

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



научный рецензируемый журнал

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

**СИБАДИ** •

“Vestnik SibADI”

Том 20, № 4. 2023  
Vol.20, No. 4. 2023

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: 10.26518/2071-7296-2023-20-4

ТОМ 20, № 4. 2023

VOL. 20, No. 4. 2023

Сквозной номер выпуска – 92

Continuous issue – 92



**Учредитель и издатель:**

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

644080, г. Омск, проспект Мира, 5  
Тел. +7 (3812) 65-03-23;

**АДРЕС РЕДАКЦИИ**

644080, 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)

644080, Omsk, 5, Mira Ave.  
Phone: +7 (3812) 65-03-23

**EDITORIAL POSTAL ADDRESS**

644080, 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

[www.vestnik.sibadi.org](http://www.vestnik.sibadi.org)  
e-mail: [vestnik\\_sibadi@sibadi.org](mailto:vestnik_sibadi@sibadi.org)

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», 2023

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 всыскательной 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 30.08.2023. Дата выхода в свет 14.09.2023. 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)», 2023

*"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](http://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 30.08.2023. Publication date is 14.09.2023. Format is 60 × 84 1/8.

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

Content is available under license CC BY.

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

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

© Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", 2023

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

### *Транспортное, горное и строительное машиностроение*

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

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

### *Транспорт*

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

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

### *Строительство и архитектура*

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

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

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

**Винников Юрий Леонидович**, д-р техн. наук, проф., Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка, г. Полтава, Украина  
**Scopus 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-ЮГРПЫ», г. Сургут, Россия  
**Scopus Author ID** 10040194400, **Researcher ID** AAM-4262-2021, **ORCID ID** 0000-0001-7843-7278

**Гумаров Гали Сагиналиевич**, 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** 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. наук, проф. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Куприна Татьяна Васильевна** редактор-ответственный секретарь, e-mail: vestnik\_sibadi@sibadi.org

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

**Ланкина Наталья Константиновна** переводчик  
e-mail: lankinank@yandex.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), Associate Professor, Corresponding Member of Academy of Military Science, Rector of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)”, Omsk, Russia

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

### *Transport, mining and mechanical engineering*

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

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

**Mikhail S. Korytov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)”, Omsk, Russia

**Scopus Author ID** 57035238500, **Researcher ID** B-5667-2015,  
**ORCID ID** 0000-0002-5104-7568

### *Transport*

**Evgeniy E. Vitvitskiy**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)”, Omsk, Russia

**Scopus Author ID** 57193406974, **Researcher ID** N-9779-2017,  
**ORCID ID** 0000-0002-0155-8941

**Liudmila S. Trofimova**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)”, Omsk, Russia

**Scopus Author ID** 57212171087, **ORCID ID** 0000-0001-7312-1557

### *Construction and architecture*

**Sergey V. Efimenko**, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Vice-Rector for Science Federal State Educational Institution of Higher Education «Tomsk State University of Architecture and Building», Tomsk, Russia

**Scopus Author ID** 56487412400,  
**Researcher ID** AAB-7416-2020,  
**ORCID ID** 0000-0001-7064-1418

**Aleksandr F. Buryanov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Executive Director, NO Russian Gypsum Association, Moscow, Russia

**Scopus Author ID** 55975665000,  
**Researcher ID** AAE-4850-2022, **ORCID ID** 0000-0002-3331-9443

## EDITORIAL BOARD

**Tatiana V. Bobrova**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)”, Omsk, Russia

**Scopus Author ID** 57201362187, **Researcher ID** Y-3916-2018,  
**ORCID ID** 0000-0002-0292-4421

**Vitaliy S. Borovik**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Volgograd Science and Technology Center, Volgograd, Russia

**Scopus Author ID** 57192819653, **SPIN-код** 3552-6019,  
**ORCID ID** 0000-0002-2409-4078

**Yuriy L. Vinnikov**, Dr. of Sci. (Engineering), Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk, Poltava, Ukraine

**Scopus Author ID** 6603741286, **Researcher ID** P-7880-2015,  
**ORCID ID** 0000-0003-2164-9936

**Gleb L. Gorynin**, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the «SurGUKMAO-Yugra», Surgut, Russia

**Scopus Author ID** 10040194400, **Researcher ID** AAM-4262-2021,  
**ORCID ID** 0000-0001-7843-7278

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

**Boris B. Danilov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Mining and Construction Geotechnics, Mining Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

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

**Vladimir N. Efimenko**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia

**Scopus Author ID** 56487473100

**Askar Zh. Zhusupbekov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of the National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, ENU named after L.N. Gumilev, Astana, Kazakhstan

**Scopus Author ID** 6507768437, **Researcher ID** E-4049-2015,  
**ORCID ID** 0000-0001-6154-1263

**Vladimir V. Zyryanov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Don State Technical University, Rostov on Don

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

**Sergey V. Kondakov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia

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

**Natalia O. Kopanitsa**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia

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

**Sergey V. Korneev**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia

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

**Dmitriy N. Korotaev**, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Exploration University, Moscow, Russia

**Scopus Author ID** 6506823308, **Researcher ID** T-5750-2017,  
**ORCID ID** 0000-0002-5957-4135

**Mark E. Koryagin**, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia

**Scopus Author ID** 12794946600, **Researcher ID** M-1500-2013,  
**ORCID ID** 0000-0002-1976-7418

**Valeriy M. Kurganov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tver State University, Tver, Russia

**Scopus Author ID** 57196729393, **Researcher ID** A-6227-2017,  
**ORCID ID** 0000-0001-8494-2852

**Sergey N. Leonovich**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus

**Scopus Author ID** 55887733300, **Researcher ID** A-4757-2016,  
**ORCID ID** 0000-0002-4026-820X

**Valeriy S. Lesovik**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of RAASN, BSTU named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

