the plastic viscosity of cement dispersions
 Source: compiled by the author.

Наибольшее влияние на величину предельного напряжения сдвига оказывают порошковые модифицирующие минеральные компоненты с поликарбоксилатным разжижителем Sunbo, а суперпластификатор СП-1 на нафталинформальдегидной основе влияет слабее на реологические параметры суспензий. Значения пластической вязкости бездобавочных и смешанных цементных суспензий с добавками супер- и гиперпластификатора значительно снижаются с ростом скорости сдвига (рисунок 6).

Во всех случаях введение пластифицирующих добавок в определенных дозировках

позволяет полностью снимать нелинейность, а ввод минерального наполнителя усиливает эффективность их действия. В итоге уже при малых градиентах скорости сдвига происходит разрушение флокулентной структуры и переход течения дисперсии в область с минимальной вязкостью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что чистые и смешанные цементные суспензии без пластифицирующих добавок представляют собой нелинейные вязко-пластичные тела с тиксотропными свойствами, с наибольшим предельным на-

пряжением сдвига и пластической вязкостью. Течение смешанных суспензий при низких градиентах скорости сдвига происходило в соответствии с реологической моделью Шведова, а после разрушения коагуляционной структуры наблюдался пластический режим течения по модели Сен-Венана.

Смешанные цементно-мраморные и цементно-кварцевые дисперсии с вводом добавок разжижающего действия характеризуются более высокой текучестью, чем чисто цементные дисперсии. Смешанные цементные дисперсии менее склонны к флокуляции, у них физическая способность к агрегированию слабее выражена, чем у портландцемента. В цементном тесте притяжение частиц силикатов к алюминатам сильнее и более высокого уровня с проявлением химических связей, в то время как молотые кварц или мрамор проявляют слабую силу притяжения по отношению к цементному тесту, что усиливает дефлокулирующее действие ПАВ.

Установлено, что реологические показатели смешанных цементных дисперсий при отсутствии пластифицирующих добавок зависели от вида минерального наполнителя. В то же время с вводом добавок-разжижителей реологические характеристики в большей степени зависели от дозировок и химической основы добавок и мало зависели от вида минерального наполнителя. Применение поликарбонилатного модификатора нового поколения Sunbo 2021 уже при малых дозировках снижает предел текучести и пластическую вязкость в сотни раз, происходит переход в режим, близкий к ньютоновскому течению с отсутствием участков упругой деформации. Наблюдается быстрый период релаксации структуры суспензий, что отражается совпадением прямой и обратной ветвей реограмм при низких градиентах скорости сдвига. Эффективность суперпластификатора СП-1 зависела от дозировки: при малой дозировке дисперсии вели себя как нелинейное сложное реологическое тело, а с ростом дозировки СП-1 и плавным разрушением слабой коагуляционной структуры происходило постепенное снижение степени нелинейности с ликвидацией участков упругой деформации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Сальникова А.С., Казлитина О.В. К вопросу повышения эффективности высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 1 (46). С. 20–27.
2. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Хахалева Е.Н. Взаимосвязь между пластической вязкостью цементных систем и их реотехнологическими характеристиками // Вестник СибАДИ. 2018. № 15(2). С. 276–282. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-2-276-282>
3. Ortiz-Álvarez N., Lizarazo-Marriaga J., Brandão P.F.B., Santos-Panqueva Y., et al. Rheological properties of cement-based materials using a bio-polymer viscosity modifying admixture (BVMA) under different dispersion conditions. *Cem. Concr. Compos.* 2021; 124: 104224.
4. Перцев В.Т., Леденев А.А. Разработка эффективных комплексных органоминеральных добавок для регулирования реологических свойств бетонных смесей: монография. Воронеж: Воронежский ГАСУ. 2012. 136 с.
5. Chen J., Qiao M., Gao N., Wu J., et al. Acrylate based post-acting polymers as novel viscosity modifying admixtures for concrete. *Constr. Build. Mater.* 2021; 312:125414.
6. Шахова Л.Д. К вопросу совместимости цемента с пластифицирующими добавками // Цемент и его применение. 2024. № 4. С.48–55. DOI:10.61907/CIA.2024.66.94.001
7. Рахимбаев Ш.М., Логвиненко А.А. Реологические свойства материалов для строительства объектов транспортной инфраструктуры // Известия вузов. Строительство. 2014. № 5. С.26–33.
8. Khayat K.H., Meng, W., Vallurupalli K., Teng, L. Rheological properties of ultra-high-performance concrete – An overview. *Cem. Concr. Res.* 2019; 124:105828.
9. Baoguo M.A., Huixian Wang. Rheological properties of self-compacting concrete paste containing chemical admixtures // *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2013; 28(2): 291–297.
10. Ji X., Pan T., Zhao W., Lu J., et al. Interaction of superplasticizers with C3A: Understanding the superplasticizer compatibility with cement. *J. of Mater. in Civil Engin.* 2023; 35(9): 15185.
11. Shrihari S., Seshagiri Rao M.V., Srinivasa Reddy V., Manasa A. Compatibility assessment of commercial cements with superplasticizers. *ICMED 2020. E 3S Web of Conferences.* 2020; 184: 01079.
12. Qiao M., Chen J., Gao N., et al. Effects of adsorption group and molecular weight of viscosity modifying admixtures on the properties of cement paste. *J. Mater. Civ. Eng.* 2022; 34: 04022148.
13. Menon S.M. Sathyan D., Anand K.B. Studies on rheological properties of superplasticised PPC paste. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET).* 2017. 8(10): 939–947.
14. Лесовик В.С., Фомина Е.В. Новая парадигма проектирования строительных композитов для защиты среды обитания человека // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14, № 10. С. 1241–1257.
15. Лесовик В.С., Шеремет А.А., Чулкова И.Л., Журавлева А.Э. Геоника (геомиметика) и поиск оптимальных решений в строительном материаловедении // Вестник СибАДИ. 2021. Т. 18, № 1 (77). С. 120–134. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-120-134>

16. Zhang Q., Chen J., Zhu J., Yang Y., et al. Advances in organic rheology-modifiers (chemical admixtures) and their effects on the rheological properties of cement-based materials. *Materials*. 2022; 15:8730.

17. Слюсарь А.А., Шаповалов Н.А., Полуэктова В.А. Регулирование реологических свойств цементных смесей и бетонов добавками на основе оксифенолфурфурольных олигомеров // Строительные материалы. 2008. № 7. С.42–43.

18. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Хахалева Е.Н. Влияние мелкого заполнителя из песка на эффективность действия добавок-разжижителей // Вестник СибАДИ. 2016. № 3 (49). С. 74–79.

19. Chen J., Gao N., Wu J., Shan G., et al. Effects of the charge density of anionic copolymers on the properties of fresh cement pastes. *Constr. Build. Mater.* 2020; 263: 120207.

20. Ferraz D.-F., Martho A.C.R., Burns E.G., Romano R.C.O., et al. Effect of prehydration of Portland cement on the superplasticizer consumption and the impact on the rheological properties and chemical reaction. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. 2023; 16(2): 1–14.

21. Du J., Meng W., Khayat K.H., Bao Y., et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Compos. Part B Eng.* 2021; 224: 109220.

REFERENCES

1. Lesovik V.S., Elistratkin M.Yu., Salnikova A.S., Kazlitina O.V. On the issue of improving the efficiency of high-strength self-compacting concretes. *Regional architecture and engineering*. 2021; 1(46): 20-27. (in Russ.)

2. Rakhimbayev Sh.M., Tolypina N.M., Khakhaleva E.N. Interrelation between plastic viscosity of cement systems and their rheological characteristics. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018; 15(2): 276-282. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-2-276-282>

3. Ortiz-Álvarez N., Lizarazo-Marriaga J., Brandão P.F.B., Santos-Panqueva Y., et al. Rheological properties of cement-based materials using a biopolymer viscosity modifying admixture (BVMA) under different dispersion conditions. *Cem. Concr. Compos.* 2021; 124: 104224.

4. Pertsev V.T., Ledenev A.A. *Development of effective complex organomineral additives for regulation of rheological properties of concrete mixtures: monograph*. Voronezh: Voronezhskij GASU; 2012. (in Russ.)

5. Chen J., Qiao M., Gao N., Wu J., et al. Acrylate based post-acting polymers as novel viscosity modifying admixtures for concrete. *Constr. Build. Mater.* 2021; 312: 125414.

6. Shakhova L.D. On the compatibility of cements with plasticizing additives. *Cement i ego primeneniye*. 2024; 4: 48–55. (in Russ.)

7. Rakhimbayev Sh.M., Logvinenko A.A. Rheological properties of materials for the construction of transport infrastructure facilities. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2014; 5: 26–33. (in Russ.)

8. Khayat K.H., Meng W., Vallurupalli K., Teng L. Rheological properties of ultra-high-performance concrete – An overview. *Cem. Concr. Res.* 2019; 124: 105828.

9. Baoguo M.A., Huixian Wang. Rheological properties of self-compacting concrete paste containing chemical admixtures. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2013; 28(2): 291–297.

10. Ji X., Pan T., Zhao W., Lu J., et al. Interaction of superplasticizers with C3A: Understanding the superplasticizer compatibility with cement. *J. of Mater. in Civil Engin.* 2023; 35(9): 15185.

11. Shrihari S., Seshagiri Rao M.V., Srinivasa Reddy V., Manasa A. Compatibility assessment of commercial cements with superplasticizers. *ICMED 2020. E 3S Web of Conferences*. 2020; 184: 01079.

12. Qiao M., Chen J., Gao N., et al. Effects of adsorption group and molecular weight of viscosity modifying admixtures on the properties of cement paste. *J. Mater. Civ. Eng.* 2022; 34: 04022148.

13. Menon S.M., Sathyan D., Anand K.B. Studies on rheological properties of superplasticised PPC paste. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. 2017. 8(10): 939–947.

14. Lesovik V.S., Fomina E.V. A new paradigm of designing building composites to protect the human environment. *Vestnik MGSU*. 2019; 14(10): 1241-1257. (in Russ.)

15. Lesovik V.S., Sheremet A.A., Chulkova I.L., Zhuravleva A.E. Geonics (geomimetics) and search for optimal solutions in building materials science. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;18(1):120-134. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-120-134>

16. Zhang Q., Chen J., Zhu J., Yang Y., et al. Advances in organic rheology-modifiers (chemical admixtures) and their effects on the rheological properties of cement-based materials. *Materials*. 2022; 15: 8730.

17. Slyusar A.A., Shapovalov N.A., Poluektova V.A. Regulation of rheological properties of cement mixtures and concretes with additives based on oxyphenolfurfural oligomers. *Stroitel'ny'e materialy*. 2008; 7: 42–43. (in Russ.)

18. Rakhimbayev Sh.M., Stolypina N.M., Khakhaleva E.N. [The effect of fine sand filler on the effectiveness of diluent additives]. *Vestnik SibADI*. 2016; 3(49): 74–79. (in Russ.)

19. Chen J., Gao N., Wu J., Shan G., et al. Effects of the charge density of anionic copolymers on the properties of fresh cement pastes. *Constr. Build. Mater.* 2020; 263: 120207.

20. Ferraz D.-F., Martho A.C.R., Burns E.G., Romano R.C.O., et al. Effect of prehydration of Portland cement on the superplasticizer consumption and the impact on the rheological properties and chemical reaction. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. 2023; 16(2): 1–14.

21. Du J., Meng W., Khayat K.H., Bao Y., et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Compos. Part B Eng.* 2021; 224: 109220.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Лесовик В.С. Постановка задач исследования. Выбор методологии и методов. Обобщение результатов работы, формулирование выводов. Редактирование статьи.

Толыпин Д.А. Выполнение экспериментальных исследований, обработка результатов. Оформление статьи.

Ряпухин А.Н. Обзор литературы, изучение результатов ранее опубликованных работ по тематике публикации, проведение исследований, формулировка выводов по результатам исследования.

CONTRIBUTION OF AUTHORS

V.S. Lesovik Setting research objectives. The choice of methodology and methods. Summarizing the results of the work, formulating conclusions. Editing the article.

D.A. Tolypin Performing experimental studies, processing the results. The design of the article.

A.N. Ryapukhin Literature review, study of the results of previously published works on the subject of the publication, research, formulation of conclusions on the results of the study.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лесовик Валерий Станиславович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Строительное материаловедение, изделия и конструкции» БГТУ им. В.Г. Шухова (308012, Россия, г. Белгород, ул. Костюкова 46).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2378-3947>,

SPIN-код: 2873-6860,

Scopus Author ID: 55887733300,

ResearcherID: A-4757-2016,

e-mail: naukavs@mail.ru

Толыпин Даниил Александрович – аспирант кафедры «Строительное материаловедение, изделия и конструкции» БГТУ им. В. Г. Шухова (308012, Россия, г. Белгород, ул. Костюкова 46.).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-7180>,

SPIN-код: 8868-1209,

Scopus Author ID: 57215534293,

e-mail: tolypin.daniil@yandex.ru

Ряпухин Александр Николаевич – аспирант кафедры «Строительное материаловедение, изделия и конструкции» БГТУ им. В. Г. Шухова (308012, Россия, г. Белгород, ул. Костюкова 46.).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6935-8452>.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valery S. Lesovik – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials Science, Products and Structures Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46 Kostyukova St., Belgorod, 308012).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2378-3947>,

SPIN-код: 2873-6860,

Scopus Author ID: 55887733300,

ResearcherID: A-4757-2016,

e-mail: naukavs@mail.ru

Daniil A. Tolypin – Postgraduate student of the Department of Building Materials Science, Products and Structures Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, (46 Kostyukova St., Belgorod, 308012).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-7180>,

SPIN-код: 8868-1209,

Scopus Author ID: 57215534293,

e-mail: tolypin.daniil@yandex.ru

Alexander N. Ryapukhin – Postgraduate student of the Department of Building Materials Science, Products and Structures Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, (46 Kostyukova St., Belgorod, 308012).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6935-8452>.

Научная статья
УДК 666.952.2
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-460-477>
EDN: UCKIEN



НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И СВОЙСТВ ЗОЛОШЛАКА И ЗОЛЫ-УНОСА ОТ СЖИГАНИЯ ЭКИБАСТУЗСКИХ УГЛЕЙ

В.В. Сиротюк

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия
sirvv@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. По данным Минприроды России, сейчас в стране образуется 22–25 млн т ЗШО в год, утилизируется до 10%. Распоряжением Правительства Российской Федерации № 1557-р от 15 июня 2022 г. утвержден «Комплексный план по увеличению объемов утилизации золошлаковых отходов V класса опасности». Экибастузские угли являются самыми высокозольными топливными углями, используемыми на ТЭС в РФ. Свойства золы-уноса и золошлаков зависят от вида сжигаемого топлива – его минеральной части (пустой породы), а также других технологических особенностей процессов приготовления, сжигания, улавливания и удаления материалов. Именно поэтому свойства этих материалов следует рассматривать в увязке с конкретным топливом.

Методы и материалы. Объектом исследования послужила зола-уноса и золошлак, полученные при сжигании экибастузских углей на российских ТЭС. С помощью методов физико-химического анализа изучен химико-минералогический состав, определены физические свойства и экологические параметры этих материалов.

Результаты. В результате проведенных исследований установлены химический, минералогический и фазовый составы золы-уноса и золошлака экибастузских углей. Выявлены специфические особенности физических свойств и установлены причины, обуславливающие их формирование. Получены уточненные данные об экологических характеристиках золы-уноса и золошлака.

Заключение. Экибастузские угли характеризуются наиболее высокой зольностью среди всех топливных углей, достигающей 45%, что обуславливает необходимость активного вовлечения ЗШО в строительную индустрию страны. Для эффективного применения ЗУ и ЗШЛ, образующихся при сжигании этих углей, требуется учитывать ряд специфических свойств. Зола-уноса экибастузских углей, характеризуясь сверхкислым химическим составом, не проявляет свойств, присущих минеральным вяжущим веществам. Однако ЗУ, полученная методом сухого улавливания, обладает способностью вступать во взаимодействие с продуктами гидролиза минеральных вяжущих и вовлекаться в процессы гидратации, что указывает на её потенциальную активность в составе строительных композитов. Каолинит, доминирующий в минералогическом составе пустой породы экибастузского угля с ограниченным присутствием плавней, обуславливает необходимость высоких температур для модификации и термоактивации минеральной составляющей. Эта особенность оказывает непосредственное влияние на фазовый состав образующейся ЗУ и ЗШЛ, определяя их характеристики и свойства. Диссоциация минералов в тонкоизмельченном угле стимулирует формирование как закрытой, так и открытой микропористости в зольных частицах. Этот процесс приводит к существенному увеличению их удельной поверхности и химической активности, определяя физические свойства ЗУ и ЗШЛ. Шлаковая составляющая от сжигания экибастузских углей нагревается только до стадии спекания, но не плавления. Это предопределяет пониженную плотность и механические показатели ЗШЛ. Экибастузские угли характеризуются повышенным содержанием фюзена в органической части. Петрографические характеристики данной органической массы предопределяют повышенную устойчивость углистых остатков к агрессивным воздействиям. Радиоактивность экибастузских ЗУ и ЗШЛ не превышает допустимый предел для отнесения их к I классу опасности по удельной эффективной активности ЕРН. Экибастузским ЗШО присвоен V класс опасности для окружающей природной среды, определяющий её как практически неопасные отходы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: золошлак, зола-уноса, экибастузские угли, химический, минералогический, фазовый состав, углистые остатки, физические свойства, экологические показатели

Статья поступила в редакцию 21.04.2025; одобрена после рецензирования 27.05.2025; принята к публикации 16.06.2025.

© Сиротюк В.В., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

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: Сиротюк В.В. некоторые особенности состава и свойств золошлака и золы-уноса от сжигания экибастузских углей // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 3. С. 460-477. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-460-477>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-460-477>

EDN: UCKIEN

SOME FEATURES OF THE COMPOSITION AND PROPERTIES OF ASH SLAG AND FLY ASH FROM THE BURNING OF EKIBASTUZ COALS

Viktor V. Sirotyuk

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),

Omsk, Russia

sirvv@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. According to the Russian Ministry of Natural Resources, the country currently generates 22-25 million tons of fly ash and slag waste per year, and up to 10% is disposed. By the Government Order of the Russian Federation No. 1557-p dated June 15, 2022, the "Comprehensive Plan for increasing the volume of ash and slag waste disposal of hazard class V" was approved. Ekibastuz coals are the highest ash fuel coals used at thermal power plants in the Russian Federation. The properties of fly ash and ash slags depend on the type of fuel being burned - its mineral part (overburden), as well as other technological features of the processes of preparation, combustion, capture and disposal of materials. That is why the properties of these materials should be considered in relation to a specific fuel.

Methods and materials. The object of the study was fly ash and ash slag obtained by the combustion of Ekibastuz coals at Russian thermal power plants. With the use of physical and chemical analysis methods, the chemical and mineralogical composition was studied, the physical properties and environmental parameters of these materials were determined.

Results. As a result of the conducted research, the chemical, mineralogical and phase composition of fly ash and ash slag of Ekibastuz coals have been established. The specific features of physical properties have been identified and the causes of their formation have been identified. Specified data on the environmental characteristics of fly ash and ash slag have been obtained.