**Scopus Author ID** 55887733300, **Researcher ID** A-4757-2016  
**ORCID ID** 0000-0002-2378-3947

**Sergey A. Makeev**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)”, Omsk, Russia

**ORCID ID** 0000-0002-2915-982X, **Scopus Author ID** 57200729552,  
**Researcher ID** AAU-8361-2020

**Sergey A. Matveev**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)”, Omsk, Russia

**Scopus Author ID** 56297305000, **Researcher ID** Y-3137-2018,  
**ORCID ID** 0000-0002-7836-2242

**Talaibek 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Tatyana V. Kuprina**  
Executive Journal Secretary  
e-mail: vestnik\_sibadi@sibadi.org

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

**Natalia K. Lankina**  
Journal Interpreter  
e-mail: lankinank@yandex.ru

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

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

*А. Н. Назаров, С. Д. Иванов*  
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМА ВЕСОИЗМЕРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРА  
СКОЛЬЗЯЩЕГО СРЕДНЕГО В РЕГИСТРАТОРЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ  
МОСТОВОГО КРАНА ..... 418**

*С. В. Савельев, Р. Е. Литовченко, А. А. Юрченко*  
**ПАРАМЕТРЫ ОТПЕЧАТКА КОНТАКТА ПЕРСПЕКТИВНОГО РАБОЧЕГО  
ОРГАНА ДОРОЖНОГО КАТКА С ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ  
ПРИ УПЛОТНЕНИИ ДОРОЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ ..... 432**

## **РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ**

*А. В. Колин, П. В. Рыбаков*  
**СРАВНЕНИЕ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ И ТРУДОЁМКОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ  
ОПЕРАЦИЙ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ И РЕМОНТУ  
ТРОЛЛЕЙБУСОВ И АВТОБУСОВ..... 444**

*А. Н. Котомчин, В. А. Зорин*  
**ИССЛЕДОВАНИЯ АДГЕЗИОННЫХ И ИЗНОСОУСТОЙЧИВЫХ СВОЙСТВ  
ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ  
АВТОМОБИЛЕЙ И ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ..... 458**

*А. В. Пузаков*  
**СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ..... 474**

## **РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**

*Е. В. Кравчук, И. Ю. Белуцкий, В. А. Кравчук*  
**ХЛАДОСТОЙКОСТЬ СТАЛЬНОЙ БАЛКИ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ  
ВЫТЯЖКОЙ СТЕНКИ..... 488**

*Сяо Вэньсюй*  
**ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИЕ ГАЗОБЕТОНЫ НА ОСНОВЕ  
ЗОЛЫ-УНОСА КИТАЯ..... 500**

*О. А. Побегайлов, Н. О. Сизен, В. М. Дедловский*  
**ДИАГНОСТИКА ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СТАБИЛЬНОСТЬ РАБОТЫ  
СТРОИТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ..... 514**

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

*Aleksandr N. Nazarov, Sergey D. Ivanov*

**USE OF WEIGHT MEASUREMENT ALGORITHM ON THE BASIS  
OF MOVING AVERAGE FILTER IN THE RECORDER OF OVERHEAD CRANE  
OPERATION PARAMETERS ..... 419**

*Sergei V. Saveliev, Roman E. Litovchenko, Anastasia A. Yurchenko*

**PERSPECTIVE CONTACT IMPRINT PARAMETERS OF ROAD ROLLER WORKING  
BODY WITH BEARING SURFACE WHEN COMPACTING ROAD MATERIALS ..... 433**

## **PART II. TRANSPORT**

*Aleksei V. Kolin, Pavel V. Rybakov*

**REPAIRABILITY AND LABOUR INTENSITY COMPARISON FOR TROLLEYBUSES  
AND BUSES MAINTENANCE AND REPAIR OPERATIONS ..... 445**

*Aleksei N. Kotomchin, Vladimir A. Zorin*

**STUDIES OF ADHESIVE AND WEAR-RESISTANT PROPERTIES  
OF CHROME COATINGS FOR CAR PARTS AND ROAD CONSTRUCTION  
EQUIPMENT RESTORATION ..... 459**

*Andrei V. Puzakov*

**VEHICLE POWER SUPPLY MANAGEMENT STRATEGIES ..... 475**

## **PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**

*Evgenii V. Kravchuk, Igor Yu. Belutskii, Valerii A. Kravchuk*

**COLD RESISTANCE OF STEEL BEAM PRESTRESSED BY WALL DRAWING ..... 489**

*Xiao Wenxu*

**SOUND-ABSORBING AERATED CONCRETE BASED ON CHINA FLY ASH ..... 501**

*Oleg A. Pobegaylov, Nikolai O. Sizen, Vadim M. Dedlovskii*

**DIAGNOSTICS OF FACTORS AFFECTING THE STABILITY  
OF A CONSTRUCTION ORGANIZATION WORK ..... 515**



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



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

Научная статья  
УДК 621.86  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-418-431>  
EDN: CBIJMP