Conclusion. Ekibastuz coals are characterized by the highest ash content among all fuel coals, reaching 45%, which necessitates the active involvement of ash and slag wastes in the country's construction industry. A number of specific properties must be taken into account for the effective use of fly ash and ash slag formed during the combustion of these coals. The fly ash of Ekibastuz coals, characterized by a superacid chemical composition, does not demonstrate the properties inherent in mineral binders. However, the fly ash obtained by dry capture has the ability to interact with hydrolysis products of mineral binders and be involved in hydration processes, which indicates its potential activity in building composites. Kaolinite, which dominates the mineralogical composition of the Ekibastuz coal rock with a limited presence of fluxes, necessitates high temperatures for modification and thermal activation of the mineral component. This feature has a direct effect on the phase composition of the formed fly ash and ash slag, determining their characteristics and properties. The dissociation of minerals in finely ground coal stimulates the formation of both closed and open microporosity in ash particles. This process leads to a significant increase in their specific surface area and chemical activity, determining the physical properties of fly ash and ash slag. The slag component from the burning of Ekibastuz coals is heated only to the sintering stage, but not melting. This determines the reduced density and mechanical properties of the ash slag. Ekibastuz coals are characterized by a high content of fusain in the organic part. The petrographic characteristics of this organic mass determine the increased resistance of carbonaceous residues to aggressive influences. The radioactivity of the Ekibastuz fly ash and ash slag does not exceed the permissible limit for classifying them to the 1-st hazard class according to the specific effective activity of the latter. Ekibastuz ash and slag wastes have been assigned the V-th hazard class for the environment, defining it as practically non-hazardous waste.

© Sirotyuk V.V., 2025



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

KEYWORDS: *ash slag, fly ash, Ekibastuz coals, chemical, mineralogical, phase composition, carbonaceous residues, physical properties, environmental indicators*

The article was submitted: April 21, 2025; **approved after reviewing:** May 27, 2025; **accepted for publication:** June 16, 2025.

The author has read and approved the final manuscript.

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

For citation. Sirotuk V.V. Some features of the composition and properties of ash slag and fly ash from the burning of Ekibastuz coals. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (3): 460-477. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-460-477>

ВВЕДЕНИЕ

По данным Минприроды России, сейчас в стране образуется 22–25 млн т ЗШО в год, утилизируется до 10% (для сравнения: в Китае около 400 млн т в год, утилизируется около 70%).

Государство, осознавая потенциал этого ресурса, закрепило стратегический курс в Распоряжении Правительства Российской Федерации № 1557-р от 15 июня 2022 г. Этот «Комплексный план по повышению объемов утилизации золошлаковых отходов V класса опасности», рассчитанный до 2035 г., задаёт амбициозные ориентиры: к 2024 г. – 15%, а к 2035 г. – уже 50% утилизации от ежегодного объема образования ЗШО ТЭС.

Научные исследования по проблеме утилизации золошлаков (ЗШЛ) ведутся в нашей стране с конца 20-х годов 20-го века^{1,2}. В США, Франции, Германии исследования зол начались с 30-х годов прошлого века, тогда же возник и термин – зола-уноса (ЗУ). В основном эти исследования были нацелены на выявление вяжущих свойств зол. Тем не менее до настоящего времени нет чётких общепринятых определений компонентов ЗШО.

Согласно ГОСТ 25818: зола-уноса – это мелкая, состоящая преимущественно из шарообразных стекловидных частиц пыль, образующаяся при сгорании мелко смолотого угля и обладающая пуццолановыми свойствами и/или гидравлической активностью.

Иное определение даёт ГОСТ Р 57789: зола (зола сухого удаления) – это тонкодисперсный материал с размером частиц менее 0,315 мм

(основную фракцию составляют частицы с размером 0,08 мм), образующийся из минеральной части твердого топлива, сжигаемого в пылевидном состоянии, и улавливаемый золоулавливающими устройствами из дымовых газов тепловых электростанций.

В соответствии с приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) № 1887 от 15.12.2016 Об утверждении информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям «Утилизация и обезвреживание отходов (кроме обезвреживания термическим способом (сжигание отходов))» (ИТС 15–2016): зола-уноса – это несгорающий остаток с зернами мельче 0,16 мм, образующийся из минеральных примесей топлива при полном его сгорании и осаждаемый из дымовых газов золоулавливающими устройствами.

Исходя из вышеприведённых определений, следует:

- если зола не обладает пуццолановыми свойствами и/или гидравлической активностью, то это уже не ЗУ;
- зола на ТЭС не улавливается, или улавливается мокрыми золоулавливателями (например, скрубберами Вентури), то это уже не ЗУ;
- топливо сгорело не полностью, то это уже не ЗУ.

По нашему мнению, более точное определение содержится в стандартах ASTM C 618–23³ и AASHTO M 295⁴ (общепризнанных в США, Канаде, Европе, Австралии, Новой Зеландии): зола-уноса (зола) – это тонкодисперсный остаток от сгорания топлива из его мине-

¹ Суровцев В.В. Золы и шлаки как сырьё для производства стройматериалов. М., Ленинград: Госстройиздат, 1933. 62 с.

² Розенблит С.М. Строительные материалы из сланцевой золы. М., Ленинград: Гизместпром, 1939. 280 с.

³ ASTM C618–23 Standard Specification for Coal Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete (Стандартная спецификация на угольную золу и сырой или обожжённый природный пуццолан для использования в бетоне). <https://standards.globalspec.com/std/14622241/astm-c618-23> (дата обращения 19.04.2025).

⁴ AASHTO M 295 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete (Стандартная спецификация на угольную золу-уноса и сырой или обожжённый природный пуццолан для использования в бетоне). <https://standards.globalspec.com/std/13344845/aashto-m-295> (дата обращения 19.04.2025).

ральных примесей, содержащийся в дымовом газе во взвешенном состоянии. Ограничения по размерам трудноосуществимы и уместны только для рекомендаций по её использованию в том или ином направлении.

Топливный шлак – это грубодисперсный остаток от сгорания топлива из его минеральных примесей, выпадающий и агрегирующий в нижней части топочного пространства тепловых агрегатов (котлов) и удаляющийся в жидком (расплав) или твёрдом состоянии.

Золошлак (ЗШЛ, золошлаковая смесь – ЗШС) – это материал, образующийся при смешении топливного шлака и золы-уноса в произвольных пропорциях. Чаще всего это смешение происходит в багерных насосных ТЭС с образованием пульпы, перекачиваемой в золоотвал. На ТЭС встречаются системы сухого удаления и хранения ЗШО (Рефтинская ГРЭС). Как правило, ЗУ составляет не менее 80% от объёма ЗШЛ, образующегося на ТЭС.

Следует пояснить, почему данная статья посвящена результатам исследования ЗУ и ЗШЛ от сжигания топливных углей Экибастузского месторождения.

Как известно^{5, 6} [1], свойства ЗШО тесно связаны с природой сжигаемого топлива – с составом его минеральной части (пустой породы), а также с нюансами технологий подготовки, сжигания, улавливания и удаления ЗШО. Поэтому свойства ЗУ и ЗШЛ следует рассматривать в неразрывной связи с конкретным видом топлива.

Экибастузский угольный бассейн расположен в Павлодарской области Казахстана⁷. Он уникален по углеплотности (150 млн т/км²), его площадь составляет 155 км². Угли каменные, ресурсы 12 млрд т. В недрах залегает 6 пластов угля, из которых три верхних образуют сложный угольный горизонт мощностью до 200 м и максимальной глубиной залегания подошвы 690 м. Угли гумусовые, высокозольные (зольность 20–50%), труднообогатимые, малосернистые (1–5%), слабоспекающиеся,

с теплотой сгорания 14–19 МДж/кг, средних стадий метаморфизма (марка СС). Содержат повышенное количество глинозёма (Al_2O_3 до 40%). Добыча экибастузского угля производится открытым способом, роторными экскаваторами (рисунок 1) [2], что предопределяет низкую себестоимость этих углей.



Рисунок 1 – Угольный разрез «Богатырь» [2]

Figure 1 – Bogatyr coal mine [2]

На этом угле работают девять электростанций Казахстана. Около 40% добытого угля идёт в РФ на ряд мощных ТЭС, в том числе на Рефтинскую, Троицкую, Серовскую ГРЭС, Омские ТЭЦ-4 и ТЭЦ-5. Потребление этого самого высокозольного угля в РФ снижается, тем не менее при его сжигании и сейчас образуется около 9 млн т ЗШО в год [2].

ЦЕЛЬ ДАННОЙ РАБОТЫ: обобщить результаты наших исследований и некоторых публикаций по составу и свойствам ЗУ и ЗШЛ от сжигания на ТЭС каменных углей Экибастузского месторождения.

ЗАДАЧИ: установить отличительные особенности состава и свойств ЗУ и ЗШЛ экибастузских углей: химико-минералогический и фазовый составы; физические и экологические свойства. Рекомендовать области возможного применения этих материалов в строительной отрасли.

⁵ Путилин Е.И. Применение золы-уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог // Обзорная информация отечественного и зарубежного опыта применения отходов от сжигания твердого топлива на ТЭС. Союздорнии. М., 2003. 61 с.

⁶ Физико-химические исследования золы-уноса из топки с псевдоожиженным слоем при сжигании фрезерного торфа / Плышевский С.В. [и др.] // Тепло и массообмен. 2014. Минск: Институт тепло и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2015. С. 30–35.

⁷ Сиротюк В.В. О гидравлической активности Экибастузской золы-уноса / В.В. Сиротюк, А.Т. Пуртова, Н.М. Зорина // Меж. вуз. сб. «Строительство и эксплуатация автомобильных дорог в условиях Сибири». Новосибирск, НИСИ, 1978. С.112–115.

Таблица 1⁸
Химический состав золошлаков некоторых топливных каменных углей

Table 1⁸
Chemical composition of ash slag of some fuel coals

Угольный бассейн	Химический состав, % по массе									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	CaO _{св}	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	п.п.п
Экибастузский	54–66	21–30	2–8	0,3–3,6	0,5–1,0	0,1–1,5	0,3–1,4	0,1–0,6	0,1–2,0	0,3–5,0
Кузнецкий	35–60	16–32	6–18	2,0–6,0	1,0–2,0	0,2–3,0	0,2–5,0	0,5–2,0	0,2–1,8	0,5–22
Донецкий	35–58	12–32	7–18	2,0–6,0	1,5–2,0	0,2–3,0	1,5–5,0	0,5–2,0	0,2–3,0	0,5–22

ХИМИКО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Химико-минералогический состав ЗШЛ от сжигания экибастузских углей отличается от состава других топливных углей РФ (таблица 1).

Отличительной особенностью этих золошлаков является сравнительная однородность химического состава и пониженное содержание окислов – плавней: Fe₂O₃, CaO, MgO, K₂O, Na₂O, значительно снижающих температурные границы фазовых превращений.

Вопросам классификации ЗУ и ЗШЛ на основе их химического состава посвящены работы многих исследователей, среди которых следует отметить Н.А. Попова, Н.А. Иванова, Г.Н. Книгину и М.В. Балахнина, Е.А. Галибину, А.В. Волженского и В.Н. Виноградова, В.А. Мелентьева, а также научные коллективы УралВТИ и ВНИИСТРОМ. Ключевым критерием, определяющим вязущие свойства золы

и шлака, признано наличие окиси кальция, представленного как в свободном, так и в химически связанном состоянии.

Помимо этого, оценку ЗУ и ЗШЛ производят, опираясь на следующие критерии:

- модуль основности M_o , который представляет собой отношение суммы основных оксидов к сумме кислотных оксидов: $M_o = (CaO + MgO + K_2O + Na_2O) / (SiO_2 + Al_2O_3)$;
- силикатный (кремнеземистый) модуль $M_c = SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$;
- модуль плавкости $M_n = (Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O) / (SiO_2 + Al_2O_3)$;
- коэффициент качества K , показывающий отношение оксидов, повышающих гидравлическую активность к оксидам, снижающим ее: $K = (CaO + Al_2O_3 + MgO) / (SiO_2 + TiO_2)$.

Значения этих критериев для рассматриваемых материалов представлены в таблице 2.

Таблица 2
Критерии, зависящие от химического состава золошлаков
Источник: составлено автором с учётом⁹

Table 2
Criteria depending on the chemical composition of ash slag
Source: compiled by the author taking into account⁹

Угольный бассейн	Усреднённые показатели					Средняя плавкость, °C			Модуль плавкости, M_n
	M_o	M_c	K	CaO _{общ}	CaO _{своб}	Начало деформации	Начало размягчения	Жидкое состояние	
Экибастузский	0,06	1,97	0,48	1,95	0,75	1350	1500	1750	0,11
Кузнецкий	0,15	1,32	0,64	4,00	1,50	1150	1270	1370	0,32
Донецкий	0,17	1,35	0,62	4,00	1,75	1130	1240	1350	0,36

⁸ ОСТ 34-70-542–2001 Зола-уноса тепловых электростанций. Нормативные характеристики. М., 2001. 14 с.

⁹ Там же.

Таблица 3¹⁰

Классификация топливных отходов от сжигания твёрдого топлива

Table 3¹⁰

Classification of fuel waste from solid fuel combustion

Химические свойства		Золошлаковые материалы		
		активные	скрытоактивные	инертные
Показатели качества	M _о	0,5–2,8	0,1–0,5	<0,1
	M _с	1,5–7,8	1,4–3,6	1,3–3,2
	K	1,0–3,6	0,5–1,5	0,4–0,9
Содержание форм кальция	CaO _{общ}	20–60	5–20	0,5–5
	CaO _{своб}	0–30	0–2	0–1
	CaO _{сульф}	0,5–9	0,2–2	0,1–1,6
	CaO _{карб}	15–45	5–15	0–5
Возможные области использования		Самоотвердеющий материал. Местное вяжущее, изделия на его основе, преимущественно автоклавного твердения. Дорожное строительство	Требуется интенсификация твердения. Производство изделий, твердеющих при тепловой обработке с активизаторами. Дорожное строительство	Сырьё для производства кирпича, зольного гравия. Техногенный грунт. Дорожное строительство

УралВТИ предложена классификация топливных отходов, в которой по показателям качества проводится разделение на активные, скрытоактивные и инертные разновидности (таблица 3¹¹).

На первый взгляд, экибастузская ЗУ является типичным представителем инертных материалов, лишенных пуццоланических свойств. Однако это далеко не так. Пуццоланические реакции с участием этой ЗУ сухого улавливания приводят к образованию гидросиликатов кальция (C-S-H) и гидроалюминатов кальция, а щелочная активация золы – к образованию алюмосиликатных гелей^{12,13} [3, 4, 5]. Это объясняется особенностями минералогии минеральной составляющей экибастузского угля

и формированием фазового состава этой ЗУ при термоактивации в котлоагрегатах ТЭС. Золошлаки из отвалов после гидроудаления практически лишены свойств пуццоланов.

В минералогическом составе глинистого вещества экибастузского угля содержится значительное количество каолинита $Al_2[Si_2O_5](OH)_4$, имеющего повышенную температуру плавления – примерно 1750 °С, и низкое значение модуля плавкости (см. таблицу 2).

По данным рентгенофазового анализа^{14,15,16} [6], минеральная часть экибастузских углей представлена следующими компонентами (мас. %): каолинит – 53–58, кварц – 25–30, сидерит – 8–10, кальцит – 4–6, гипс – 1–2 и магнезит – 0,5–1,5.

¹⁰ Путилин Е.И. Применение золы-уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог // Обзорная информация отечественного и зарубежного опыта применения отходов от сжигания твердого топлива на ТЭС. Союздорнии. М., 2003. 61 с.

¹¹ Там же.

¹² Сиротюк В.В. О гидравлической активности Экибастузской золы-уноса ... С.112–115.

¹³ Потапов С.О., Свиридова М.Н., Танутров И.Н. Физико-химические свойства золы-уноса от сжигания экибастузских углей // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: Труды научно-практич. конф. с международным участием (3–5 июня 2015 г., Екатеринбург) / РАН, УрО, Ин-т металлургии, РАН, Ин-т металлургии им. А. А. Байкова. Екатеринбург: Уральский рабочий, 2015. С. 332–335.

¹⁴ Нефедьева Л.П. Петрографический состав и условия образования угольных пластов Экибастузского каменноугольного месторождения: автореф... дис. на соиск. учен. степ. канд. геол.-минерал. наук / М-во высш. образования СССР. Ленингр. ордена Ленина и Труд. Красного Знамени горный ин-т. Ленинград, 1954. 19 с.

¹⁵ Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. Т. 5. Угольные бассейны и месторождения Казахстана. Книга 1. Бассейны и месторождения палеозойского возраста. М: Недра, 1973. 720 с.

¹⁶ Вдовенко М.И. Минеральная часть энергетических углей (физико-химическое исследование). Алма-Ата Казахской ССР: Наука, 1973. 256 с.

Таблица 4
Фазовый состав золы-уноса различных топливных углей
Источник: составлено автором.

Table 4
Phase composition of fly ash of various fuel coals
Source: compiled by the author.

Уголь, из которого получена зола	Фазовый состав ЗУ, %			
	Аморфизированное глинистое вещество	Стекло различных оттенков	Оплавленный кварц	Углистые вещества
Экибастузский	40–60	15–35	5–10	2–10
Кузнецкий	20–30	50–75	5–15	4–12
Донецкий	5–10	60–85	4–10	5–12

Глинистое вещество углей Кузнецкого и Донецкого бассейнов отличается сложным и разнообразным минеральным составом, включающим иллит, серицит, монтмориллонит, каолинит, а в редких случаях – галлуазит¹⁷. Характерной особенностью химического состава золы этих углей является повышенное содержание оксидов-плавней, что обуславливает относительно невысокие температуры размягчения и перехода золошлака в жидкоплавкое состояние, при температурах 1300–1350 °С.

Важнейшим фактором, определяющим фазовый состав ЗУ, служит процесс её термической обработки, или пироактивации. Термическое разложение глинистого вещества протекает поэтапно¹⁸:

- удаление адсорбционной воды происходит в диапазоне температур 80–160 °С;
- «коллоидная» усадка, связанная с удалением физически связанной воды, наблюдается при 200–300 °С;
- дегидратация глинистого вещества приводит к образованию метакАОлина при температурах от 450 °С и выше;
- частичное остеклование частиц происходит, начиная с 700–800 °С.

При дальнейшем повышении температуры происходит частичное или полное разрушение метакАОлина с образованием смеси кремнезёма и γ-глинозёма, а также, возможно, силлиманита ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$), который при температуре более 1200 °С превращается в муллит (от $Al_6Si_2O_{13}$ до Al_4SiO_8). Следует учитывать, что

при определённых условиях, таких как соответствующий состав сопутствующей породы, температура, размеры и время пребывания зольных частиц в зоне высоких температур метакАОлин может полностью не разрушаться, а переходить непосредственно в метакАОлиновое стекло. В ядре топливных форсунок котлоагрегатов ТЭС температура газов достигает 1400–1700 °С, однако время пребывания угольной пыли в этой зоне составляет всего 2–4 сек.

Сопоставление представленных данных позволяет объяснить различия в фазовом составе рассматриваемых ЗУ (таблица 4).

Петрографический и рентгеноструктурный анализы ЗУ экибастузских углей свидетельствуют о присутствии в их составе метакАОлинита и метанакрита, чья кристаллическая решетка, хотя и подверглась искажению и аморфизации, все же сохранила свою первоначальную структуру, вызывая дифракцию рентгеновских лучей¹⁹. Данное обстоятельство представляет собой значительный интерес как в теоретическом, так и в практическом аспекте, поскольку наличие метакАОлина в золах других топливных углей остается предметом дискуссий и зачастую оспаривается²⁰.

Основываясь на проведенных исследованиях и анализе литературных данных, автором предложена уточненная классификация ЗУ в качестве компонентов вяжущих веществ, представленная в таблице 5.

¹⁷ Минеральное сырьё. Уголь. / В.А. Косинский, Е.И. Поляковская [и др.] // Справочник. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1997. 63 с.

¹⁸ Эйтель В. Физическая химия силикатов. М.: Иностранная литература, 1962. 1055 с.

¹⁹ Сиротюк В.В. О гидравлической активности Экибастузской золы-уноса ... С.112–115.

²⁰ Его же. Физическая химия силикатов ... 1055 с.

Таблица 5

Классификация золы-уноса

Источник: составлено автором.

Table 5

Classification of fly ash

Source: compiled by the author.

Группа	Вид	Разновидность	Основные характеристики по химическому составу, %			
			CaO+MgO	SiO ₂ +Al ₂ O ₃	FeO+Fe ₂ O ₃ +R ₂ O	SO ₃
I	Высококальциевые	Высокосульфатные (IA)	≥20	≥60	-	≥5
		Низкосульфатные (IB)	≥20	≥60	-	<5
II	Низкокальциевые	Кислые (IIA)	<20	≤80	≥10	-
		Сверхкислые (IIB)	<10	>80	<10	-

В основу данной классификации положена система, разработанная под руководством профессора А.В. Волженского²¹, что позволяет обеспечить преемственность и научную обоснованность подхода. Разделение низкокальциевых ЗУ на кислые и сверхкислые, основанное на их химическом составе, напрямую обуславливает различия в их фазовом составе (см. таблицу 4), определяя тем самым их физико-химические свойства.

УГЛИСТЫЕ ОСТАТКИ

Содержание остатков несгоревшего топлива, неизменно присутствующих в ЗУ и ЗШЛ, варьируется в зависимости от типа угля, конструкции котлоагрегата и режимов сжигания. Количественная оценка этих остатков производится посредством определения потерь при прокаливании (п.п.п, см. таблицу 1).

Углистые остатки, формирующиеся в ЗУ после выгорания органической составляющей экибастузских углей, обладают составом и свойствами, отличными от характеристик, присущих многим другим топливным углям [7].

Всё богатство петрографической картины углей для удобства анализа, может быть сведено к двум фундаментальным группам: витреновой и фюзеновой, с существованием промежуточных форм^{22, 23}. Витренизированные микрокомпоненты представляют собой

потенциальную угрозу, проявляя агрессивность и склонность к нестабильности. Теплоэнергетическая отрасль Сибири опирается главным образом на угольные ресурсы Кузнецкого, Экибастузского и Канско-Ачинского бассейнов [8]. Угли Кузбасса демонстрируют широкий спектр петрографических характеристик, охватывающий переход от фюзеновых к витреновым типам. Канско-Ачинский бурый уголь характеризуется преобладанием витрена. Отличительной особенностью петрографического состава экибастузских углей является повышенное содержание фюзена и высокая зольность, достигающая 45%. Следовательно, принимая во внимание петрографические особенности органической массы и устойчивость углистых остатков, можно заключить, что ЗУ экибастузских углей обладают наиболее благоприятными характеристиками²⁴ [9, 10] как компоненты вяжущего и строительных смесей.

В процессе сгорания угольных частиц происходит увеличение удельной поверхности как углеродистых (коксовых) остатков, так и зольных частиц, возрастающее в 4–8 раз (рисунок 3). Данный эффект обусловлен удалением летучих органических микроэлементов из угольной структуры в ходе термического разложения. Частицы коксового остатка поризованы (рисунок 2).

²¹ Бетоны и изделия из шлаковых и зольных материалов / А.В. Волженский, Ю.С. Буров, Б.Н. Виноградов, К.В. Гладких; под общ. ред. А.В. Волженского. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1969. 392 с.

²² Жемчужников Ю.А. Общая геология ископаемых углей. М.: Геоиздат, 1948. 344 с.

²³ Гапеев А.А. Твёрдое горючее ископаемое. М.: Геоиздат, 1949. 298 с.

²⁴ Иванов Н.А. Лёгкие бетоны на основе зол электростанций. М.: Стройиздат, 1972. 136 с.



Рисунок 2 – Микрофотография частиц коксового остатка из золы-уноса (шлиф, ув. X 300)
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Micrography of coke residue particles from fly ash (thin section, scale 1:300)
Source: compiled by the author.



Рисунок 3 – Действительная удельная поверхность частиц (по методу БЭТ):
1 – экибастузский уголь; 2 – канско-ачинский; 3 – кузнецкий
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Actual specific surface area of particles (according to the BET method):
1 – Ekibastuz coal; 2 – Kansk-Achinsk; 3 – Kuznetsk
Source: compiled by the author

Несмотря на значительное увеличение удельной поверхности частиц после термического воздействия, содержание растворимой части в углистых (коксовых) остатках уменьшается в несколько раз (рисунок 4).

Это объясняет повышение стойкости и стабильности свойств углистого вещества в экибастузских ЗУ после термообработки.

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Значительные термические воздействия на минеральную часть углей приводят к измене-

нию формы зольных частиц. Большинство из них приобретают округлые формы (рисунок 5).

Основным помольным оборудованием на ТЭС являются шаровые и молотковые мельницы. Эти агрегаты обеспечивают тонкий помол угля, при котором остаток на сите с ячейкой 008 составляет всего 5–10%. Преобладающая фракция угольных частиц, достигающая 60–80%, имеет размеры в диапазоне 10–15 мкм, что критически важно для эффективного сжигания и передачи энергии.

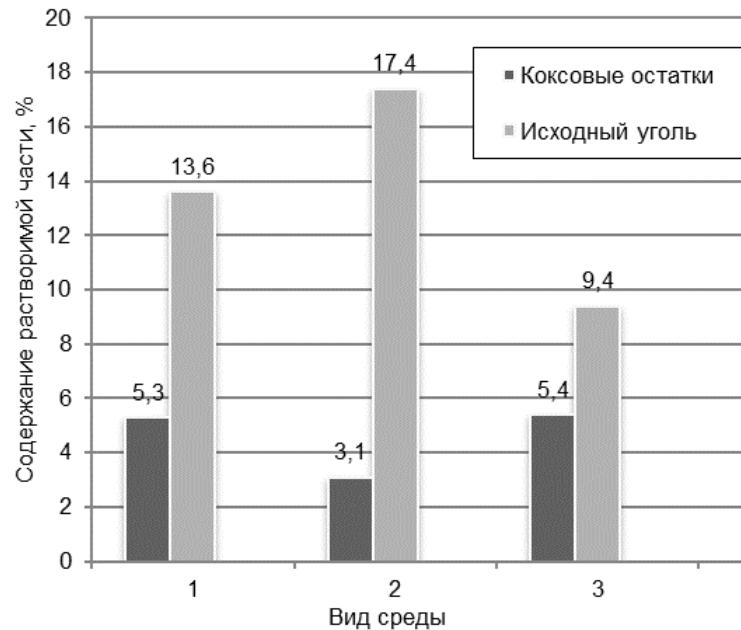


Рисунок 4 – Содержание растворимой части (экибастузский уголь):
1 – нейтральная среда; 2 – кислая; 3 – щелочная
Источник: составлено автором.

Figure 4 – The content of the soluble part (Ekibastuz coal):
1 – neutral medium; 2 – acidic; 3 – alkaline
Source: compiled by the author.

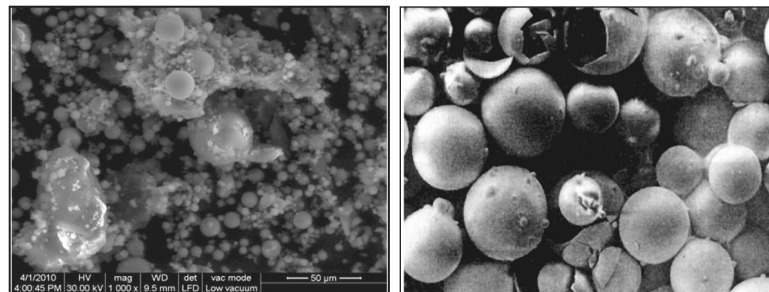


Рисунок 5 – Типичный вид золы-уноса
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Typical type of fly ash
Source: compiled by the author.

Для защиты окружающей среды и снижения воздействия на атмосферу каждая ТЭС оснащена многоступенчатой системой золоулавливания. Эти системы, включающие циклоны (сухие и мокрые скрубберы), электрофилтры и рукавные филтры, демонстрируют высокую эффективность, улавливая до 98% золы, увлекаемой дымовыми газами. Особого внимания заслуживают многопольные электрофилтры, позволяющие осуществлять отбор сухой золы-уноса, разделенной по фракциям в зависимости от поля филтрации. Таким об-

разом, на первом поле задерживаются более крупные частицы, а на последних – самые мелкодисперсные.

Для детального изучения зернового состава ЗУ применялся метод седиментационного анализа на весах Фигуровского, где в качестве дисперсионной среды использовался спирт. Дополнительно проводился анализ с использованием световой микроскопии (рисунок 6), что позволяло визуальнo оценить морфологию и размеры частиц.

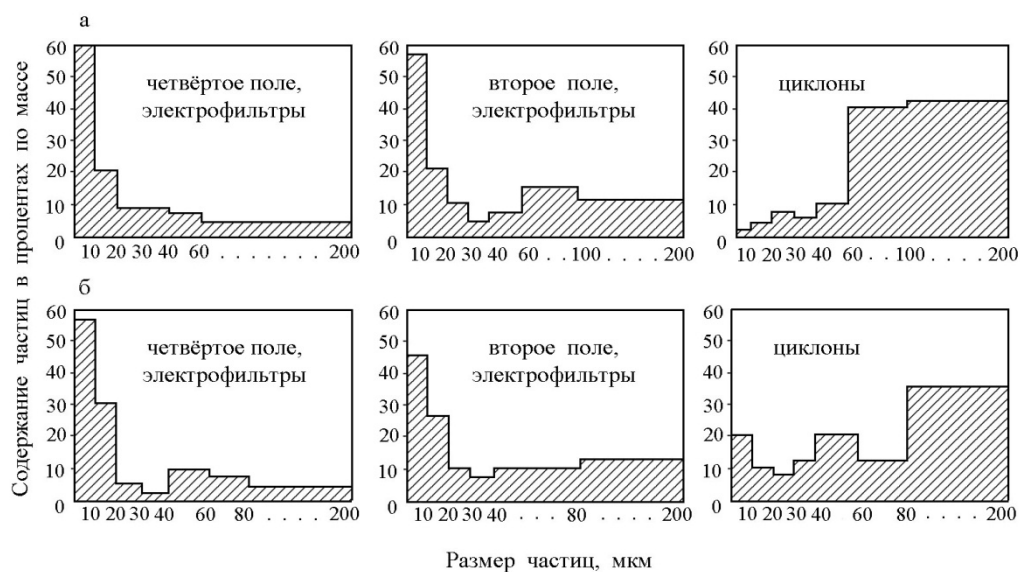


Рисунок 6 – Зерновой состав золы-уноса:
а – микроскопический анализ; б – седиментационный анализ
Источник: составлено автором.

Figure 6 – Particle composition of fly ash:
a – microscopic analysis; б – sedimentation analysis
Source: compiled by the author.

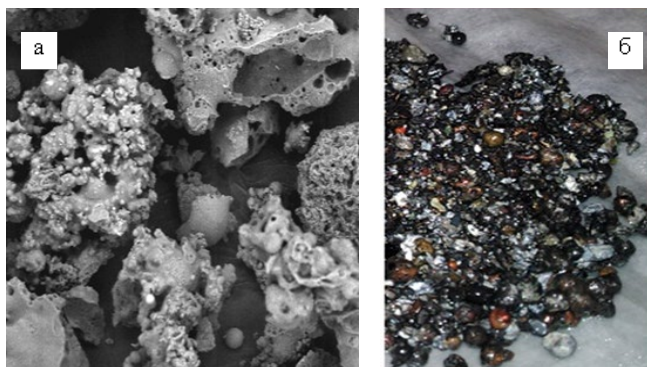


Рисунок 7 – Топливный шлак:
а – пористые спечённые агрегаты при твёрдом шлакоудалении;
б – плотный гранулированный шлак при жидком шлакоудалении
Источник: составлено автором.

Figure 7 – Fuel slag:
a – porous sintered aggregates during solid slag removal;
b – dense granular slag during liquid slag removal
Source: compiled by the author.

Таблица 6

Гранулометрический состав ЗШС в золоотвалах ТЭС

Источник: составлено автором.

Table 6

Granulometric composition of ash and slag compounds in ash dumps of thermal power plants

Source: compiled by the author.

Уголь, из которого получен золошлак	Процентное содержание фракции, мм					
	>10	10,00–2,00	2,00–0,50	0,50–0,25	0,25–0,04	<0,04
Донецкий (жидкое шлакоудаление)	8–12	20–27	4–7	1–4	20–25	30–34
Экибастузский (твёрдое шлакоудаления)	2–3	3–4	2–4	5–8	65–70	17–25

Несмотря на разные методики определений, основанные на различных физических принципах, данные этих анализов неплохо согласуются. Подавляющее большинство частиц ЗУ, отобранных с электрофильтров, имеют размеры менее 20 мкм (до 85%). В циклонах отлагается более крупная зола – 60–200 мкм (до 70%). При этом следует иметь в виду, что зерновой состав ЗУ может меняться даже в течение суток в зависимости от режимов работы котлов и т.п.

Шлаковые частицы в ЗШО могут быть получены при двух разных системах образования и удаления шлака: шлак, получаемый в системе с твёрдым шлакоудалением, или в системе жидкого шлакоудаления (рисунок 7).

Первая разновидность (рисунок 7, а), как правило, имеет губчатую структуру, образованную диффузией кислорода в процессе горения как к поверхности частицы, так и внутрь частицы после образования на её поверхности стекловидной оболочки.

Шлаковые частицы из системы жидкого шлакоудаления котлоагрегата переходят в расплав, затем резко охлаждаются в воде, гранулируясь в зёрна почти без пор с гладкой стекловидной поверхностью и острыми краями (рисунок 7, б). За счёт этого материал отличается минимальным водопоглощением и имеет более высокую прочность на сжатие.

Многие современные котлоагрегаты работают при высоких температурах, обеспечивающих плавление части золы и жидкое шлакоудаление. Однако, как было указано ранее, золы-уноса экибастузских углей имеют очень высокую температуру плавления, поэтому золы-частицы спекаются в шлаковые агре-

гаты, но не плавятся полностью. Шлак имеет высокую пористость и низкую прочность, при транспортировке на километры в виде пульпы по стальным трубопроводам этот шлак дезагрегируется. Следовательно, в золоотвалах ТЭС, работающих на экибастузском угле, содержание крупной шлаковой фракции в ЗШЛ невелико (таблица 6).

Кроме того, испытания показали, что содержание шлаковых частиц по длине намыва в золоотвалах ТЭС, сжигающих экибастузский уголь, уменьшается в соответствии с зависимостью [11]:

$$\Pi = \Pi_{\text{ш}} \cdot e^{-232 \frac{l}{L}},$$

где Π – содержание шлака в точке по длине намыва, в долях от единицы; $\Pi_{\text{ш}}$ – содержание шлака в месте выпуска пульпы, в долях от единицы; e – число Эйлера; l – расстояние от выпуска пульпы до точки определения содержания шлака, м; L – расстояние от выпуска пульпы до водоприёмного колодца в отвале, м.

Наиболее крупная часть ЗШЛ откладывается на расстоянии до 100 м от выпусков пульпопроводов.

Исследования показали, что после уплотнения золошлаковой смеси, содержащей существенное количество зёрен пористого шлака в слоях земляного полотна и оснований дорожных одежд, изменяется её зерновой состав. Слабые зёрна шлака дробятся, содержание более мелких фракций увеличивается. В качестве примера на рисунке 8 приведён зерновой состав одной пробы золошлаковой смеси до и после её уплотнения.

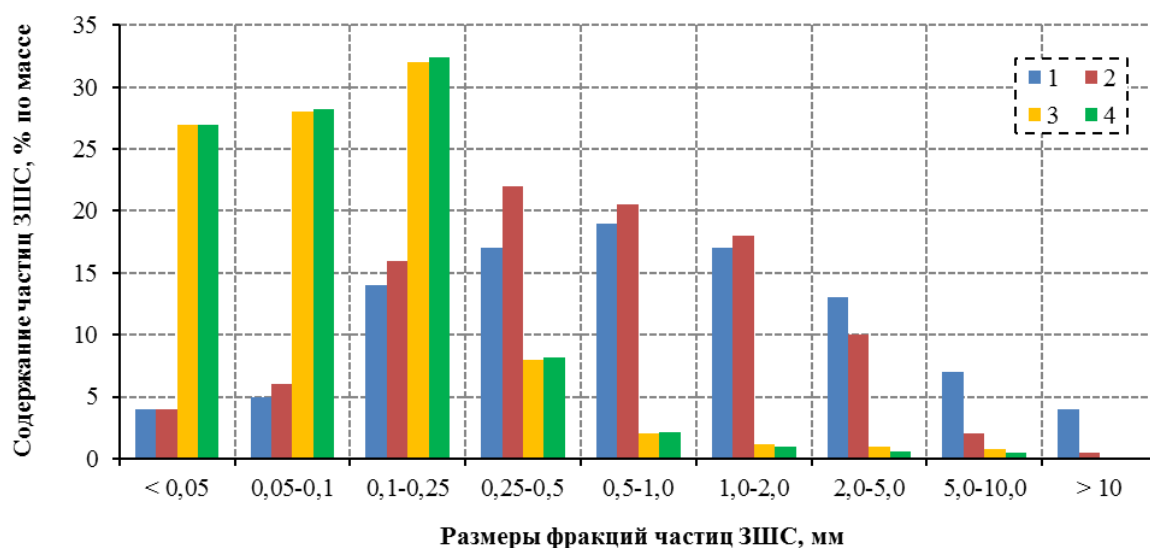


Рисунок 8 – Изменение зернового состава ЗШС после уплотнения:
1, 2 – до и после уплотнения крупнозернистой ЗШС;
3, 4 – до и после уплотнения мелкозернистой ЗШС
Источник: составлено автором.

Figure 8 – Change in the particle composition of ash and slag compounds after compaction:
1, 2 – before and after compaction of coarse-grained ash and slag compounds;
3, 4 – before and after compaction of fine-grained ash and slag compounds
Source: compiled by the author.

В крупнозернистых ЗШС существенно уменьшается содержание шлаковых зёрен крупнее 0,25 мм. В мелкозернистых ЗШС зерновой состав почти не меняется. Такая особенность не характерна для ЗШС с плотным шлаком. Это следует учитывать при уплотнении ЗШС тяжёлыми катками.

На основании изложенного можно сделать вывод, что зерновой состав и все, сопряжённые с этим показателем физические и механические свойства, ЗУ и ЗШЛ существенно меняются в зависимости от многих труднопрогнозируемых факторов.

Дисперсность порошкообразных материалов часто характеризуется не только зерновым составом, но и величиной удельной поверхности, определяемой по воздухопроницаемости. Удельная поверхность образцов ЗУ, измеренная на приборах типа ПСХ, обычно варьируется в диапазоне от 2000 до 5000 см²/г в зависимости от электростанции, места отбора пробы, типа сжигаемого угля и других технологических параметров. Удельная поверхность ЗУ, образующейся при сжигании

экибастузского угля, определяемая по воздухопроницаемости, может достигать 7000 см²/г.

Однако метод воздухопроницаемости не отражает истинные значения удельной поверхности ЗУ. Это связано с физическими принципами, лежащими в основе метода, а именно с обтеканием воздуха вокруг поверхности частиц. Для более точного определения удельной поверхности частиц ЗУ, обладающих микропористой структурой, целесообразно использовать сорбционные методы (таблица 7).