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМА ВЕСОИЗМЕРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРА СКОЛЬЗЯЩЕГО СРЕДНЕГО В РЕГИСТРАТОРЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ МОСТОВОГО КРАНА

А. Н. Назаров\*, С. Д. Иванов

МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия

[alexnazavr@yandex.ru](mailto:alexnazavr@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8039-4331>

[ptm-diagnostics@yandex.ru](mailto:ptm-diagnostics@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7912-609X>

\*ответственный автор

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Проанализирована проблема низкого качества первичной информации приборов регистраторов параметров работы крана. Принятое направление повышения качества информации о массе груза – совершенствование алгоритма весоизмерения. Описаны недостатки алгоритмов серийно выпускаемых регистраторов параметров. Предложено построение алгоритма на основе фильтра скользящего среднего.

**Материалы и методы.** Описан принцип работы предложенного алгоритма весоизмерения, состоящего из предварительного (определение пригодного для весоизмерения участка динамического процесса, расчет длины окна сглаживания) и основного этапов (применение фильтра, вычисление массы и ошибки измерения). Приведены два способа определения длины окна сглаживания, а также параметры использованных в экспериментальной части мостового крана, тензодатчика и датчика скорости вращения двигателя.

**Результаты.** Представлены графики усилия в механизме подъема и скорости вращения двигателя в момент весоизмерения. Показана работа функции контроля установившегося движения. Приведены результаты работы алгоритма при фиксированной точности измерения 3% с определением времени работы алгоритма и фиксированном времени работы алгоритма 10 сек с определением точности измерения.

**Обсуждение.** Время весоизмерения с точностью, требуемой для регистраторов параметров, составило 2...5 сек. Повышение скорости весоизмерения достигнуто за счет подстраиваемых параметров алгоритма при каждом включении механизма подъема. Для кранов с продолжительностью времени подъема непрерывно более 10 сек алгоритм позволяет рассчитать массу груза с точностью 1%, что обеспечивает точность определения показателей интенсивности работы крана 3%.

**Заключение.** Оценка точностных и временных параметров показала применимость разработанного алгоритма весоизмерения в задаче определения массы груза для регистраторов параметров работы крана. Преимуществом разработанного алгоритма является гарантированная точность весоизмерения. Алгоритм весоизмерения позволяет адаптировать регистратор параметров под технологический процесс работы крана и эффективно использовать пригодные для измерения участки динамического процесса.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** весоизмерение, регистратор параметров работы крана, фильтр скользящего среднего, механизм подъема, кран мостового типа, нагрузка на механизм подъема

**БЛАГОДАРНОСТИ:** авторы статьи выражают свою благодарность сотрудникам кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана и коллективу ЗАО «ИТЦ «КРОС» за их помощь, советы, рекомендации, ценные замечания и критику.

**Статья поступила в редакцию 27.07.2023; одобрена после рецензирования 28.08.2023; принята к публикации 30.08.2023.**

**Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

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

**Для цитирования:** Назаров А. Н., Иванов С. Д. Использование алгоритма весоизмерения на основе фильтра скользящего среднего в регистраторе параметров работы мостового крана // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 4 (92). С. 418-431. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-418-431>

© Назаров А. Н., Иванов С. Д., 2023



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-418-431>

EDN: CBIJMP

## USE OF WEIGHT MEASUREMENT ALGORITHM ON THE BASIS OF MOVING AVERAGE FILTER IN THE RECORDER OF OVERHEAD CRANE OPERATION PARAMETERS

Aleksandr N. Nazarov\*, Sergey D. Ivanov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

[alexnazavr@yandex.ru](mailto:alexnazavr@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8039-4331>

[ptm-diagnostics@yandex.ru](mailto:ptm-diagnostics@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7912-609X>

\*corresponding author

### ABSTRACT

**Introduction.** The problem of primary information low quality of crane operation parameters recorders is analyzed. The accepted direction to improve the quality of information about the mass of the cargo is to improve the algorithm of weight measurement. Shortcomings of algorithms of serially produced parameter recorders are described. The design of the algorithm based on the moving average filter is proposed.

**Materials and Methods.** The principle of operation of the proposed weight measurement algorithm is described. The algorithm consists of preliminary (determination of the dynamic process section suitable for weight measurement, calculation of the smoothing window length) and main stages (application of filter, calculation of mass and measurement error). Two methods for determining the length of the smoothing window are given. The parameters of the overhead crane, load cell and motor speed sensor used in the experimental part are given.

**Results.** Graphs of lifting mechanism force and motor rotation speed at the moment of weight measurement are given. The work of the steady-state motion control function is shown. The results of algorithm operation at fixed measurement accuracy of 3% with determination of algorithm operation time and fixed algorithm operation time of 10 seconds with determination of measurement accuracy are given.