Столь значительная действительная величина удельной поверхности объясняется наличием в остеклованных зольных частицах микропористости, которая объясняется газовыделениями при нагревании частиц во время сгорания топлива, когда минеральный материал частиц переходит в пиропластическое состояние. Отмеченное обстоятельство имеет практическую значимость, поскольку с ним связаны такие свойства ЗУ и ЗШЛ, как гигроскопичность, водопотребность, химическая и физическая активность, теплопроводность.

Таблица 7

Удельная поверхность золы-уноса

Источник: составлено автором.

Table 7

Specific surface area of fly ash

Source: compiled by the author.

Вид сжигаемого угля	Зольность угля, % по массе	Удельная поверхность, см ² /г	
		по воздухопроницаемости	по десорбции аргона (БЭТ)
Экибастузский	30–45	2000–7000	25000–65000
Кузнецкий	12–20	2000–5000	12000–40000
Канско-Ачинский	6–15	1500–4500	9000–13000
Портландцемент	-	3200–4000	3900–4700

Таблица 8

Значения плотности золошлаков

Источник: составлено автором.

Table 8

Ash and slag density values

Source: compiled by the author.

Граничные значения плотности ЗШС, г/см ³	Насыпная плотность	Плотность (естественного сложения)	Плотность скелета (естественного сложения)	Агрегатная плотность	Истинная плотность
	0,5–1,2	1,1–1,8	0,8–1,5	1,9–2,5	2,3–2,7

Существует мнение, что повышенная действительная удельная поверхность ЗУ и их гигроскопичность объясняется наличием углистых остатков (п.п.п.). Однако наши исследования [7] не подтверждают эту закономерность.

Плотность ЗУ и ЗШЛ обычно меньше, чем плотность природных минеральных грунтов. При этом следует различать несколько показателей: плотность, насыпную плотность, плотность скелета, агрегатную плотность, истинную плотность зольных частиц (таблица 8).

Введение двух понятий – агрегатная плотность и истинная плотность – имеет для рассматриваемых материалов определённый физический смысл, поскольку многие частицы имеют микропоры, заполненные газообразной фазой, что зачастую искажает величину истинной плотности этих материалов.

Истинная плотность топливных гранулированных шлаков обычно составляет 2,6–3,1 г/см³, насыпная плотность – 1100–1300 кг/м³, пористость – 5–15%. Пористого шлака при твёрдом шлакоудалении – 2,0–2,5 г/см³ и 850–1000 кг/м³, соответственно, пористость 30–40%. Истинная

плотность ЗУ экибастузских углей составляет 1700–2400 кг/м³, насыпная плотность – 600–700 кг/м³. Это объясняет, почему плотность ЗШЛ с гранулированным шлаком на 15–25% больше, чем со шлаком, не прошедшим стадию расплава и грануляции.

Водные свойства представляют собой сложный комплекс характеристик, включающий водостойкость, влагоёмкость, водоотдачу, водопроницаемость и другие физические свойства дисперсных материалов, определяемые их взаимодействием с водой. Характерные влажности для ЗШЛ представлены в таблице 9.

ЗШЛ экибастузских углей обладают значениями характерных влажностей ближе к верхней границе, указанной в таблице 9. Значительная дисперсность и микропористость ЗУ и ЗШЛ предопределяют значения характерных влажностей выше, чем у большинства порошкообразных материалов и природных грунтов. Поэтому зачастую введение ЗУ повышает нормальную густоту, водоцементное отношение, оптимальную влажность композитных материалов.

Таблица 9
Характерные значения влажности для золошлака
Источник: составлено автором.

Table 9
Typical moisture values for ash slag
Source: compiled by the author.

Гигроскопическая влажность W_r	Максимальная гигроскопическая влажность W_{mg}	Максимальная молекулярная влагоёмкость W_{mng}	Оптимальная влажность W_{opt}	Капиллярная влажность W_{kap}	Полная влагоёмкость W_{pw}
0,5–2,5	2,0–4,0	9–30	10–45	15–45	25–75

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

За рубежом вопрос о безопасности золошлаковых отходов (ЗШО) тепловых электростанций (ТЭС) давно получил однозначное разрешение. В мировой практике ЗШО повсеместно классифицируются как неопасные материалы, а термин «токсичные» в отношении них не применяется [11].

В Российской Федерации оценка опасности золошлаков для окружающей природной среды осуществляется на основании отнесения их к определённом классу опасности. Данная классификация базируется на расчётном методе, верифицированном посредством биологического тестирования и дополнительного контроля удельной эффективной активности природных радионуклидов ($A_{эфф}$, Бк/кг). Следует отметить, что удельная радиоактивность золошлаковых отходов возрастает по мере выгорания угля и уменьшения размеров частиц. Вследствие этого летучая зола, выбрасываемая через дымовые трубы, демонстрирует несколько более высокую радиоактивность по сравнению с золой, улавливаемой фильтрами электростанций [12].

Оценку свойств радиоактивности производили для образцов ЗУ и золошлака с помощью бета-гамма-спектрометрического комплекса, в соответствии с требованиями СанПиН 2.6.1.2523–09 («НРБ 99/2009») ²⁵ и СП 2.6.1.2612–10 ²⁶.

Результаты исследования экибастузских зол показали [2, 13, 14], что уровни радиоактивности значительно ниже порогового значения, необходимого для присвоения I класса опасности по удельной эффективной активности ЕРН (до 370 Бк/кг). Это свидетельствует о пригодности данного материала для использования во всех видах строительства без каких-либо ограничений.

Определение опасности для окружающей природной среды выполняли на основе биотестирования водных вытяжек из ЗУ. Присвоение класса опасности проводили на основе оценки выживаемости двух культур гидробионтов – *Paramecium caudatum* и *Ceriodaphnia affinis* при разной концентрации раствора водной вытяжки: для смесей *Daphnia magna* Straus – согласно ФР.1.39.2007.03222 ²⁷, а для *Scenedesmus quadricauda* – согласно ФР.1.39.2007.03223 ²⁸.

Оценка класса опасности ЗШО для окружающей среды выявила, что водные вытяжки из всех исследованных образцов не оказывают существенного негативного воздействия на жизнедеятельность культур гидробионтов. На основании полученных данных экибастузским золошлаковым отходам присвоен V класс опасности, что соответствует практически неопасным отходам.

²⁵ Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523–09. <https://spb-institute.ru/upload/iblock/270/270770159d23e4b414abc8cf07cbc52f.pdf> (дата обращения 19.04.2025)

²⁶ Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612–10. https://stroychik.ru/wp-content/uploads/2020/04/osporb_cp2-6-1-2612-10.pdf (дата обращения 19.04.2025)

²⁷ ФР 1.39.2007.03222 Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости дафний: Федеральный реестр. М.: АКВАРОС, 2007. 51 с.

²⁸ ФР 1.39.2007.03223 Биологические методы контроля. Методика определения токсичности вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водорослей. Федеральный реестр. М.: АКВАРОС. 20 с.

ВОЗМОЖНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗОЛЫ-УНОСА И ЗОЛОШЛАКОВ ОТ СЖИГАНИЯ ЭКИБАСТУЗСКИХ УГЛЕЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Результаты экспериментально-теоретических исследований, опытно-производственного строительства и мониторинга, отечественного и зарубежного опыта, требований нормативно-методических документов позволяют рекомендовать направления применения ЗУ и ЗШЛ от сжигания на ТЭС экибастузских углей в строительной отрасли. При этом основное внимание мы уделяем крупнотоннажному использованию этих материалов.

ЗШЛ (ЗШС) рекомендуется использовать в качестве техногенного грунта:

- для сооружения насыпей земляного полотна дорог всех технических категорий;
- для вертикальных планировок территорий и площадок;
- для строительства укрепленных оснований дорожных одежд;
- при рекультивации полигонов с отходами.

ЗШЛ (ЗШС) рекомендуется использовать в качестве минеральной гранулометрической добавки без изменения химического и минералогического состава, желательно с подготовкой путем сепарации или измельчения:

- при изготовлении тяжелых, легких, ячеистых бетонов и строительных растворов;
- при изготовлении смесей щебёночно-гравийно-песчаных и грунтов, обработанных неорганическими вяжущими материалами;
- при изготовлении керамических и силикатных кирпичей и блоков;
- в качестве сырья для производства искусственных пористых заполнителей.

ЗУ сухого улавливания рекомендуется использовать в качестве активной минеральной добавки, обладающей пуццоланической активностью:

- для производства комплексных минеральных вяжущих (КМВ);
- при изготовлении смесей щебёночно-гравийно-песчаных и грунтов, обработанных неорганическими вяжущими материалами;
- при изготовлении всех видов бетонов, растворов и сухих смесей (наибольшую эффективность ЗУ проявляет при пропаривании изделий).

При этом следует учитывать следующее обстоятельство: составы и свойства ЗШЛ меняются по простиранию и глубине золоотвалов, а ЗУ – от режимов работы котлоагрегатов и систем улавливая золы. Поэтому оптималь-

ное содержание ЗШЛ и ЗУ во всех видах смесей устанавливают в результате подбора составов на конкретных материалах при условии обеспечения требуемых показателей качества материалов, изделий и конструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экибастузские угли, используемые на ТЭС Российской Федерации, характеризуются наиболее высокой зольностью среди топливных углей, достигающей 45%. В результате их сжигания образуется значительное количество ЗШО, что обуславливает необходимость их активного вовлечения в строительную индустрию страны. Для обеспечения эффективного применения ЗУ и ЗШЛ, образующейся при сжигании этих углей, требуется учитывать ряд специфических свойств, присущих этим материалам.

2. Зола-уноса экибастузских углей, характеризуясь сверхкислым химическим составом, не проявляет свойств, присущих минеральным вяжущим веществам. Однако ЗУ, полученная методом сухого улавливания, обладает способностью вступать во взаимодействие с продуктами гидролиза минеральных вяжущих и, таким образом, вовлекаться в процессы гидратации, что указывает на её потенциальную активность в составе строительных композитов.

3. Каолинит, доминирующий в минералогическом составе пустой породы экибастузского угля, в сочетании с ограниченным присутствием плавней, обуславливает необходимость высоких температур для модификации и термоактивации минеральной составляющей. Эта особенность оказывает непосредственное влияние на фазовый состав образующейся ЗУ и ЗШЛ, определяя их характеристики и свойства.

4. Диссоциация минералов в тонкоизмельченном угле стимулирует формирование как закрытой, так и открытой микропористости в зольных частицах. Этот процесс приводит к существенному увеличению их удельной поверхности и химической активности, определяя физические свойства ЗУ и ЗШЛ.

5. Шлаковая составляющая от сжигания экибастузских углей нагревается только до стадии спекания, но не плавления. Это предопределяет пониженную плотность и механические показатели ЗШЛ [2].

6. Экибастузские угли, характеризующиеся повышенным содержанием фюзена, в органической части. Это предопределяют повышенную устойчивость данных углистых остатков к агрессивным воздействиям.

7. Исследования показали, что радиоактивность экибастузских ЗУ и ЗШЛ не превышает допустимый предел для отнесения их к I классу опасности по удельной эффективной активности ЕРН. Экибастузским золошлаком присвоен V класс опасности для окружающей природной среды, определяющий её как практически неопасные отходы.

8. ЗШЛ экибастузских углей могут применяться в строительной отрасли в качестве техногенного грунта и в качестве минеральной гранулометрической добавки в бетонах и растворах. ЗУ сухого улавливания рекомендуется использовать в качестве активной минеральной добавки, обладающей пуццоланической активностью, для производства комплексных минеральных вяжущих, в бетонах и растворах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федорова Н.И., Исмагилов З.Р. Характеристика химического состава золы сапропелитовых углей различных месторождений // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2020. № 3. С. 27–32. DOI: <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-3-27-32>

2. Лунёв А.А., Иванов Е.В., Сиротюк В.В. Применение золошлаковых смесей тепловых электростанций для строительства земляного полотна автомобильных дорог: монография. 2-е изд., испр. и доп. Омск: СибАДИ, 2023. 1 электрон. опт. диск (CD-R).

3. Prause B. Die Reaktion von Steinkohlen-Flugasche in hydraulisch und karbonatisch aushärtenden Bindemitteln // Kurzberichte aus der Bauforschung. 1991. B. 86. P. 629–633. <https://katalog.bibliothek.kit.edu/bib/135557>

4. Капустин Ф.Л. Технологические и экологические аспекты применения золы-уноса Рефтинской ГРЭС при производстве строительных материалов // Технология бетонов. 2011. № 7-8. С. 64–65.

5. Шульце С.Е., Рикерт Й. Влияние химического состава золы-уноса на ее реакционную способность // Цемент и его применение. 2012. № 1. С. 170–176. <https://jcement.ru/magazine/vypusk-1-/vliyanie-khimicheskogo-sostava-zoly-unosa-na-ee-reaktsionnyu-sposobnost/>

6. Sharonova O.M., Fedorchak M.A., Mazurova E.V. The Composition and Structure of Ferrospheres Formed by Industrial Combustion of Ekibastuz Coal // Journal of Siberian Federal University. 2017. Chemistry 2 (10). pp. 175–185.

7. Сиротюк В.В., Троян Т.П. Влияние углистых остатков на качество золошлаков, применяемых для строительных технологий // Вестник СибАДИ. 2017. 6(58). 119–125.

8. Бирюков В.В., Метелев С.Е., Сиротюк В.В., Шевцов В.Р. Энергопроизводство и утилизация золошлаковых отходов // Вестник Российского государственного торгово-экономического университета. 2008. № 2. С. 221–229.

9. Попов Н.А., Иванов И.А. Характеристика несгоревших частиц в золах ТЭЦ // Труды Академии строительства и архитектуры СССР. Западносибирский филиал. 1961. Вып. 5. С. 18–26.

10. Фецынин Н.И. Об особенностях несгоревшего топлива в золах ТЭЦ и его влиянии на свойства золобетонов // Строительные материалы. 1963. № 4. С. 9–12.

11. Lunev A.A., Sirotyuk V.V. Influence of Granulometric Composition on the Mechanical Properties of Pond Ash // Soil Mech. Found. Eng. 2021. Vol. 58, № 4. P. 314–319.

12. Please cite this article as: Jambhulkar, H.P., Shaikh, S.M.S., Kumar, M.S., Fly ash toxicity, emerging

13. issues and possible implications for its exploitation in agriculture; Indian scenario: A review, Chemosphere (2018), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.045>.

14. Овсейчук В.А., Крылов Д.А., Сидорова Г.П. Радиоактивность углей и продуктов их сжигания // Атомная стратегия. Режим доступа: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=Artic.=4326>. (дата обращения: 19.04.2025)

15. Алиазаров А.Х., Хайдаров Ш.Э., Хатамова Д.М. Технологические особенности использования угольной золы как эффективное решение экологической проблемы // Молодой ученый. 2014. № 8 (67). С. 366–369. URL: <https://moluch.ru/archive/67/10986/> (дата обращения: 21.04.2025).

REFERENCES

1. Fedorova N.I., Ismagilov Z.R. Characteristic of the chemical composition of sapropelite coal ash from various deposits. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2020; 3: 27–32. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2020-3-27-32>

2. Lunev A.A., Ivanov E.V., Sirotyuk V.V. The use of ash and slag mixtures of thermal power plants for the construction of highways: a monograph. Omsk: SibADI, 2023. (In Russ.)

3. Prause B. Die Reaktion von Steinkohlen-Flugasche in hydraulisch und karbonatisch aushärtenden Bindemitteln. *Kurzberichte aus der Bauforschung*. 1991; B. 86: 629–633. <https://katalog.bibliothek.kit.edu/bib/135557>

4. Kapustin F.L. Technological and ecological aspects of the use of fly ash at Reftinskaya GRES in the production of building materials. *Concrete Technologies*. 2011; 7-8: 64–65. (In Russ.)

5. Schulze S.E., Rickert J. The influence of the chemical composition of fly ash on its reactivity. *Cement and its Application*. 2012; 1: 170–176. (In Russ.) <https://jcement.ru/magazine/vypusk-1-/vliyanie-khimicheskogo-sostava-zoly-unosa-na-ee-reaktsionnyu-sposobnost/>

6. Sharonova O.M., Fedorchak M.A., Mazurova E.V. The Composition and Structure of Ferrospheres Formed by Industrial Combustion of Ekibastuz Coal. *Journal of Siberian Federal University*. 2017; Chemistry 2 (10): 175–185.

7. Sirotyuk V.V., Troyan T.P. The influence of carbonaceous residues on the quality of ash and slag

used for construction technologies. *Vestnik SibADI*. 2017; 6(58): 119-1125. (In Russ.)

8. Biryukov V.V., Metelev S.E., Sirotyuk V.V., Shevtsov V.R. Energy production and utilization of slag waste. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2008; 2: 221-229. (In Russ.)

9. Popov N.A., Ivanov I.A. Characteristics of unburned particles in the ashes of thermal power plants. *Proceedings of the Academy of Civil Engineering and Architecture of the USSR*. West Siberian branch. 1961; Issue 5: 18-26. (In Russ.)

10. Fedynin N.I. On the features of unburned fuel in the ashes of thermal power plants and its effect on the properties of ash-concrete. *Stroitel'nye Materialy* (Construction Materials). 1963; 4: 9-12. (In Russ.)

11. Lunev A.A., Sirotyuk V.V. Influence of Granulometric Composition on the Mechanical Properties of Pond Ash. *Soil Mech. Found. Eng.* 2021; Vol. 58, no 4: 314–319.

12. Please cite this article as: Jambhulkar, H.P., Shaikh, S.M.S., Kumar, M.S., Fly ash toxicity, emerging issues and possible implications for its exploitation in agriculture; Indian scenario: A review, *Chemosphere* (2018), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.045>.

13. Ovseychuk V.A., Krylov D.A., Sidorova G.P. Radioactivity of coals and their combustion products.

Atom week. (In Russ.) Available at: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=Artic.=4326>. (access: 19.04.2025).

14. Alinazarov A.H., Khaidarov S.E., Khatamova D.M. Technological features of using coal ash as an effective solution to an environmental problem. *Young scientist*. 2014; 8 (67):366-369. Available at: <https://moluch.ru/archive/67/10986/> / (access: 21.04.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сиротюк Виктор Владимирович – проф., д-р техн. наук, главный научный сотрудник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ)

(644050, г. Омск, просп. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2254-8803>,

SPIN-код: 2583-7458,

e-mail: sirvv@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktor V. Sirotyuk – Dr. of Sci., Professor, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospekt Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2254-8803>,

SPIN-code: 2583-7458,

e-mail: sirvv@yandex.ru

Научная статья
УДК 69.034.96
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-478-487>
EDN: DHCFUU



ВЛИЯНИЕ КЛИМАТА НА ПРОЦЕССЫ ПОДТОПЛЕНИЯ И ДРЕНИРОВАНИЯ В ГОРОДСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.И. Сологаев

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),

г. Омск, Россия

sologaev_vi@cdo.sibadi.org

АННОТАЦИЯ

Введение. Подтопление подземными водами застроенных и застраиваемых территорий городов является неблагоприятным процессом в нашей стране и во всем мире. Уровень подземных вод (УПВ) повышается к поверхности земли. Последствия повышения УПВ опасны для человека и окружающей среды. Дренажирование городских территорий приводит к понижению УПВ. Дренажные системы являются активной защитой от подтопления подземными водами. Климат оказывает влияние на процессы подтопления и дренажирования в городском строительстве. Это влияние до сих пор мало учитывается в действующих строительных нормативах и расчетных методиках для проектировщиков, строителей и работников служб эксплуатации городского хозяйства. Накопилось много материалов, которые требуют научного опубликования вследствие их актуальности по дальнейшему совершенствованию борьбы с подтоплением подземными водами территорий городов и населенных пунктов с учетом климата. Ежегодно во всем мире наблюдаются ситуации неэффективной экстенсивной защиты от подтопления при его внезапном наступлении. Необходимо усиление роли научных подходов в решении выбора надлежащих мероприятий защиты от подтопления. Немалую лепту в этом направлении может внести учет влияния климата на процессы подтопления и дренажирования в городском строительстве.

Методы и материалы. Городская техногенная среда обитания существенно отличается от природной среды до застройки больше всего при подтоплении и дренажировании территорий, зданий и сооружений. Поэтому теория фильтрации в городском строительстве нуждается в совершенствовании методологии прогноза, расчета и моделирования подтопления и дренажирования, особенно с учетом климата городов, что пока почти не принимается во внимание при разработке защитных мероприятий. В настоящей работе представлены новые идеи и их реализация по заявленной теме исследования. Это открывает новое направление научной методологии, связанной с защитой от подтопления в городском строительстве с учетом климата. Данные идеи невозможно реализовать в одной статье, так как тема весьма обширная. Поэтому в дальнейшем предполагается выход других научных публикаций по намеченной тематике, запланированных как направление перспективных и актуальных научных исследований.

Обсуждение. В ходе проведенного исследования были рассмотрены характеристики климата города, которые могут влиять на процессы подтопления и дренажирования подземных вод на застраиваемых и застроенных территориях. Воздействие солнца весьма существенно. Солнечные лучи, проходя через атмосферу, оказывают влияние на режим подземных вод. Доля солнечной энергии на несколько порядков превышает влияние температурного градиента, поступающего из глубины недр земли к земной поверхности. Воздействие солнечных лучей выражается в виде солнечной радиации. При этом влияние оказывает альbedo облучаемых поверхностей. Городская застройка создает существенное затенение поверхности грунта с последующим уменьшением испарения и увеличением инфильтрации влаги к подземным водам. Ветровой режим застройки меняется. Это учтено в представленной методологии статьи, даны необходимые зависимости и примеры расчета уменьшения испаряемости воды из грунтов оснований зданий и сооружений. Рассмотрены новые экспериментальные измерения по теме исследования, а также оригинальные приборы и средства измерения автора.

Заключение. Таким образом, открыто новое направление научной методологии, связанной с защитой от подтопления в городском строительстве с учетом изменения климата техногенной среды застраиваемых и застроенных территорий городов. Представленную работу следует рассматривать как дающую в первом приближении новую методологию учета влияния климата на процессы подтопления и дренажирования в городском строительстве. Поэтому в дальнейшем предполагается выход других научных публикаций по намеченной тематике, запланированных в направлении перспективных и актуальных научных исследований.

© Сологаев В.И., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: климат, подтопление, дренирование, подземные воды, солнечная энергия, альбедо, испаряемость, ветер, городское строительство

Статья поступила в редакцию 14.05.2025; одобрена после рецензирования 10.06.2025; принята к публикации 16.06.2025.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Сологаев В.И. Влияние климата на процессы подтопления и дренирования в городском строительстве // Вестник СиБАДИ. 2025. Т. 22, № 3. С. 478-487. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-478-487>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-478-487>

EDN: DHCFUU

CLIMATE INFLUENCE ON FLOODING AND DRAINAGE PROCESSES IN URBAN CONSTRUCTION

Valery I. Sologaev

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

sologaev_vi@cdo.sibadi.org

ABSTRACT

Introduction. Flooding of built-up and developing city areas with groundwater is an unfavorable process in our country and around the world. The groundwater level (GWL) rises to the surface of the earth. The consequences of increasing the groundwater level are dangerous for humans and the environment. Drainage of urban areas leads to a decrease in groundwater level. Drainage systems are an active protection against flooding with groundwater. Climate affects the processes of flooding and drainage in urban construction. This influence is taken into account too little in the current building codes and calculation methods for designers, builders and employees of urban services. A lot of materials have been accumulated that require scientific publication due to their relevance for further improvement ways to withstand flooding of urban and populated areas with groundwater with climate considering. Ineffective situations of extensive protection against sudden onset flooding are observed all over the world every year. It is necessary to strengthen the role of scientific approaches in making the choice of appropriate measures to keep safe against flooding. Paying attention to the climate influence on flooding and drainage processes in urban construction can make a significant contribution in this direction.

Methods and materials. The urban man-made environment differs considerably from the natural before construction, most of all in flooding and drainage of territories, buildings and structures. Therefore, the theory of filtration in urban construction requires improvement of the methodology of forecasting, calculating and modeling flooding and drainage, especially paying attention to the climate of cities, which is still almost not taken into account in the development of protective measures. This paper presents new ideas and their implementation on the stated research theme. This opens a new direction of scientific methodology related to flood protection in urban construction with the consideration of climate influence. New ideas cannot be implemented in one article, since the problem is very extensive. Therefore, in the future, it is expected that other scientific studies will be published on this current theme, planned as a direction of promising and relevant scientific research.

Discussion. In the course of the study, the characteristics of the city climate that can affect the processes of flooding and drainage of groundwater in built-up and developing city areas has been considered.

The impact of the Sun is very significant. Sun rays, passing through the atmosphere, affect the groundwater regime. The share of solar energy is several times of magnitude greater than the influence of the temperature gradient coming from the depths of the Earth to the earth's surface. The impact of sunlight is expressed in the form of solar radiation. In this case, the albedo of the irradiated surfaces has an effect. Urban development creates significant shading of the soil surface with a subsequent decrease in evaporation and an increase in moisture infiltration to groundwater. The wind regime of the development changes. This has been taken into account in the presented methodology of the article, the necessary dependencies and examples of calculating the reduction of water evapo-

© Sologaev V.I., 2025



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

ration from the soils of the foundations of buildings and structures are given. New experimental measurements on the theme of the study, as well as author's innovative devices and instruments have been considered.

Conclusion. Thus, a new direction of scientific methodology related to protection from flooding in urban construction has been discovered, taking into account the climate change of the technogenic environment of the built-up and developing city areas. The presented work should be considered as a pioneering article, giving in the first approximation a new methodology for the considering the influence of climate on the processes of flooding and drainage in urban construction. Therefore, in the future, it is expected that other scientific works will be published on this acute topic, planned in the direction of promising and relevant scientific research.

KEYWORDS: climate, flooding, drainage, groundwater, solar energy, albedo, evaporation, wind, urban construction

The article was submitted: April 02, 2025; approved after reviewing: May 16, 2025; accepted for publication: June 16, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Sologae V.I. Climate influence on flooding and drainage processes in urban construction. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (3): 478-487. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-478-487>

ВВЕДЕНИЕ

Подтопление подземными водами застроенных и застраиваемых территорий городов является неблагоприятным процессом в нашей стране и во всем мире. Уровень подземных вод (УПВ) повышается к поверхности земли. Последствия повышения УПВ опасны для человека и окружающей среды. Дренажирование городских территорий приводит к понижению УПВ. Дренажные системы являются активной защитой от подтопления подземными водами. Климат оказывает влияние на процессы подтопления и дренажирования в городском строительстве. Это влияние до сих пор мало учитывается в действующих строительных нормативах и расчетных методиках для проектировщиков, строителей и работников служб эксплуатации городского хозяйства. Накопилось много материалов, которые требуют научного опубликования вследствие их актуальности по дальнейшему совершенствованию борьбы с подтоплением подземными водами территорий городов и населенных пунктов с учетом климата. Ежегодно во всем мире наблюдаются ситуации неэффективной экстенсивной защиты от подтопления при его внезапном наступлении. Необходимо усиление роли научных подходов в решении выбора надлежащих мероприятий защиты от подтопления. Немалую лепту в этом направлении может внести учет влияния климата на процессы подтопления и дренажирования в городском строительстве.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Городская техногенная среда обитания существенно отличается от природной среды

до застройки больше всего при подтоплении и дренажировании территорий, зданий и сооружений. Поэтому теория фильтрации в городском строительстве нуждается в совершенствовании методологии прогноза, расчета и моделирования подтопления и дренажирования, особенно с учетом климата городов, что пока почти не принимается во внимание при разработке защитных мероприятий. В настоящей работе представлены новые идеи и их реализация по заявленной теме исследования. Это открывает новое направление научной методологии, связанной с защитой от подтопления в городском строительстве с учетом климата. Данные идеи невозможно реализовать в одной статье, так как тема весьма обширная. Поэтому в дальнейшем предполагается выход других публикаций по намеченной тематике, в качестве направления перспективных и актуальных научных исследований. Представленную работу следует рассматривать как дающую в первом приближении новую методологию учета влияния климата на процессы подтопления и дренажирования в городском строительстве.

Влияние климата на подтопление и дренажирование в городском строительстве в такой точной формулировке у предшествующих исследователей в нашей стране и за рубежом в обзоре публикаций не встречено.

Можно лишь заметить косвенные совпадения по некоторым особенностям, связанным с климатом, подтоплением, дренажированием, подземными водами, солнечной энергией, альбедо, испаряемостью воды, ветром в городском строительстве.

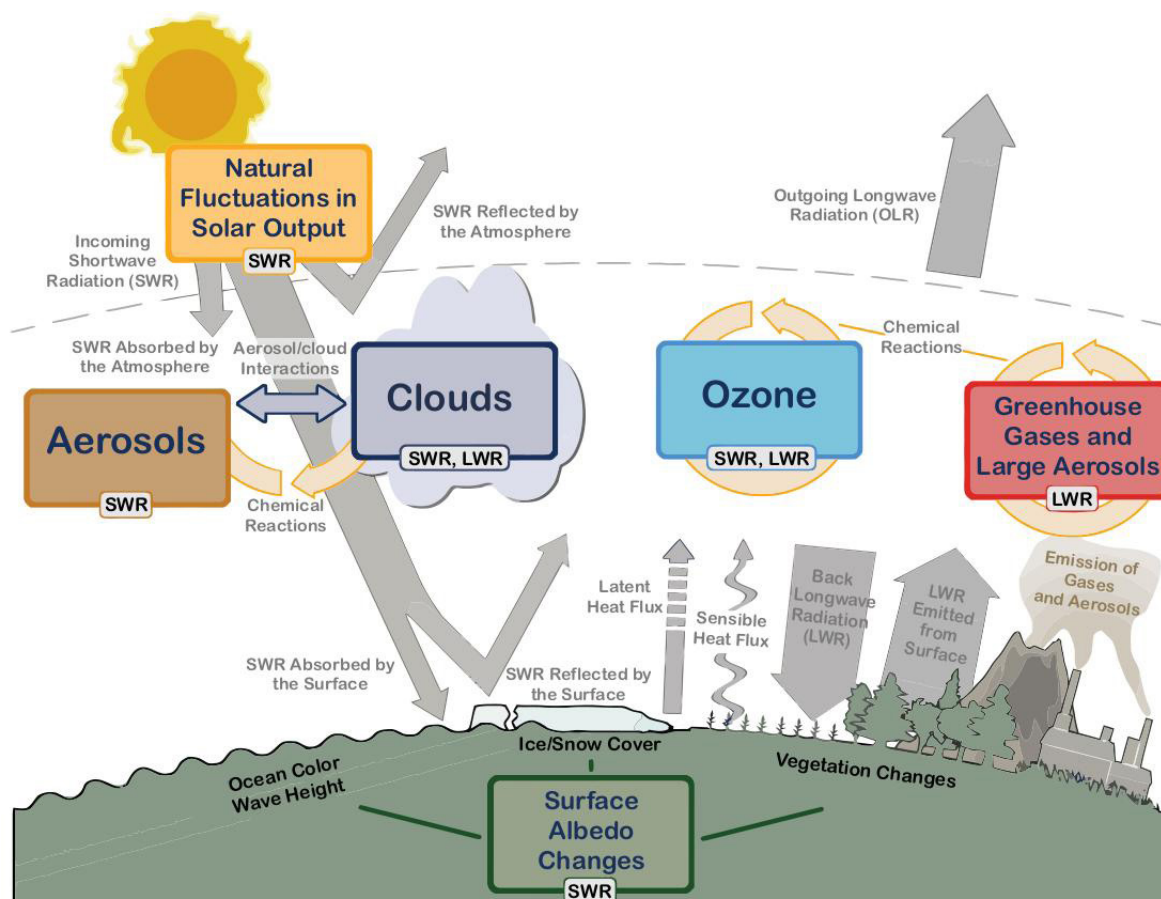


Рисунок – Основные факторы изменения климата [5]

Figure – Main drivers of climate change [5]

В последние годы на эту тему опубликовано несколько коллективных монографий [1, 2, 3, 4, 5], а также научных статей [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]. В данном разделе постараемся собрать особенности воедино, опираясь на труды предшественников и собственные разработки.

На рисунке показаны основные факторы изменения климата [5]. Обратим внимание, что подземные воды тут не упомянуты.

Уровень подземных вод (УПВ) при повышении приводит к подтоплению. Понижение УПВ является дренированием. Много городов расположены на равнинах и в долинах. Если подземные воды имеют свободную поверхность, если выше УПВ располагается зона аэрации и подземный горизонт существует круглый год, то такие воды называют грунтовыми. Грунт

зоны аэрации выше УПВ, но ниже уровня земли, имеет лишь частичное заполнение пор водой. Также там присутствует и воздух. Поэтому через зону аэрации происходит испарение воды с поверхности УПВ в атмосферу. Для таких условий в работе [17] была представлена формула для испарения воды с поверхности УПВ e , м/сут, в виде

$$e = e_0 \cdot [(1 - z)/z_0]^n. \quad (1)$$

Здесь e_0 – испаряемость, м/сут; z – расстояние от уровня земли до УПВ, м; z_0 – предельное расстояние от уровня земли до УПВ, при котором испарение исчезает, м; n – коэффициент, обычно равный 2, согласно работе [17].

Величину z_0 , м, можно определить по формуле В.А. Ковды [17] так:

$$z_0 = 1,7 + 0,08 \cdot T, \quad (2)$$

где T – температура атмосферного воздуха, средняя в течение года, $^{\circ}\text{C}$.

Испаряемость e_0 обычно измеряют на метеорологических станциях в городах, при условии, если они имеются. Наличие в городе действующих метеорологических станций сети Росгидромета РФ можно найти в свободном доступе в сети Интернет.

Испаряемость e_0 не нормирована в строительных сводах правил. Величину испаряемости e_0 можно определить по мере возможности, например для Сибири, приближённо по монографиям [18, 19].

Нашим предложением по новой методологии является введение дополнительной величины уточнённого значения испаряемости $e_{\text{гс}}$, м/сут, для конкретных условий в городском строительстве. Предлагаем величину испаряемости в городском строительстве определять так:

$$e_{\text{гс}} = K_a \cdot K_T \cdot K_B \cdot e_0. \quad (3)$$

Здесь K_a – коэффициент изменения испаряемости с учётом альбеда; K_T – коэффициент изменения испаряемости с учётом тени здания или сооружения; K_B – коэффициент изменения испаряемости по причине изменчивости скорости ветра в застройке; остальные обозначения оговорены выше.

Следуя идеям работ [20, 21, 22], можно приближённо записать значение испаряемости в виде

$$e_0 = R_M / L_{\text{и}}. \quad (4)$$

Здесь R_M – солнечная радиация по данным метеорологической станции в городе, МДж/м²; $L_{\text{и}}$ – константа удельной теплоты испарения для воды, её значение 2,512 МДж/(м²·мм).

Испаряемость в городском строительстве запишем аналогично:

$$e_{\text{гс}} = R_{\text{гс}} / L_{\text{и}}. \quad (5)$$

Здесь $R_{\text{гс}}$ – солнечная радиация на стройплощадке, МДж/м².

Сопоставляя формулы (3), (4) и (5), с учётом терминов для климата, перечисленных в работе [19], выразим безразмерный коэффициент изменения альбеда

$$K_a = [R_{\text{кв}} \cdot (1 - a_{\text{гс}}) / (1 - a_M) - I] / R_M. \quad (6)$$

Здесь $R_{\text{кв}}$ – солнечная радиация коротковолновая, МДж/м²; $a_{\text{гс}}$ – альbedo грунта или материала на стройплощадке; a_M – альbedo грунта или материала на метеорологической станции; I – эффективное излучение, МДж/м².

Учитывая труды Д. Дальтона (John Dalton) и работу¹, выразим безразмерный коэффициент изменения испаряемости влаги в условиях тени здания или сооружения в городе так:

$$K_T = (u_{tT} - u_2) / (u_{tC} - u_2). \quad (7)$$

Здесь u_{tC} – максимальная упругость влаги при температуре грунта или материала при облучении солнцем; u_{tT} – то же при температуре грунта или материала в условиях затенения; u_2 – упругость влаги атмосферного воздуха на расстоянии 2 м от уровня земли по данным метеостанции.

По формуле (7) можно определить изменение испаряемости влаги в условиях тени здания для периодов времени в течение месяца. Для суточного интервала времени летом при температуре атмосферного воздуха у поверхности земли в диапазоне от +10 $^{\circ}\text{C}$ до +30 $^{\circ}\text{C}$ по нашим опытным данным вместо формулы (7) следует воспользоваться зависимостью из работы [23] в виде

$$K_T = [(u_{tT} - u_2) / (u_{tC} - u_2)]^{0,8}. \quad (8)$$

Коэффициент изменения испаряемости по причине изменчивости скорости ветра в застройке, учитывая работу², имеет вид

$$K_B = (1 + 0,72 \cdot V_3) / (1 + 0,72 \cdot V_M). \quad (9)$$

Здесь V_3 – ветровая скорость на застроенной территории; V_M – ветровая скорость, измеренная на метеорологической станции города.

¹ Указания по расчету испарения с поверхности водоёмов // ГГИ Гидрометслужбы СССР. Ленинград: Гидрометеиздат, 1969. 84 с.

² Там же.

Значение ветровой скорости на застроенной территории V_z может быть получено разными способами. Одним из способов являются экспериментальные замеры V_z в застройке. Этот способ надёжный и непосредственный. Другой способ состоит в компьютерном моделировании методами CFD – Computational Fluid Dynamics, то есть методами вычислительной динамики флюидов, прикладной аэродинамики. Способ этот приближённый, численный, но хорошо дополняет первый, экономит силы и средства, по-новому, по-современному. Наиболее свежий обзор методов CFD приведен в работе [24], где подчеркнуто, что машинное обучение ускоряет инженерное моделирование вычислительной гидродинамики для антропогенных сред. Машинное обучение – это средство создания моделей данных согласно работам [25, 26].

ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенного исследования были рассмотрены характеристики климата города, которые могут влиять на процессы подтопления и дренирования подземных вод на застраиваемых и застроенных территориях. Воздействие солнца весьма существенно. Солнечные лучи, проходя через атмосферу, оказывают влияние на режим подземных вод. Доля солнечной энергии на несколько порядков превышает влияние температурного градиента, поступающего из глубины земных недр к поверхности. Воздействие солнечных лучей выражается в виде солнечной радиации. При этом влияние оказывает альбедо облучаемых поверхностей. Городская застройка создает существенное затенение поверхности грунта с последующим уменьшением испарения и увеличением инфильтрации влаги к подземным водам. Ветровой режим застройки меняется. Это учтено в представленной методологии статьи, даны необходимые зависимости и примеры расчёта уменьшения испаряемости воды из грунтов оснований зданий и сооружений. Рассмотрены новые экспериментальные измерения по теме исследования, а также оригинальные приборы и средства измерения автора.