**Discussion.** The time of weight measurement with the accuracy required for parameter recorders was 2...5 seconds. Increase in speed of weight measurement is achieved due to adjustable parameters of the algorithm at each switching on of the lifting mechanism. For cranes with duration of lifting time continuously more than 10 seconds the algorithm allows to calculate the mass of the load with an accuracy of 1%. This ensures the accuracy of the crane intensity indicators with an accuracy of 3%.

**Conclusion.** Evaluation of accuracy and time parameters showed the applicability of the developed algorithm of weight measurement in the task of determining the mass of the load to recorders of crane operation parameters. The advantage of the developed algorithm is the guaranteed accuracy of weight measurement. The algorithm of weight measurement allows to adapt the parameter recorder to the technological process of crane operation and effectively use the areas of the dynamic process suitable for measurement.

**KEYWORDS:** weight measurement, crane operation parameter recorder, moving average filter, hoisting mechanism, bridge crane, hoisting mechanism load

**ACKNOWLEDGEMENT.** The authors of the article express their gratitude to the staff of the Lifting and Transportation Systems Department of N.E. Bauman Moscow State Technical University and the staff of ZAO ITTS KROS for their help, advice, recommendations, valuable comments and criticism.

The article was submitted 27.07.2023; approved after reviewing 28.08.2023; accepted for publication 30.08.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

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

© Nazarov A. N., Ivanov S. D., 2023



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

## ВВЕДЕНИЕ

Основой обеспечения безопасности грузоподъемных кранов согласно действующей нормативной<sup>1</sup> и технической документации [1] является соблюдение паспортных характеристик и требований руководства по эксплуатации, в частности режима работы крана [2].

Наиболее распространённым объективным средством определения режима работы крана являются приборы регистраторы параметров работы крана (РП)<sup>2,3</sup> [3]. Со стороны эксплуатирующих организаций регулярно поступают претензии, касающиеся качества регистрируемой РП информации.

Оценке качества информации имеющихся на рынке приборов безопасности РП посвящены работы [4, 5, 6]. В работах<sup>4</sup> и<sup>5</sup> приведены точностные показатели работы РП серий ОГШ и ОНК. Согласно их данным точность измерения массы груза в цикле работы крана составляет 7% при требовании 3%<sup>6</sup>. Расчет показателей интенсивности (коэффициента распределения нагрузки и характеристического числа) на основании информации такого качества гарантированно приводит к ошибке определения группы классификации режима работы крана.

Точность определения массы груза зависит от двух параметров: качества сигнала датчика нагрузки и алгоритма его обработки. Преиму-

ществом совершенствования второго параметра является повышение точности работы уже установленных РП только за счет обновления программного обеспечения без вмешательства в конструкцию механизма подъема и датчиковое оснащение прибора безопасности.

Алгоритм весоизмерения прибора ОГШ-2 построен на определении максимального значения секундных осреднений нагрузки в цикле [7, 8, 9]. Недостатком данного алгоритма является неспособность адаптироваться под динамический процесс механизма подъема. Варьирование массы груза, скорости отрыва, длины канатного подвеса оказывают влияние на динамический процесс и, следовательно, на точность весоизмерения.

В работах [10, 11] и<sup>7</sup> предложен подход к обработке динамических процессов механизма подъема. В его основе лежит применение фильтра скользящего среднего [12]. В [11] показано, что данный фильтр в сравнении с непосредственным осреднением, регрессией и осреднением по экстремумам обладает наилучшим сочетанием надежности, скорости и точности работы.

Цель работы – оценить применимость алгоритма весоизмерения на основе фильтра скользящего среднего в регистраторе параметров работы мостового крана.

<sup>1</sup> Приказ Ростехнадзора от 26.11.2020 N 461 ФНП в области промышленной безопасности от 26.11.2020 N 461 об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения».

<sup>2</sup> Усачев Г. Ю. Система мониторинга регистрируемых параметров грузоподъемных машин // WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS: сборник статей победителей IX Международной научно-практической конференции: в 2 частях. Пенза. 30 апреля 2017 года. Том Часть 1. Пенза: «Наука и Просвещение» (ИП Гуляев Г.Ю.). 2017. С. 84 – 87. EDN YMGZTX.

<sup>3</sup> Горелов В. Н., Горелов Н. В. Использование данных регистратора параметров при эксплуатации грузоподъемных кранов // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сборник научных трудов XII Международной научно-практической конференции. Курск. 19–20 марта 2015 года / Ответственный редактор: Горохов А.А. Том 1. Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2015. С. 334 – 336. EDN TPRVUR.

<sup>4</sup> Иванова Н. Ю., Иванов С. Д. Формирование информационной базы для уточнения расчета остаточного ресурса и улучшения методики планирования ремонтов подъемно-транспортного оборудования с использованием приборов безопасности – регистраторов параметров (на примере кранов) // Всероссийская научно-практическая конференция «Цифровая экономика: технологии, управление, человеческий капитал» МГТУ СТАНКИН. Москва. 2019 год. С. 236 – 241.

<sup>5</sup> Коенова Ю. И., Иванов С. Д. Оценка достоверности работы регистратора параметров // XIX Московская международная межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы» Материалы конференции, Москва. 9 апреля 2015 года. Москва: / МГТУ им. Н. Э. Баумана. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 328 с.: ил. Библиогр. в конце статей. ISBN 978-5-7367-1085-0.

<sup>6</sup> ГОСТ 33713–2015 Краны грузоподъемные. Регистраторы параметров работы. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 8 июня 2016 г. № 561-ст межгосударственный стандарт ГОСТ 33713 – 2015 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 апреля 2017 г. Москва: Стандартинформ, 2016. 19 с.

<sup>7</sup> Михальчик Н. Л., Иванов С. Д. Построение весоизмерительной системы путем расширения функционала электронного регистратора параметров работы мостового крана // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта. Екатеринбург 6 декабря 2019 года / Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. Екатеринбург: Издательство Уральского университета. 2020. С. 169 – 171. EDN HAFJZB.

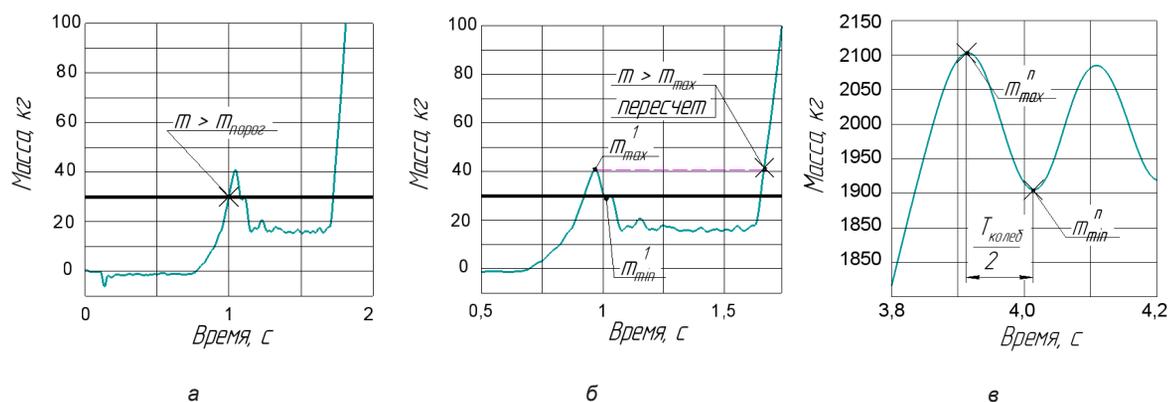


Рисунок 1 – Предварительные этапы работы алгоритма весоизмерения:  
 а – начало весоизмерения – превышение порога начала взвешивания;  
 б – определение динамических характеристик;  
 в – определение параметров фильтра скользящего среднего  
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Preliminary stages of the weighing algorithm:  
 а) The beginning of the weighing – exceeding the threshold of the beginning of weighing;  
 б) Determination of dynamic characteristics;  
 в) Determination of the parameters of the moving average filter  
 Source: compiled by the authors.

#### Задачи:

- адаптировать алгоритм весоизмерения, использующего фильтр скользящего среднего, к динамическим процессам, характерным для механизмов подъема мостовых кранов;
- реализовать в алгоритме возможность весоизмерения в процессе подъема груза;
- оценить точностные и временные параметры работы алгоритма весоизмерения.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предлагаемый алгоритм весоизмерения содержит два этапа: предварительный и основной (рисунок 1). На предварительном этапе определяют момент начала весоизмерения и параметры применяемого фильтра.

На предварительном и основном этапе работы алгоритма реализуется функция контроля установившегося движения. Необходимость ее применения продиктована тем, что в переходных процессах на датчик нагрузки помимо периодически колеблющейся относительно одного значения, соответствующего весу поднимаемого груза, действует составляющая от сил инерции, вызванных ускорением или замедлением элементов механизма подъема и груза. Следовательно, определение нагрузки в переходных процессах будет приводить к схождению алгоритма к совокупному значению веса груза и динамической нагрузки, если время измерения равно времени

переходного процесса, или к затягиванию времени измерения, если оно превышает время переходного процесса. Контроль установившегося движения (покоя) механизма подъема осуществляется с помощью датчика скорости вращения электродвигателя механизма подъема. При недопустимом значении ускорения, полученного дифференцированием показаний датчика скорости, процесс весоизмерения возвращается на этап определения динамических характеристик.

На основном этапе вычисляют текущие значения нагрузки, среднее значение нагрузки за время измерения и момент окончания весоизмерения. В работе использован фильтр скользящего среднего [12]. Выбор данного фильтра обоснован характером динамического процесса, характерного для кранового механизма подъема. Так, в работе [11] показано, что на основе фильтра скользящего среднего возможно получить наиболее стабильные измерения нагрузки, что обусловлено фильтрацией преобладающей по амплитуде гармоники колебаний.

Основным параметром фильтра скользящего среднего является длина окна сглаживания. В работе [13] показано, что качество определения данного параметра значительно влияет на скорость весоизмерения. Применение описываемого алгоритма в задачах коммерческого взвешивания или регистрации

параметров работы крана время взвешивания является лимитирующим фактором. В первом случае увеличение времени взвешивания приводит к затягиванию времени вспомогательных операций и к снижению общей эффективности предприятия. Во втором случае наибольшей точности весоизмерения возможно добиться на участках технологического процесса, когда все механизмы крана отключены. Такие промежутки времени могут не быть продолжительными в каждом рабочем цикле, следовательно, становятся задачи определения пригодного участка для весоизмерения и максимально эффективного использования данного участка. Для определения пригодного для весоизмерения участка в алгоритме присутствуют этап определения динамических характеристик (момент начала фильтрации) и функция контроля установившегося движения (момент окончания фильтрации).