Приборы были сконструированы для измерения:

- 1) альбедо грунтов и строительных материалов;
- 2) испаряемости в тени зданий и сооружений;
- 3) скорости ветра на объектах застройки городов.

Прибор для измерения альбедо грунтов и строительных материалов состоял из альбедометра английского типа на фотоэлементах, генерирующих слабый электрический ток, деревянного шеста и миллиамперметра. Альбедометр был укреплен на деревянном шесте длиной 2 м. От альбедометра на одном конце шеста шли толстые изолированные медные провода с малым электрическим сопротивлением. На другом конце шеста был расположен чувствительный миллиамперметр для измерения величины электрического тока, вырабатываемого альбедометром. Ток пересчитывался в величину альбедо грунта или строительного материала. Для влажного асфальтового покрытия в г. Омске, после дождя на солнце, величина альбедо составила 5%. Для сухого асфальтового покрытия на солнце – 15%. Эти значения были сравнены с данными из работы³, где величины соответственно составили 10 и 30%, то есть оказались, возможно, завышенными. Для сравнения, в работе исследователя из США [27] альбедо влажного асфальтового покрытия равно 5%, что совпадает с данными наших экспериментальных измерений альбедо в г. Омске. При этом погрешность прибора не превышала 5%.

Прибор для измерения испаряемости в тени зданий и сооружений основывался на показаниях двух термометров, сухого и влажного, был снабжен таблицей температур, измеренных упомянутыми двумя термометрами, значение влажности воздуха было пересчитано по таблицам термодинамических характеристик воды. Погрешность прибора составила не более 5%.

Прибор для измерения скорости ветра на объектах застройки городов был сконструирован нами, следуя Г.И. Вильду, по работе [28]. У нас не было чертежей и расчётов предыдущего исследователя. Поэтому все элементы данного прибора, состоящего из маятниковой рейки, отклоняющейся на определённый угол

³ Справочник по климату СССР. Ч. I. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. Вып. 17. Омская и Тюменская обл. Ленинград: Гидрометеиздат, 1966. 72 с.

под влиянием ветра на фоне криволинейной шкалы от 1 до 20 м/с, были рассчитаны нами заново, пользуясь аэродинамическими сопротивлениями по справочнику И.Е. Идельчика. Данный прибор был многократно проверен со студентами на лабораторных занятиях по аэродинамике с натурными обследованиями застройки. В ходе лабораторных работ ветер создавали вентилятором с тремя значениями скоростей. Контрольной проверкой прибора был аэродинамический расчёт на опрокидывание модели высотной преграды. В 95 случаях из 100 расчёт подтвердился, погрешность прибора не превысила 5%.

Покажем пример использования нашей методологии, изложенной с помощью расчётных формул (3)–(9). Исследование проводим для г. Омска, крупного города Западной Сибири.

В месяце июле в г. Омске после выпадения дождя для влажных асфальтовых покрытий, с учетом параметров актинометрии из работы [18], находим по формуле (6) безразмерный коэффициент изменения альбедо:

$$K_a = [520 \cdot (1 - 0,05) / (1 - 0,25) - 180] / 340 = 1,41.$$

По формуле (7), принимая климатические данные из работ^{4,5,6}, рассчитываем безразмерный коэффициент изменения испаряемости влаги в условиях тени здания или сооружения в г. Омске так:

$$K_T = (21,03 - 14,3) / (35,68 - 14,3) = 0,32.$$

По формуле (9), с учётом работы [28] и действующего свода правил по строительной климатологии, определяем коэффициент изменения испаряемости по причине изменчивости скорости ветра в пределах застройки г. Омска:

$$K_B = (1 + 0,72 \cdot 0,37) / (1 + 0,72 \cdot 3,7) = 0,35.$$

Окончательно по формуле (3) рассчитываем величину испаряемости после до-

ждя в июле в г. Омске в тени здания или сооружения:

$$e_{гс} = 1,41 \cdot 0,32 \cdot 0,35 \cdot 139 = 22 \text{ мм.}$$

Сравним полученную последнюю величину с испаряемостью 139 мм по данным метеорологической станции г. Омска. Отличие примерно в $139/22 = 6,3$ раза, то есть весьма существенное.

Дальнейшие расчёты могут быть выполнены по формуле (1) для испарения воды с поверхности УПВ при работе дренажа – основного активного защитного мероприятия от подтопления в городском строительстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, открыто новое направление научной методологии, связанной с защитой от подтопления в городском строительстве с учетом изменения климата техногенной среды застраиваемых и застроенных территорий городов. Представленную работу следует рассматривать как дающую в первом приближении новую методологию учета влияния климата на процессы подтопления и дренаживания в городском строительстве. Поэтому в дальнейшем предполагается выход других научных публикаций по намеченной тематике, запланированных в направлении перспективных и актуальных научных исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Chang H., Ross A.R. Climate Change, Urbanization, and Water Resources. Portland : Springer, 2024. 198 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-49631-8>
2. Kumareswaran K., Jayasinghe G.Y. Green Infrastructure and Urban Climate Resilience. Switzerland: Springer, 2023. 410 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-37081-6>
3. Paolini R., Santamouris M. Urban Climate Change and Heat Islands. Amsterdam, Cambridge, Oxford: Elsevier, 2023. 353 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2018-0-04618-6>
4. Pathak B., Dubey R.S. Climate Change and Urban Environment Sustainability. Singapore: Spring-

⁴ Справочник по климату СССР. Ч. I. Температура воздуха. Вып. 17. Омская и Тюменская обл. Метеорологические данные за отдельные годы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1972. 256 с.

⁵ Справочник по климату СССР. Ч. IV. Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров. Вып. 17. Омская и Тюменская обл. Ленинград: Гидрометеиздат, 1968. 260 с.

⁶ Справочник по климату СССР. Ч. VIII. Температура поверхности почвы. Вып. 17. Омская и Тюменская обл. Метеорологические данные за отдельные годы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1976. Т. 1. 254 с.

er, 2023. 330 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-19-7618-6>

5. Sharifi A., Khavarian-Garmsir A.R. Urban Climate, Adaptation and Mitigation. Amsterdam, Cambridge, Oxford: Elsevier, 2023. 378 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2020-0-01553-7>

6. Giannini L.M., Younsi S., Burchini B., Deiana R., Cassiani G., Ciampi P. Integrating geophysical methods, InSAR, and field observations to address geological hazards and buried archaeological features in urban landscapes // Journal of Applied Geophysics. 2025. V. 238. P. 105726. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2025.105726>

7. Martinez S., Vellei M., Rendu M., Brangeon B., Griffon C., Bozonnet E. A methodology to bridge urban shade guidelines with climate metrics // Sustainable Cities and Society. 2025. V. 124. P. 106322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106322>

8. Shen P., Li Y., Gao X., Chen S., Cui X., Zhang Y., Zheng X., Tang H., Wang M. Climate adaptability of building passive strategies to changing future urban climate // Nexus Review. 2025. V. 2. I. 2. P. 100061. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ynexs.2025.100061>

9. Shen P., Li Y., Gao X., Zheng Y., Huang P., Lu A., Gu W., Chen S. Recent progress in building energy retrofit analysis under changing future climate // Applied Energy. 2025. V. 383. P. 125441. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125441>

10. Shen P., Wang M., Liu J., Ji Y. Hourly air temperature projection in future urban area by coupling climate change and urban heat island effect // Energy and Buildings. 2023. V. 279. P. 112676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112676>

11. Liu S., Wang Y., Liu X., Yang L., Zhang Y., He J. How does future climatic uncertainty affect multi-objective building energy retrofit decisions? Evidence from residential buildings in subtropical Hong Kong // Sustainable Cities and Society. 2023. V. 92. P. 104482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104482>

12. Fernandes M., Coutinho B., Rodrigues E. The impact of climate change on an office building in Portugal: Measures for a higher energy performance // Journal of Cleaner Production. 2024. V. 445. P. 141255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141255>

13. Abdeen A., Mushtaha E., Hussien A., Ghenaï C., Maksoud A., Belpoliti V. Simulation-based multi-objective genetic optimization for promoting energy efficiency and thermal comfort in existing buildings of hot climate // Results in Engineering. 2024. V. 21. P. 101815. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101815>

14. Li J., Zhai Z., Li H., Ding Y., Chen S. Climate change's effects on the amount of energy used for cooling in hot, humid office buildings and the solutions // Journal of Cleaner Production. 2024. V. 442. P. 140967. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140967>

15. Tomrukcu G., Ashrafiyan T. Climate-resilient building energy efficiency retrofit: Evaluating climate change impacts on residential buildings // Energy and Buildings. 2024. V. 316. P. 114315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114315>

16. Shen P. Building retrofit optimization considering future climate and decision-making under various mindsets // Journal of Building Engineering. 2024. V. 96. P. 110422. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110422>

17. Аверьянов С.Ф. Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод: монография. М.: Колос, 1982. 238 с.

18. Карнацевич И.В. Расчеты тепловых и водных ресурсов малых речных водосборов на территории Сибири: монография. Ч. I. Теплоэнергетические ресурсы климата и климатических процессов. Омск: ОмСХИ, 1989. 76 с.

19. Карнацевич И.В. Расчеты тепловых и водных ресурсов малых речных водосборов на территории Сибири: монография. Ч. II. Водный баланс и водные ресурсы. Омск: ОмСХИ, 1991. 84 с.

20. Будыко М.И. Испарение в естественных условиях: монография. Ленинград: Гидрометеоздат, 1948. 136 с.

21. Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности: монография. Ленинград: Гидрометеоздат, 1956. 255 с.

22. Харченко С.И. Управление водным режимом на мелиорируемых землях в нечерноземной зоне (гидрологические аспекты): монография. Ленинград: Гидрометеоздат, 1987. 240 с.

23. Ретхати Л. Грунтовые воды и строительство: монография. М.: Стройиздат, 1989. 432 с.

24. Caron C., Lauret P., Bastide A. Machine Learning to speed up Computational Fluid Dynamics engineering simulations for built environments: A review // Building and Environment. 2025. V. 267. P. 112229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112229>

25. Вандер П.Д. Python для сложных задач: наука о данных: монография. СПб: Питер, 2025. 592 с.

26. Куликова И.В. Нейросети на Python. Основы ИИ и машинного обучения: монография. СПб: Наука и техника, 2025. 304 с.

27. Ландсберг Г.Е. Климат города: монография. Ленинград: Гидрометеоздат, 1983. 248 с.

28. Реттер Э.И. Архитектурно-строительная аэродинамика: монография. М.: Стройиздат, 1984. 294 с.

REFERENCES

1. Chang H., Ross A.R. *Climate Change, Urbanization, and Water Resources*. Portland: Springer, 2024. 198. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-49631-8>

2. Kumareswaran K., Jayasinghe G.Y. *Green Infrastructure and Urban Climate Resilience*. Swit-

- zerland: Springer, 2023: 410. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-37081-6>
3. Paolini R., Santamouris M. *Urban Climate Change and Heat Islands*. Amsterdam, Cambridge, Oxford: Elsevier, 2023: 353. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2018-0-04618-6>
 4. Pathak B., Dubey R.S. *Climate Change and Urban Environment Sustainability*. Singapore: Springer, 2023: 330. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-19-7618-6>
 5. Sharifi A., Khavarian-Garmsir A.R. *Urban Climate, Adaptation and Mitigation*. Amsterdam, Cambridge, Oxford: Elsevier, 2023: 378. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2020-0-01553-7>
 6. Giannini L.M., Younsi S., Burchini B., Deiana R., Cassiani G., Ciampi P. Integrating geophysical methods, InSAR, and field observations to address geological hazards and buried archaeological features in urban landscapes. *Journal of Applied Geophysics*. 2025; V. 238: 105726. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2025.105726>
 7. Martinez S., Vellei M., Rendu M., Brangeon B., Griffon C., Bozonnet E. A methodology to bridge urban shade guidelines with climate metrics. *Sustainable Cities and Society*. 2025; V. 124: 106322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106322>
 8. Shen P., Li Y., Gao X., Chen S., Cui X., Zhang Y., Zheng X., Tang H., Wang M. Climate adaptability of building passive strategies to changing future urban climate. *Nexus Review*. 2025; V. 2. I. 2: 100061. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ynexs.2025.100061>
 9. Shen P., Li Y., Gao X., Zheng Y., Huang P., Lu A., Gu W., Chen S. Recent progress in building energy retrofit analysis under changing future climate. *Applied Energy*. 2025; V. 383: 125441. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125441>
 10. Shen P., Wang M., Liu J., Ji Y. Hourly air temperature projection in future urban area by coupling climate change and urban heat island effect. *Energy and Buildings*. 2023; V. 279: 112676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112676>
 11. Liu S., Wang Y., Liu X., Yang L., Zhang Y., He J. How does future climatic uncertainty affect multi-objective building energy retrofit decisions? Evidence from residential buildings in subtropical Hong Kong. *Sustainable Cities and Society*. 2023; V. 92: 104482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104482>
 12. Fernandes M., Coutinho B., Rodrigues E. The impact of climate change on an office building in Portugal: Measures for a higher energy performance. *Journal of Cleaner Production*. 2024; V. 445: 141255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141255>
 13. Abdeen A., Mushtaha E., Hussien A., Ghennai C., Maksoud A., Belpoliti V. Simulation-based multi-objective genetic optimization for promoting energy efficiency and thermal comfort in existing buildings of hot climate. *Results in Engineering*. 2024; V. 21: 101815. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101815>
 14. Li J., Zhai Z., Li H., Ding Y., Chen S. Climate change's effects on the amount of energy used for cooling in hot, humid office buildings and the solutions. *Journal of Cleaner Production*. 2024; V. 442: 140967. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140967>
 15. Tomrukcu G., Ashrafi T. Climate-resilient building energy efficiency retrofit: Evaluating climate change impacts on residential buildings. *Energy and Buildings*. 2024; V. 316: 114315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114315>
 16. Shen P. Building retrofit optimization considering future climate and decision-making under various mindsets. *Journal of Building Engineering*. 2024; V. 96: 110422. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110422>
 17. Aver'yanov S.F. *Filtration from canals and its influence on groundwater regime: monograph*. Moscow: Kolos, 1982; 238. (in Russ.)
 18. Karnatsevich I.V. Calculations of thermal and water resources of small river catchments in Siberia: monograph. PART I. Thermal energy resources of climate and climatic processes. Omsk: OmSKHI, 1989: 76. (in Russ.)
 19. Karnatsevich I.V. *Calculations of thermal and water resources of small river catchments in Siberia: monograph. PART II. Water balance and water resources*. Omsk: OmSKHI, 1991: 84. (in Russ.)
 20. Budyko M.I. *Evaporation under natural conditions: a monograph*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1948: 136. (in Russ.)
 21. Budyko M.I. Teplovoy balans zemnoy poverkhnosti: monografiya. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1956. 255. (in Russ.)
 22. Kharchenko S.I. Water regime management on reclaimed lands in non-Black Earth zone (hydrological aspects): monograph. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987: 240. (in Russ.)
 23. Retkhati L. *Groundwater and construction: a monograph*. Moscow: Stroyizdat, 1989: 432. (in Russ.)
 24. Caron C., Lauret P., Bastide A. Machine Learning to speed up Computational Fluid Dynamics engineering simulations for built environments: A review. *Building and Environment*. 2025; V. 267: 112229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112229>
 25. Vander P.D. *Python for complex problems: data science: a monograph*. St. Petersburg: Piter, 2025: 592 (in Russ.)
 26. Kulikova I.V. *Neural Networks in Python. Fundamentals of AI and machine learning: a monograph*. St. Petersburg: Nauka i tekhnika, 2025: 304. (in Russ.)
 27. Landsberg G.Ye. Climate of the city: a monograph. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983: 248. (in Russ.)
 28. Retter E.I. *Architectural and structural aerodynamics: a monograph*. Moscow: Stroyizdat, 1984; 294. (in Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сологаев Валерий Иванович – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ), (644050, г. Омск, пр. Мира 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2553-9892>,

SPIN-код: 1614-0440,

e-mail: sologaev_vi@cdo.sibadi.org

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Valery I. Sologaev – (Eng.), Professor, Department «Civil and Industrial Engineering» Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), (5, Prospect Mira, Omsk, 644080).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2553-9892>,

SPIN-code: 1614-0440,

e-mail: sologaev_vi@cdo.sibadi.org

Научная статья
УДК 666.972
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-488-498>
EDN: TPXTRP



МОДИФИЦИРОВАННЫЙ БЕТОН НА ОСНОВЕ АКТИВИРОВАННОГО МЕТАКАОЛИНА С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ ТОННЕЛЕЙ

Е.В. Ткач¹, А.Ф. Бурьянов¹ ✉, Ю.С. Филимонова², Г.А. Шусев³

¹Московский государственный строительный университет,
г. Москва, Россия

²Московский политехнический университет,
г. Москва, Россия

³Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ),
г. Москва, Россия

✉ ответственный автор
rga-service@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В связи с постоянно растущими требованиями к качеству и надежности бетонных конструкций для строительства тоннелей ставится задача разработки модифицированных бетонов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Материалы и методы. В данном исследовании рассматриваются вопросы, связанные с модификацией состава тяжелого бетона комплексной химической добавкой, включающей в своем составе суперпластификатор Sunbo PC-1021, водорастворимую полимерную добавку Полидон-А совместно с активированным метакатионом. Установлено, что процесс действия химической активации частиц метакатиона изучен недостаточно. В связи с этим представленные исследования, заключающиеся в поиске решений повышения эксплуатационных характеристик за счет процесса его предварительной обработки щелочной средой pH=10 совместно с микроармирующим компонентом (волластонит) являются актуальными.

Результаты. Установлено положительное влияние комплексного модифицирования на свойства тяжелого бетона путем уменьшения содержания вяжущего (цемента) и замены его метакатионом, предварительно активированным щелочной средой с pH=10 с модификатором и волластонитом, позволяющее улучшить прочностные и гидрофизические характеристики: прочность на сжатие в возрасте 28 сут составила 68,6 МПа в сравнении с контрольным составом – 39,4 МПа; водопоглощение – 2,4%; марка по водонепроницаемости – W14.

Заключение. Решение проблемы получения эффективного бетона для конструкций тоннелей с улучшенными эксплуатационными свойствами может быть осуществлено за счет модифицирования вяжущего в составе с активированным метакатионом совместно с комплексным модификатором смеси (ПЦ + 5% МТКакт + 0,4% СП + 0,3% Полидон-А + 2% волластонит). Предлагаемый состав дает возможность изготавливать в производственных условиях железобетонные конструкции для тоннелей с заданными характеристиками, эксплуатирующиеся в условиях повышенной нагрузки и агрессивной среды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: конструкции тоннелей, активация метакатиона, комплексный модификатор, физико-механические свойства, гидрофизические свойства, суровые условия эксплуатации, агрессивная среда

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

© Ткач Е.В., Бурьянов А.Ф., Филимонова Ю.С., Шусев Г.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Статья поступила в редакцию 17.04.2025; одобрена после рецензирования 19.05.2025; принята к публикации 16.06.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Ткач Е.В., Бурьянов А.Ф., Филимонова Ю.С., Шусев Г.А. Модифицированный бетон на основе активированного метакеолина с повышенными эксплуатационными свойствами для конструкций тоннелей // Вестник СиБАДИ. 2025. Т. 22, № 3. С. 488-498. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-488-498>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-488-498>

EDN: TPXTPP

MODIFIED CONCRETE BASED ON ACTIVATED METAKAOLIN FOR TUNNEL STRUCTURES WITH INCREASED PERFORMANCE PROPERTIES

Evgeniya V. Tkach¹, Alexander F. Buryanov¹ ✉, Yulia S. Filimonova², Georgy A. Shusev³

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU),
Moscow, Russia

²Moscow Polytechnic University,
Moscow, Russia

³Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
Moscow, Russia

✉ corresponding author
rga-service@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Due to the ever-increasing demands for the quality and reliability of concrete structures for tunnel construction, the task is to develop modified concretes with improved performance characteristics.