Задача наиболее эффективного использования участка, пригодного для весоизмерения, определяет необходимость применения двух способов определения длины окна сглаживания. Первый способ заключается в определении периода колебаний канатного подвеса (периода главной гармоники, определяющей длину окна сглаживания) на основе текущего усилия в нем, а второй – определении периода колебаний по значениям нагрузки в экстремумах послеотрывного этапа динамического процесса. Первый способ является теоретическим (1), соответственно ему как косвенному методу измерения, свойственна ошибка, связанная с комплексной ошибкой средств измерения и алгоритмов определения усилия при отрыве груза от основания и текущей жесткости канатного подвеса:

$$L^1_{buf} = 4\pi \sqrt{\frac{S_{отр}}{9,81 \cdot c_k}}, \quad (1)$$

где  $L^1_{buf}$  – длина окна сглаживания, определенная теоретически;

$S_{отр}$  – усилие в канатном подвесе в момент отрыва груза от основания;

$c_k$  – жесткость канатного подвеса, соответствующая усилию в канате в момент отрыва груза от основания.

Несмотря на то, что теоретический способ определения длины окна сглаживания менее точен в сравнении с экспериментальным, он обладает преимуществом в условиях повышения эффективности использования пригодного для весоизмерения участка – на момент начала данного участка длина окна сглажи-

вания уже известна, а для определения того же параметра экспериментальным методом тратится время, равное нескольким (2...4) периодам колебаний основной гармоники. Таким образом, к моменту вычисления окна сглаживания более точным способом в буфере непосредственного измерения за весь пригодный для весоизмерения этап будут найдены отфильтрованные данные за 2...4 периодов колебаний динамической системы.

Второй – экспериментальный – способ вычисления длины окна сглаживания заключается в определении моментов достижения пиковых значений нагрузки – максимумов и минимумов – за несколько периодов колебаний (2...4) и принятии вычисляемого параметра равным двум значениям осредненного периода колебаний по формуле

$$L^2_{buf} = \frac{4}{W} \cdot \sum_i^W |t_{max}^i - t_{min}^i|, \quad (2)$$

где  $L^2_{buf}$  – длина окна сглаживания, определенная экспериментально;

$t_{max}^i$  – время максимума  $i$ -й полуволны;

$t_{min}^i$  – время минимума  $i$ -й полуволны;

$W$  – опорное количество полуволн при определении длины окна сглаживания (4...8).

После прохождения полуволн дальнейшая фильтрация исходного сигнала производится с помощью длины окна сглаживания, вычисленного вторым (экспериментальным) способом, благодаря чему уменьшается требуемое для весоизмерения время.

Функция фильтрации описывается формулой

$$\bar{S}_{buf i} = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N S_j, \quad (3)$$

где  $\bar{S}_{buf i}$  – текущее осреднение буфера длиной  $i$ ;

$N$  – количество элементов в буфере, соответствующего окну сглаживания. Определяется по формуле

$$N = L_{buf} \cdot f_{АЦП}, \quad (4)$$

где  $f_{АЦП}$  – частота опроса аналого-цифровым преобразователем датчика нагрузки.

Масса груза вычисляется как среднее арифметическое данных буфера непосредственного осреднения по формуле

$$\bar{S}_n = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^n S_j, \quad (5)$$

где  $\bar{S}_n$  – текущее осреднение буфера непосредственного осреднения длиной  $n$ ;

$n$  – количество элементов в буфере непосредственного осреднения;

$S_j$  – значение  $j$ -го элемента буфере непосредственного осреднения.

Завершение алгоритма весоизмерения возможно по трем условиям:

1) срабатывание функции контроля установленного движения, за чем следует возвращение на предварительный этап алгоритма;

2) достижение предельного времени весоизмерения. По его истечении значением массы груза принимается  $\bar{S}_n$  с наибольшей длиной буфера непосредственного осреднения  $n_{max}$ ;

3) достижение требуемой точности весоизмерения  $\sigma_n$ , которая определяется по формуле

$$\sigma_n = \sum_{i=0}^n \frac{(\bar{S}_{buf\ i} - \bar{S}_n)^2}{n} \quad (6)$$

Для оценки применимости в задаче регистрации параметров крана приведенный ал-

горитм был дополнен этапом получения расчетных значений, на котором вычисляются максимальные и минимальные оценки характеристического числа  $N_t^{\frac{max}{min}}$  и коэффициента распределения нагрузки  $k_p^{\frac{min}{max}}$  по формулам (7) и (8) соответственно:

$$N_t^{\frac{max}{min}} = N_{t-1}^{\frac{max}{min}} + \left( \frac{m_{гр} \pm 2 \cdot \sigma_n}{m_{ном}} \right)^3, \quad (7)$$

где  $N_{t-1}^{\frac{max}{min}}$  – предыдущее значение максимальной / минимальной оценки характеристического числа;

$m_{гр}$  – вычисленная масса груза ( $m_{гр} = \frac{S_n}{9,81}$ );  
 $m_{ном}$  – масса номинального груза;

$$k_p^{\frac{min}{max}} = \frac{N_t^{\frac{max}{min}}}{c_t}, \quad (8)$$

где  $c_t$  – общее число циклов работы крана.

На рисунке 2 приведена схема работы разработанного алгоритма весоизмерения.

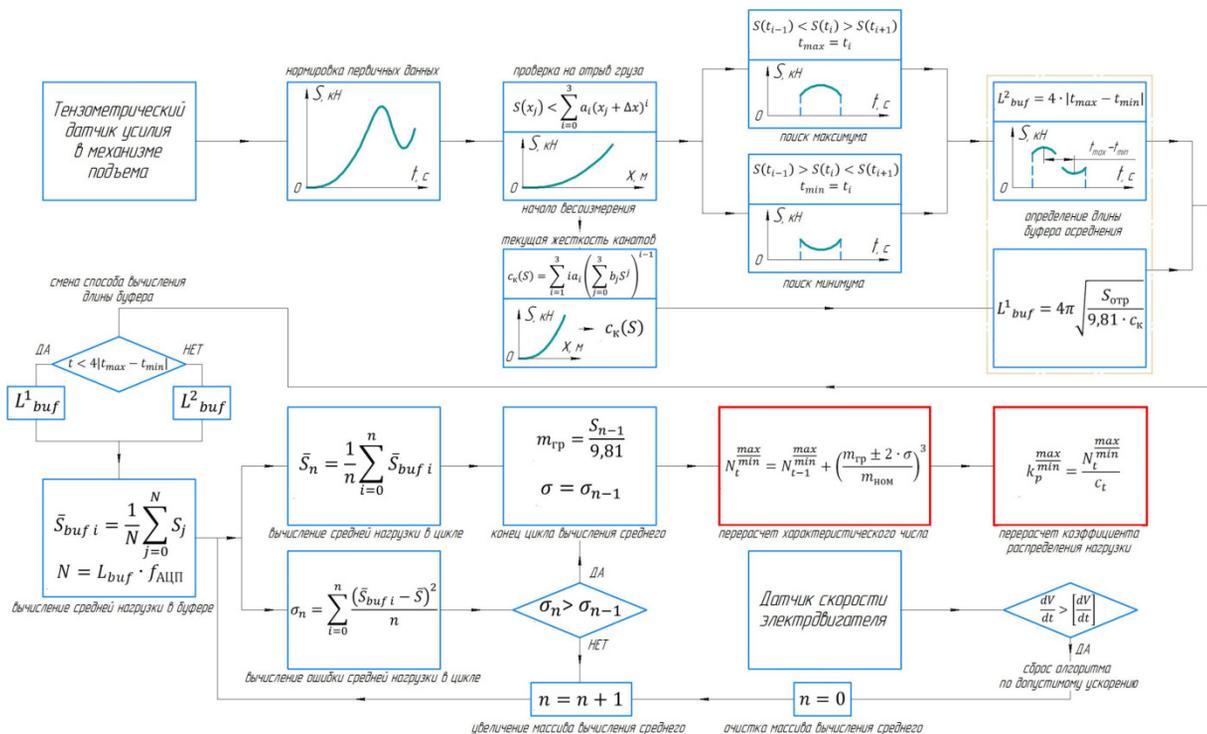


Рисунок 2 – Алгоритм весоизмерения, построенный на основе фильтра скользящего среднего  
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Weight measurement algorithm based on a moving average filter  
 Source: compiled by the authors.

Таблица 1

Основные параметры экспериментальной установки  
Источник: составлено авторами.

Table 1

Main parameters of the experimental equipment

Source: compiled by the authors.

Грузоподъёмность крана	Масса груза	Двигатель механизма подъема	Мощность двигателя подъема	Синхронная частота вращения	Номинальная частота вращения
2 т	2 т	МТКН -112-6	5 кВт	1000 об/мин	910 об/мин
Номинальный крутящий момент, Нм	$M_{\text{макс}}/M_{\text{ном}}$	Момент инерции ротора	Диаметр барабана	Передаточное число редуктора	Кратность полиспаста
52,5	2,3	0,056 кг м <sup>2</sup>	0,198 м	38,1	2

Для оценки полученных в данной работе зависимостей и алгоритма в целом проведен эксперимент, заключающийся в подъеме груза известной массы. В качестве экспериментальной установки использован двухбалочный мостовой кран КМГ-201, установленный в лаборатории кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н. Э. Баумана<sup>8</sup> [14, 15]. Механизм подъема приводится в движение электродвигателем с короткозамкнутым ротором. Основные параметры экспериментальной установки приведены в таблице 1.

Используемый кран оснащен релейно-контакторной системой управления, что в совокупности с высокой жесткостью главных балок обуславливает наибольший из возможных

среди кранов общего назначения коэффициент динамичности. Максимально возможная начальная амплитуда колебаний определяет продолжительность затухающего динамического процесса, значительно превышающую желаемое время взвешивания. Таким образом оценивается свойство разработанного алгоритма, определяющего массу груза в условиях незатухающих колебаний с несколькими гармониками, амплитуда которых в несколько раз превышает предел допустимой погрешности измерения.