Materials and methods. This study examines issues related to the modification of the composition of heavyweight concrete with a complex chemical additive, which includes the Sunbo PC-1021 superplasticizer, the water-soluble polymer additive Polidon-A together with activated metakaolin. It has been established that the process of chemical activation of metakaolin particles has not been sufficiently studied. In this regard, the presented studies, which consist of finding solutions to improve performance characteristics due to the process of its preliminary treatment with an alkaline medium pH = 10 together with a micro-reinforcing component (wollastonite), are relevant.

Results. A positive effect of complex modification on the properties of heavy concrete was established by reducing the content of binder (cement) and replacing it with metakaolin, pre-activated in an alkaline medium with pH = 10 with a modifier and wollastonite, which improves the strength and hydrophysical characteristics: compressive strength at the age of 28 days was 68.6 MPa compared to the control composition - 39.4 MPa; water absorption - 2.4%; water resistance grade - W14.

Discussion and conclusions. The problem of obtaining effective concrete for tunnel structures with improved performance properties can be solved by modifying the binder in the composition with activated metakaolin together with a complex modifier of the mixture (PC + 5% MTK_{akt} + 0.4% SP + 0.3% Polidon-A + 2% wollastonite). The proposed composition makes it possible to manufacture reinforced concrete structures for tunnels with specified characteristics in production conditions, operating under conditions of increased load and aggressive environment.

KEYWORDS: tunnel structures, metakaolin activation, complex modifier, physical and mechanical properties, hydrophysical properties, severe operating conditions, aggressive environment

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

© Tkach E.V., Buryanov A.F., Filimonova Y.S., Shusev G.A., 2025



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

The article was submitted: April 17, 2025; approved after reviewing: May 19, 2025; accepted for publication: June 16, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Tkach E.V., Buryanov A.F., Filimonova Y.S., Shusev G.A. Modified concrete based on activated metakaolin for tunnel structures with increased performance properties. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (3): 488-498. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-488-498>

ВВЕДЕНИЕ

Безопасность эксплуатации тоннелей характеризуется способностью их конструкций сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров при выполнении требуемых функций в заданных условиях работы и технического обслуживания. Данные обстоятельства обуславливают необходимость повышения срока службы и эксплуатационных характеристик конструкций из железобетона, таких как прочность, устойчивость к процессу трещинообразования и гидрофизических свойств [1, 2].

Одним из способов получения высокопрочных бетонов является применение эффективных суперпластификаторов, позволяющих снижать водопотребность бетонных смесей, следствием чего является возрастание прочности при ее уплотнении [3]. При добавлении оптимального количества минерального наполнителя структура цементного камня характеризуется оптимальным насыщением цемента наполнителем, что позволяет получать максимально плотную упаковку частиц в цементном тесте. На практике в качестве активных минеральных добавок широко применяют отходы или попутные продукты различных производств, такие как зола-унос, доменные гранулированные шлаки, микрокремнезём [4, 5]. В настоящее время, как показывают исследования [6], применение метакеолина до 5% от массы вяжущего позволяет ускорять процесс его гидратации и тем самым повышать прочностные характеристики отвердевшего бетона на его основе. Также было изучено использование и влияние электролизованной воды на улучшение прочностных характеристик бетона. Исследования [6, 7, 8] показали, что быстрая химическая реакция гидратации частиц цемента в присутствии электролизованной воды и образование более гидратированных продуктов в раннем возрасте приводит к развитию менее пористой и более плотной микроструктуры. Использование электролизованной воды обеспечивает более быстрое схватывание цемента, показывает более высокие значения прочности на сжатие по срав-

нению с обычным раствором на водной основе на ранней стадии отверждения. Химическая активация частиц метакеолина электролизованной водой, по нашему мнению, должна положительно повлиять на физико-механические свойства бетона.

Совместное использование активных минеральных добавок и суперпластификаторов представляет значительный научный интерес, так как оно позволяет заметно улучшить свойства тяжелого бетона [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]. Такой подход к модификации состава способствует увеличению прочности бетона при сжатии до 150 МПа, а также повышает его водонепроницаемость и стойкость к образованию трещин. Современные разработки акцентируют внимание на применении дисперсного армирования различными типами фибры [7], что дополнительно усиливает структуру и прочность бетона, делая его более устойчивым к механическим нагрузкам и износу.

Таким образом, улучшение качественных характеристик тяжелого бетона остаётся актуальной задачей, требующей дальнейшего развития с учетом современных технологических направлений. Эти направления предполагают совместное использование цементного вяжущего с комплексными модификаторами, которые позволяют регулировать эксплуатационные свойства бетона для обеспечения долговечности и надежности конструкций на его основе.

Цель работы – формирование научно обоснованного технологического решения получения тяжелого бетона с метакеолином, активированного водой, обработанной методом электролиза, совместно с пластификатором и армированного волластонитом для конструкций тоннелей.

Для достижения поставленной цели решалась задача по разработке состава бетонной смеси и установлению технологических решений для получения эффективного бетона с повышенными эксплуатационными и физико-механическими характеристиками на основе модифицированного вяжущего с комплексным полимерным модификатором.

Таблица 1

Характеристики добавки суперпластификатора Sunbo PC-1021

Источник: составлено авторами.

Table 1

Characteristics of the superplasticizer additive "Sunbo PC-1021"

Source: compiled by the authors.

Внешний вид	Серый, белый или светло-желтый порошок
Содержание воды (порошок) (%):	≤ %
Вес единицы (г/л):	500 ~ 600
Значение pH (20) (20% жидкий):	7–8
Содержание SO ₄ (%):	2,6
Cl (%):	≤ 0,3%
Рекомендуемая дозировка (в отношении веса binder)	0,16% ~ 0,3%
Воды передаточное отношение	≥ %

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Согласно нормативным требованиям СП 122.13330.2023 «СНиП 32-04-97 Тоннели железнодорожные и автодорожные» к вяжущим для бетонных смесей предъявляются следующие требования: суммарное содержание (3CaO·SiO₂+2CaO·SiO₂) – не менее 2/3 массы клинкера; соотношение (CaO/SiO₂) – не менее 2,0; содержание (MgO) в клинкере – не более 5% массы клинкера. В исследованиях применяли портландцемент класса ЦЕМ I 42,5Н, производитель АО «ЕВРОЦЕМЕНТ групп» (ГОСТ 31108–2016). В качестве заполнителей использовали природный песок с истинной плотностью 2560 кг/м³ и модулем крупности 2,4 (поставщик ООО «Агат», Владимирская область; соответствует требованиям ГОСТ 8736–2014) и гранитный щебень средней плотностью до 3000 кг/м³ фракции от 5 до 20 мм (поставщик ООО «ДорНерудРесурс», Саратовская область; соответствует требованиям ГОСТ 8267–93). Для затворения бетонной смеси использовалась вода. Вода не содержит сульфатов более 2700 мг/л (в пересчете на SO₄), всех солей более 5000 мг/л с pH 7,8, цвет отсутствует.

В качестве пластифицирующей добавки использовалась добавка-суперпластификатор Sunbo PC-1021 производства Sunbo (Китай) (таблица 1), расход которой составлял 0,4% от массы вяжущего вещества, рекомендованный производителем. Добавление пластификатора позволяет увеличить подвижность бетонной смеси, снизить количество воды затворения, сэкономить количество цемента без потери прочности бетона и увеличить адгезию.

В качестве водорастворимой полимерной добавки использовали добавку Полидон-А производства ООО «Оргполимерсинтез»

(Санкт-Петербург), соответствующую требованиям ТУ 9365-002-46270704–2001. Расход данной добавки составлял 0,3% от массы вяжущего. Полидон-А представляет собой водный раствор поливинилпирролидона C₆H₉NO плотностью 1200 кг/м³, вязкостью от 3000 до 6000 МПа при 25 °С, температурой плавления: 150–180 °С.

В качестве активной минеральной добавки применялся метакеолин марки ВМК-45. Метакеолин был произведен ООО «СИНЕРГО» (Челябинская обл., пос. Желтинский, ул. Степная). В таблице 2 представлены основные физические характеристики метакеолина.

Таблица 2

Физические характеристики метакеолина

Источник: составлено авторами.

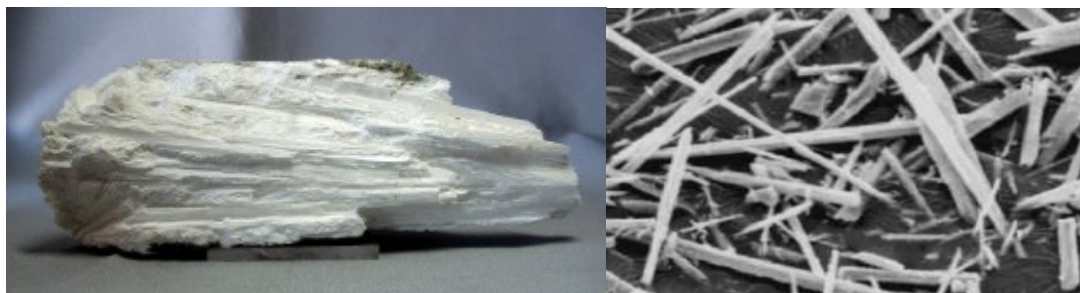
Table 2

Physical characteristics of metakaolin

Source: compiled by the authors.

№	Физические характеристики	Показатель
1	Плотность	2,6 кг/см ³
2	Распределение частиц d ₅₀ d ₉₅	3,4–4,5 мкм 12–18 мкм
3	Удельная поверхность (Blaine)	23 м ² /г
4	Удельная поверхность (BET)	18 м ² /г
5	Цвет	Кремовый

Элементный анализ добавки показал преобладание в ее составе SiO₂ и Al₂O₃ в количестве 52–54% и 40–43% соответственно. Также установлено незначительное содержание химических соединений от 0,1 до 2%, таких как Fe₂O₃, TiO₂, CaO, MgO, Na₂O, K₂O. Высокое содержание оксида кремния позволяет сделать вывод, что метакеолин обладает высокой химической активностью.



а

б

Рисунок 1 – Волластонит:
а – внешний вид; б – игольчатая микроструктура
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Wollastonite:
а – appearance, б – acicular microstructure
Source: compiled by the authors.

Таблица 3
Составы бетонных смесей модифицированного тяжелого бетона с расходом компонентов
Источник: составлено авторами.

Table 3
Compositions of concrete mixtures of modified heavy concrete with component consumption
Source: compiled by the authors.

Материалы	Составы бетонной смеси, кг/м ³				
	1 конт.	2	3	4	5
Портландцемент	416	395	395	395	395
Метакаолин ВМК-45	-	21	21	21	21
Песок	846	846	846	846	846
Щебень	967	967	967	967	967
Суперпластификатор Sunbo PC-1021	-	-	1,7	1,7	1,7
Полидон-А	-	-	-	1,25	1,25
Волластонит	-	-	-	-	8,3
Вода pH7	165				
Вода pH10		165	165	165	165

Для дисперсного армирования бетонного камня был выбран волластонит, который представляет собой минерал из класса силикатов, природный силикат кальция подкласса пироксеноидов группы цепочечных силикатов с формулой $\text{Ca}[\text{SiO}_2]$. Цвет волластонита белый с сероватым или буроватым оттенком. Волластонит в зависимости от длины волокон делится на длинно- и коротковолокнистый, обладающий микроармирующим эффектом.

На рисунке представлены внешний вид волластонита с шероховатой поверхностью (рисунок 1, а) и его игольчатая микроструктура

(рисунок 1, б), которая обладает хемосорбционными свойствами.

Далее были разработаны составы бетонных смесей модифицированного тяжелого бетона с расходом компонентов, представленные в таблице 3.

Следует отметить, что воду активировали в электролизере «Мелеста», который позволял увеличить pH воды с 7,1 до pH щелочной среды, равной 10. Предполагаем на основе работ [7, 13], что процессы гидролиза и гидратации будут происходить интенсивнее за счет введения предварительно активированной воды.

Таблица 4
Результаты исследований бетонных смесей и бетонов
Источник: составлено авторами.

Table 4
Results of studies on concrete mixtures and concretes
Source: compiled by the authors.

Показатели	Маркировка состава				
	1 контр.	2	3	4	5
Марка подвижности бетонной смеси (ОК, см)	П1 (2)	П1 (3)	П2 (4)	П2 (5)	П2(5)
Средняя плотность бетонной смеси, кг/м ³	2394	2394	2396	2397	2405
Водоотделение бетонной смеси, %	0,43	0,36	0,3	0,26	0,25
Прочность бетона на сжатие, МПа, $R_{сж}$	39,4	43,8	54,7	60,5	68,6
Прочность бетона на растяжение при изгибе, МПа, $R_{и}$	5,2	5,4	6,0	6,5	6,9
Средняя плотность бетона, кг/м ³	2362	2388	2389	2392	2416

Для дальнейших исследований из полученных составов бетонных смесей были изготовлены образцы: кубы с размером ребра 10x10x10 см и балочки для испытания на изгиб 30x10x10 см. Образцы твердели при нормальных условиях 28 сут, затем были проведены испытания в аккредитованной лаборатории на сертифицированном современном оборудовании.

Для определения водопоглощения был применен метод последовательного насыщения образцов водой до постоянной массы согласно ГОСТ 12730.3–2020 «Бетоны. Метод определения водопоглощения». Использованные образцы-кубы имели ребро 100 мм, изготавливались из бетонных смесей разработанных составов. Образцы твердели в нормальных условиях на протяжении 28 сут. Серия образцов для испытания составляла 3 куба плюс контрольный для каждого из составов. Водопоглощение серии образцов каждого состава определялось как среднее арифметическое значение водопоглощений каждого образца серии. Пористость образцов разработанных составов определялась путем оценки кинетики водопоглощения методом дискретного взвешивания в соответствии с ГОСТ 12730.4–2020 «Бетоны. Методы определения параметров пористости». Образцы-кубы имели ребро 70 мм, серии испытаний включали в себя два образца каждого состава. Значение пористо-

сти рассчитывалось как среднее арифметическое. Водонепроницаемость разработанных бетонных изделий определялась при помощи метода «мокрого пятна» согласно требованиям ГОСТ 12730.5–2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости». Для определения водонепроницаемости из разработанных составов изготавливались образцы-цилиндры диаметром 150 мм и высотой 150 мм. Было подготовлено по 6 образцов каждого состава в серии. Образцы до испытания выдерживались в камере нормального твердения в нормальных условиях в течение суток перед проведением испытаний. Определение водонепроницаемости проводилось при помощи установки Form+Test WE 6 MMZ (Германия). Образцы устанавливались в посадочные устройства установки, манжеты которой предварительно смазывались водонепроницаемой смазкой. Давление воды поднималось ступенчато с последующей выдержкой (0,2 МПа в течение 1–5 мин) и длительностью воздействия воды под давлением, равной 12 ч на каждой ступени. При появлении «мокрого пятна», равно как и иных признаков проникновения воды в различные места образца, испытание прекращалось. Значение максимального давления воды, при котором не менее чем на четырех образцах из шести не наблюдалась фильтрация воды, было принято показателем водонепроницаемости образца.

Таблица 5

Результаты испытаний на водопоглощение и водонепроницаемость
Источник: составлено авторами.

Table 5

Results of water absorption and water resistance tests
Source: compiled by the authors.

Маркировка образца	Плотность кг/м ³ / пористость, %	Водопоглощение по массе, %	Марка бетона по водонепроницаемости
Состав 1 контрольный	2290/12,2	4,6	W6
Состав 2 ПЦ + 0,4% Sunbo PC-1021	2292/11,3	3,2	W8
Состав 3 ПЦ + (0,4%Sunbo PC-1021 + 0,3% Полидон-А)	2293/10,3	2,2	W12
Состав 4 ПЦ + (0,4%Sunbo PC-1021 + 0,3% Полидон-А + 5% ВМК-45)	2293/10,1	1,9	W14
Состав 5 ПЦ + (0,4% Sunbo PC-1021+ 0,3% Полидон-А + 5% ВМК-45) + 2% Волластонит	2300/8,7	1,8	W14

Для определения морозостойкости использовался первый базовый метод. Образцы для испытания представляли собой серию бетонных кубиков с ребром 100 мм, шесть из которых были приняты в качестве контрольных, а двенадцать имели в своем составе введенные добавки в соответствии с разработанным планом эксперимента. Время выдержки образцов составило 24 ч при погружении на 1/3 высоты образцов, 24 ч при погружении на 2/3 высоты образцов и 48 ч при полном погружении. Процесс испытания шел до появления структурных дефектов образцов – трещин, сколов и шелушения, потери массы и потери прочности образцов более чем на 5% от требуемого значения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты физико-механических испытаний модифицированных бетонных смесей и бетонов на их основе представлены в таблице 4.

Анализ результатов исследований (см. таблицу 4) показал, что при замене в составе 2-й части бездобавочного портландцемента на активированный метакаолин (5%) + (активированная вода, предварительно обработанная в электролизере) происходит увеличение проч-

ности с 39,4 МПа до 43,8 МПа. При добавлении суперпластификатора Sunbo PC-1021 (0,4% от массы вяжущего) возросла прочность бетона (состав 3: ПЦ + 5 МТКакт + 0,4% СП) на сжатие с 43,8 до 54,7 МПа и на растяжение при изгибе – с 5,4 до 6,0 МПа в сравнении с составом 2. Далее при добавлении 0,3% от массы вяжущего Полидон-А (состав 4: ПЦ + 5% МТКакт + 0,4% СП + 0,3% Полидон-А) наблюдается увеличение прочности бетона на сжатие с 54,7 до 60,5 МПа и на растяжение при изгибе – с 6,0 до 6,5 МПа в сравнении с составом 3. Наличие в составе 5 (ПЦ + 5% МТКакт + 0,4% СП + 0,3% Полидон-А + 2% волластонит) дисперсного наполнителя – волластонита привело к росту показателя прочности бетона на сжатие с 60,5 до 68,6 МПа и на растяжение при изгибе – с 6,5 до 6,9 МПа в сравнении с составом 4. Это связано с тем, что волластонит обладает хорошим сцеплением с цементным камнем, снижая его пористость и тем самым обеспечивая эффективное микроармирование бетона.

Установлено также положительное влияние комплексного модифицирования на гидрофизические свойства. Результаты испытаний на водопоглощение и водонепроницаемость бетона представлены в таблице 5.

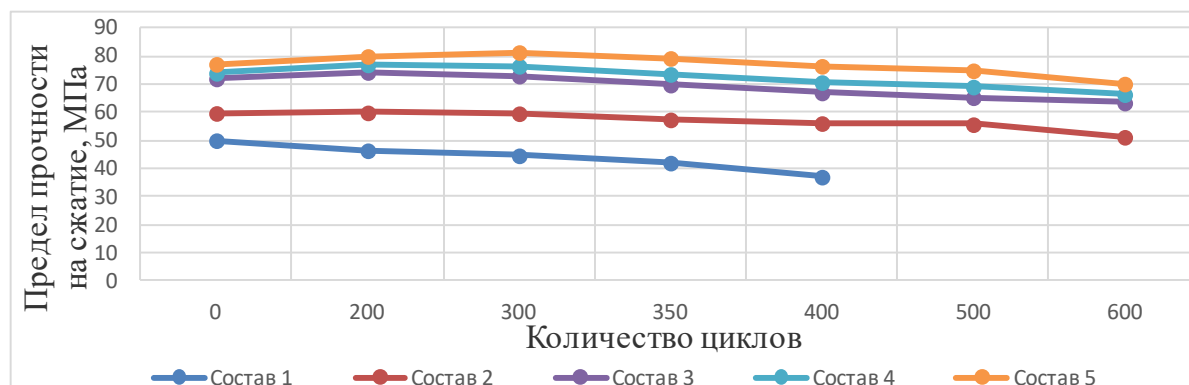


Рисунок 2 – Графическая интерпретация результатов испытаний образцов тяжелого бетона при циклическом попеременном замораживании и оттаивании: контрольный ПЦ; ПЦ + 0,4% Sunbo PC-1021; ПЦ + (0,4% Sunbo PC-1021 + 0,3% Полидон-А); ПЦ + (0,4% Sunbo PC-1021 + 0,3% Полидон-А + 5% ВМК-45); ПЦ + (0,4% Sunbo PC-1021 + 0,3% Полидон-А + 5% ВМК-45) + 2% волластонит
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Graphical interpretation of the results of testing heavy concrete samples under cyclic alternating freezing and thawing: control PC; PC + 0.4% Sunbo PC-1021; PC + (0.4% Sunbo PC-1021 + 0.3% Polydon-A); PC + (0.4% Sunbo PC-1021 + 0.3% Polydon-A + 5% VMK-45); PC + (0.4% Sunbo PC-1021 + 0.3% Polydon-A + 5% VMK-45) + 2% Wollastonite
Source: compiled by the authors.

Анализ полученных данных (см. таблицу 5) показал, что введение комплексного модификатора совместно с волластонитом (состав 5, ПЦ + (0,4% Sunbo PC -1021 + 0,3% Полидон-А + 5% ВМК-45) + 2% волластонит снизило показатель водопоглощения на – 57,8%; на 37,8% снизил 2-й состав ПЦ + 0,4% Sunbo PC-1021); на 48,9 % – 3-й состав ПЦ + (0,4% Sunbo PC-1021 + 0,3% Полидон-А); на 53,3% – 4-й состав ПЦ + (0,4% Sunbo PC-1021 + 0,3% Полидон-А + 5% ВМК-45) в сравнении с контрольным (состав 1). Водонепроницаемость модифицированного бетона в 4-м составе ПЦ + (0,4% Sunbo PC-1021 + 0,3% Полидон-А + 5% ВМК-45) повысилась на 4 ступени нагружения в сравнении с контрольным составом 1. При этом наличие в составе 5 волластонита ПЦ + (0,4% Sunbo PC-1021 + 0,3% Полидон-А + 5% ВМК-45) +2% волластонит не повлияло на его водонепроницаемость.

Результаты испытаний при циклическом попеременном замораживании и оттаивании отображены на рисунке 2.

Анализ полученных данных при циклическом попеременном замораживании и оттаивании образцов-кубов из бетона различного состава показал:

- максимальное снижение массы до 4,36% и кубиковой прочности на 32% в контрольном

составе 1 после 400 циклов испытаний попеременного замораживания и оттаивания, что превышает установленные показатели требования ГОСТ10060–2012 (потеря массы и прочности бетона не более 2 и 15% соответственно);

- составы, содержащие комплексный модификатор, показали высокие характеристики морозостойкости, при 600 циклов испытаний потеря массы в составах 4 и 5 составила 1,82% и 1,6%, при снижении прочности на 10 и 8% соответственно, что подтверждает достаточный запас прочности и морозостойкости предлагаемых составов модифицированного бетона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан состав бетонной смеси и установлены технологические решения для получения эффективного бетона на основе модифицированного вяжущего с комплексным полимерным модификатором для конструкций тоннелей с повышенными эксплуатационными и физико-механическими характеристиками: предел прочности на сжатие – 68,6 МПа; предел прочности на растяжение при изгибе – 6,9 МПа; водопоглощение – 2,4% масс.; марка по водонепроницаемости – W14.

Полученные результаты исследований позволяют рекомендовать предлагаемый состав модифицированного бетона для производства строительных конструкций, работающих в суровых условиях эксплуатации, в частности для автодорожных тоннелей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Орешкин Д.В. Проблемы строительного материаловедения и производства строительных материалов // Строительные материалы. 2010. № 11. С. 6–8.

2. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Чилин И.А., Дондуков В.Г., Селютин Н. Модифицированные бетоны: реальность и перспективы // Вестник НИЦ. Строительство. 2024. № 1 (40). С. 92–104. DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-92-104](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-92-104). EDN: NIYJLR

3. Крутских А.В., Петропавловская В.Б., Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б. Модифицированные цементные бетоны с дискретным армированием // Строительство и реконструкция. 2023. № 3 (107). С. 131–139. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-107-3-131-139>

4. Петропавловская В.Б., Завадько М.Ю., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Бурьянов А.Ф. Перспективы применения переработанных топливных золошлаковых отходов гидроудаления в сухих строительных смесях. Часть 1 // Строительные материалы. 2023. № 4. С. 73–79. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-73-79>

5. Величко Е.Г., Шумилина Ю.С. К проблеме формирования дисперсного состава и свойств высокопрочного бетона // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 2. С. 235–243. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.2.235-243>

6. Филимонова Ю.С., Величко Е.Г. Исследование комплексной модификации тяжелого бетона // Строительство и реконструкция. 2021. №4 (96). С. 107–109. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-96-4-107-112>

7. Ткач Е.В., Темирканов Р.И. Улучшение физико-механических свойства модифицированного бетона на основе применения химически активированного микрокремнезема с микроармирующим волокном // Строительство и реконструкция. 2020. №2 (88). С. 123–135. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-88-2-123-135>

8. Шулдяков К.В., Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Мамаев Н.А. Влияние добавки «микрокремнезем-поликарбоксилатный суперпластификатор – 2 на гидратацию цемента, структуру и свойства цементного камня // Цемент и его применение. 2013. № 2. С. 114–118.

9. Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Иванов А.А. Оптимизация состава гидротехнического бетона с применением композиционных вяжущих // Техника и технология силикатов. 2023. Т. 30, № 4. С. 350–356.

10. Александрова О.В., Нгуен Д.В.К., Булгаков Б.И., Петропавловская В.Б. Влияние кварце-

вого порошка и минеральных добавок на свойства высокопрочных бетонов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2020. № 3. С. 7–15. DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2020.3.7>

11. Урханова Л.А., Иванов А.А., Лхасаранов С.А. Исследование влияния тонкодисперсных добавок на свойства композиционных вяжущих для гидротехнического бетона // Вестник ВСГУТУ. 2023. №2 (89). С. 80–89.

12. Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Данзанов Д.В. Синтез ультрадисперсной добавки, полученной при гидролизе портландцемента, для модификации цементного камня // Цемент и его применение. 2022. № 4. С. 52–56.

13. Томилов А.П. Электрохимическая активация – новое направление прикладной электрохимии // Жизнь и безопасность. 2002. № 3. С. 302–307.

14. Massana, J., Reyes, E., Bernal, J., Leon, N., Sanchez-Espinosa, E. Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete // Construction and Building Materials. 2018. №. 165. P. 93–103.

15. Larbi J.A., Bijen J.M. Effect of water-cement ratio, quantity and fineness of sand on the evolution of lime in set portland cement systems // Cement and Concrete Research. 1990. Vol. 20. №5. P.783–794.

16. Roberts L.R., Grace W.R. Microsilica in concrete // Materials Science of Concrete. 1989. №3. P.197–222.

REFERENCES

1. Orshkin D.V. Problems of construction materials science and production of construction materials. *Stroitel'nye Materialy* (Construction Materials). 2010; 11: 6–8. (in Russ.)

2. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Chilin I.A., Dondukov V.G., Selyutin N.M. Modified concrete: reality and prospects. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024; 40(1): 92–104. (In Russ.) DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-92-104](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-92-104). EDN: NIYJLR

3. Krutskikh A.V., Petropavlovskaya V.B., Petropavlovskii K.S., Novichenkova T.B. Modified cement concrete with discrete reinforcement. *Building and Reconstruction*. 2023; (3): 131–139. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-107-3-131-139>

4. Petropavlovskaya V.B., Zavad'ko M.Yu., Novichenkova T.B., Petropavlovskii K.S., Buryanov A.F. Assessment of the possibility of using hydraulic ash as a component of dry building mixtures. Part 1. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023; 4: 73–79. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-73-79>

5. Velichko E.G., Shumilina Yu.S. To the problem of forming the high-strength concrete dispersed composition and properties. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(2): 235–243. DOI:10.22227/1997-0935.2020.2.235-243 (Rus.).

6. Filimonova Yu.S., Velichko E.G. Research of complex modification of heavy concrete. *Building and Reconstruction*. 2021; (4): 107–112. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-96-4-107-112>

7. Tkach E.V., Temirkanov R.I. Improving the physico-mechanical properties of modified concrete based on the use of chemically activated micro-silica with micro-reinforcing fiber. *Building and Reconstruction*. 2020; (2): 123–135. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-88-2-123-135>

8. Shuldyakov K.V., Kramar L.Ya., Trofimov B.Ya., Mamaev N.A. Influence of the additive “microsilica-polycarboxylate superplasticizer” on cement hydration, structure and properties of cement stone. *Cement and its Applications*. 2013; 2: 114–118. (In Russ.)

9. Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Ivanov A.A. Optimization of the composition of hydraulic concrete using composite binders. *Engineering and technology of silicates*. 2023; V. 30. No. 4: 350–356. (In Russ.)

10. Aleksandrova O.V., Nguyen D.V.K., Bulgakov B.I., Petropavlovskaya V.B. The influence of quartz powder and mineral additives on the properties of high strength concrete. *Bulletin of the Volga State Technological University. series: materials. designs. technologies*. 2020; 3: 7–15. DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2020.3.7>

11. Urkhanova L.A., Ivanov A.A., Lhasaranov S.A. Study of the influence of finely dispersed additives on the properties of composite binders for hydraulic concrete. *ESSUTM Bulletin*. 2023; 2 (89): 80–89. (In Russ.)

12. Urkhanova L.A., Lhasaranov S.A., Danzanov D.V. Synthesis of an ultradispersed additive obtained by hydrolysis of Portland cement for modification of cement stone. *Cement and its Applications*. 2022; 4: 52–56. (In Russ.)

13. Tomilov A.P. Electrochemical activation – a new direction in applied electrochemistry. *Life and Safety*. 2002; 3: 302–307.

14. Massana, J., Reyes, E., Bernal, J., Leon, N., Sanchez-Espinosa, E. Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2018; 165: 93–103.

15. Larbi J.A., Bijen J.M. Effect of water-cement ratio, quantity and fineness of sand on the evolution of lime in set portland cement systems. *Cement and Concrete Research*. 1990; 20. no 5: 783–794.

16. Roberts L.R., Grace W.R. Microsilica in concrete. *Materials Science of Concrete*. 1989; 3: 197–222.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Ткач Е.В. Концептуализация, валидация. Методология, ресурсы. Редактирование.

Бурьянов А.Ф. Методология, исследования, ресурсы, подготовка первоначального проекта, обзор и редактирование.

Филимонова Ю.С. Методология, исследования, ресурсы, курирование данных, подготовка первоначального проекта, обзор и редактирование.

Шусев Г.А. Выполнение эксперимента и обработка его результатов, выполнение обзора литературных источников.

CONTRIBUTIONS CO-AUTHORS

E.V. Tkach Conceptualization, validation. Methodology, resources. Editing.

A.F. Buryanov Methodology, research, resources, preparation of the initial draft, review and editing.

Filimonova Yu.S. Methodology, research, resources, data curation, preparation of the initial draft, review and editing.

G.A. Shusev Carrying out the experiment and processing its results, conducting a review of literary sources.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ткач Евгения Владимировна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Градостроительство» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (129337, г. Москва, Ярославское ш., д.26.)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2132-4971>,

SPIN-код: 4298-0045,

e-mail: ev_tkach@mail.ru

Бурьянов Александр Федорович – д-р техн. наук, доц., проф.-конс. кафедры «Строительное материаловедение» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (129337, г. Москва, Ярославское ш., д.26.)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3331-9443>,

SPIN-код: 8551-8324,

e-mail: rga-service@mail.ru

Филимонова Юлия Сергеевна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Промышленное, гражданское и подземное строительство» Московского политехнического университета (107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38.)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3793-8433>,

SPIN-код: 3217-1850,

e-mail: JuliaS06@mail.ru

Шусев Георгий Александрович – аспирант кафедры «Дорожно-строительные материалы» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, г. Москва, Ленинградский пр., 64.)

SPIN-код: 8294-1047,

e-mail: shusev.madi@yandex.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Evgenia V. Tkach – Dr. of Sci. (Eng.), Professor Department of “Urban Planning” of the National Research Moscow State Construction University (Yaroslavlsh, 26, Moscow, 129337).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2132-4971>,

SPIN-code: 4298-0045,

e-mail: ev_tkach@mail.ru

Alexander F. Burjanov – Dr. of Sci. (Eng.), Professor of the Department of “Construction Materials Science” of the National Research Moscow State Construction University (Yaroslavskoe sh, 26, Moscow, 129337).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3331-9443>,

SPIN-code: 8551-8324,

e-mail: rga-service@mail.ru

Yulia S. Filimonova – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Industrial, Civil and Underground Construction Department of Moscow Polytechnic University (38, Bolshaya Semyonovskaya St., Moscow, 107023).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3793-8433>,

SPIN-code: 3217-1850,

e-mail: JuliaS06@mail.ru

Georgiy A. Shusev – postgraduate student of the department “Road-building materials” of Moscow Automobile and Road Engineering University. Materials Department of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (Leningradsky pr., 64, Moscow, 125319).

SPIN-code: 8294-1047,

e-mail: shusev.madi@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются рукописи по направлениям: Транспорт. Транспортные и технологические машины; Строительство. Строительные материалы и изделия; Редакция принимает к рассмотрению **оригинальные научные статьи** объемом 8–10 стр. машинописного текста через 1 интервал, 5–8 рисунков и (или) таблиц, 20–40 ссылок; **обзорные статьи** – (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – от 10 и более страниц, от 5 и более рисунков, до 80 ссылок.

Статья должна быть неопубликованной ранее в других изданиях, написана в контексте современной литературы, обладать новизной и соответствовать профилю журнала. Автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирования и ссылок на официальные документы и другие источники. Редакция принимает на себя обязательство ограничить круг лиц, имеющих доступ к присланной в редакцию рукописи, сотрудниками редакции, членами редколлегии, а также рецензентами данной работы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий статья будет **ретрагирована** (отозвана из печати).

Следует уделить особенное внимание качеству перевода. Недопустимо при переводе пользоваться машинами-переводчиками. Перевод должен быть выполнен профессиональными переводчиками, а лучше – носителем английского языка. Необходимо учесть, что законодательство охраняет права переводчиков авторским правом наравне с правами авторов оригинальных произведений. Перевод текста – творческий процесс, производный объект авторского права, т.е. переводчик – соавтор нового произведения.

1 УДК. На первой странице, слева в верхнем углу без отступа, указываются индекс по универсальной десятичной классификации (УДК) (размер шрифта 10 пт).

2. Заглавие статьи. Заголовок (максимально 10–12 слов) должен быть информативным, лаконичным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы. Приводится на русском и английском языках, по центру полужирным шрифтом размером 12 пт. прописными буквами.

3. Фамилии авторов. Количество авторов не должно превышать четырех. Для англоязычных метаданных важно соблюдать вариант написания сведений об авторе в последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия (Anna V. Ivanova). При латинизации фамилии можно воспользоваться системой 1 BSI – Британский Институт Стандартов (British Standards Institution) транслитерации на сайте <https://translit.ru>, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи обычным шрифтом (размер шрифта 12 пт.).

4. Аннотация. Аннотация включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе научная статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению, объем от 200 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Приводится на русском и английском языках. Начинается словом «Аннотация» с прописной буквы (шрифт полужирный, курсив, 10 пт); точка; затем с прописной буквы текст (курсив, 10 пт).

5. Ключевые слова служат ориентиром для читателя и используются для поиска статей в электронных базах, поэтому должны отражать дисциплину (область науки, в рамках которой написана статья), тему, цель и объект исследования. Рекомендуемое количество ключевых слов – 10–12, количество слов внутри ключевой фразы – не более трех.

Размещаются после аннотации, на русском и английском языках.

6. Благодарности. Раздел включен в требования всеми крупными издательствами. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

7. Основные положения. Отражают ключевые результаты исследования, основное содержание статьи, изложенные тезисно и оформленные в виде 3–5 пунктов маркированного списка.

8. Основной текст статьи излагается на русском или английском языках, в электронном и бумажном виде (шрифт «Arial» (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный), в следующей последовательности:

Введение (1–4 стр.) В этом разделе описываются общая тема исследования, цели и задачи планируемой работы, теоретическая и практическая значимость, приводятся наиболее известные и авторитетные публикации по изучаемой теме, обозначаются нерешенные проблемы. Данный раздел должен содержать обоснование необходимости и актуальности исследования. Информация во Введении должна быть организована по принципу «от общего к частному».

Подразделы введения представлены на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Методы и материалы (от 2 стр. и более) В этом разделе в деталях описываются методы, которые использовались для получения результатов. Обычно сначала дается общая схема экспериментов/исследования, затем они представляются настолько подробно и с таким количеством деталей, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, организационных или структурных диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. Если было получено много похожих зависимостей, представляемых в виде графиков, то приведите только один типичный график, а данные об имеющихся количественных отличиях между ними, представьте в таблице.

Способы представления результатов представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Обсуждение и заключение. Раздел содержит интерпретацию полученных результатов исследования, предположения о полученных фактах, сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

9. Список источников (References)

В список источников включаются только те источники, которые автор использовал при подготовке статьи. Оформление библиографического списка регламентируется ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 20–40 источников, но не более 50. Из них за последние 3 года – рекомендуется указать не менее 20, иностранных – не менее 15. Важно правильно оформить ссылку на источник.

Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет.

Источники указываются в конце статьи в алфавитном порядке либо в порядке упоминания в тексте статьи.

Приводится на русском языке и в латинице по образцу, представленному на сайте журнала.

Аффилиация. Фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, ORCID i, Scopus Author ID, ResearcherID, далее указать все места работы, должность, название организации, служебный адрес, электронная почта, телефон, e-mail.

Приводится на русском и английском языках.

Технические требования к оформлению.

Формат А4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом употреблении должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подписью, и отдельными файлами с расширением (JPEG, GIF, BMP). Должны быть пронумерованы (Таблица 1 – Заголовок, Рисунок 1 – Наименование), озаглавлены (таблицы должны иметь заглавие, выравнивание по левому краю, а иллюстрации – подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы предоставляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

Общий порядок опубликования

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятыми редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

- с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;
- согласие на обработку персональных данных в научном периодическом издании;

При регистрации присваивается дата поступления и регистрационный номер статьи. Статьи регистрируются через электронную редакцию. Регистрация осуществляется бесплатно.

Первичная экспертиза на соответствие требованиям и профилю журнала (модерация). Зарегистрированные рукописи статей проходят первичную экспертизу на соответствие требованиям и профилю журнала. Началом для экспертизы рукописи статьи редакции 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. Корректра 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.