Производилось измерение усилия тензометрическим способом. Датчик-тензоось с наклейкой тензорезисторов на плоские стенки глухих отверстий (рисунок 3).



а



б

Рисунок 3 – Оборудование для измерения усилия в канате:  
а – вид узла встройки датчика нагрузки; б – датчик нагрузки – тензометрическая ось  
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Rope force measuring equipment  
a) View of the load cell assembly; б) Load sensor - strain gauge axis  
Source: compiled by the authors.

<sup>8</sup> Назаров А. Н., Иванов С. Д. Экспериментальное и теоретическое определение частоты опроса датчика нагрузки для защиты механизма подъема крана от перегрузок // XXXIII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС – 2021): Труды конференции, Москва, 30 ноября – 02 2021 года. Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук. 2021. С. 157 – 162. EDN EUPIWD.

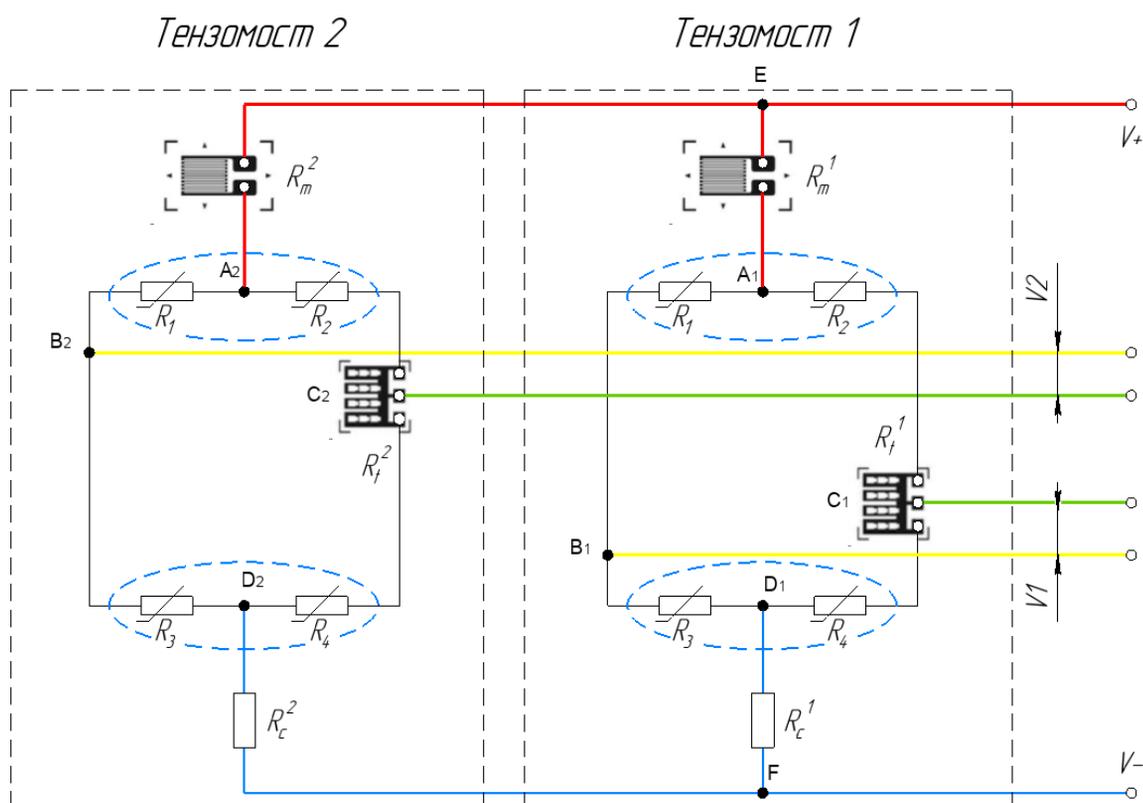


Рисунок 4 – Схема соединения чувствительных элементов датчика нагрузки:  
 $V1$ ,  $V2$  – сигналы первого и второго тензомоста соответственно,  
 $V+$ ,  $V-$  – питание схемы,  $R_c^{1,2}$  – сопротивление для регулировки чувствительности соответствующих тензомостов,  
 $R_t^{1,2}$  – сопротивление для регулировки температурного нуля,  
 $R_m^{1,2}$  – сопротивление для регулировки температурной чувствительности  
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Connection diagram of the sensitive elements of the load sensor.  
 $V1$ ,  $V2$  are the signals of the first and second strain bridge, respectively,  
 $V+$ ,  $V-$  – circuit power supply,  $R_c^{1,2}$  – resistance to adjust the sensitivity of the corresponding strain gages,  
 $R_t^{1,2}$  – resistance to adjust the temperature zero,  $R_m^{1,2}$  – resistance for temperature sensitivity adjustment  
 Source: compiled by the authors.

Чувствительные элементы соединены в два тензомоста с регулировкой температурного нуля и температурной чувствительности (рисунок 4).

Параметры аналого-цифрового преобразователя: частота опроса 500 Гц, глубина дискретизации 12 бит. Датчик скорости – инкрементальный энкодер LM393.

Алгоритм весоизмерения реализовывался на одноплатном компьютере RaspberryPi 4B.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 5 приведены сигналы соответственно первого и второго тензомоста, а также сигнал, соответствующий среднему арифметическому их значению.

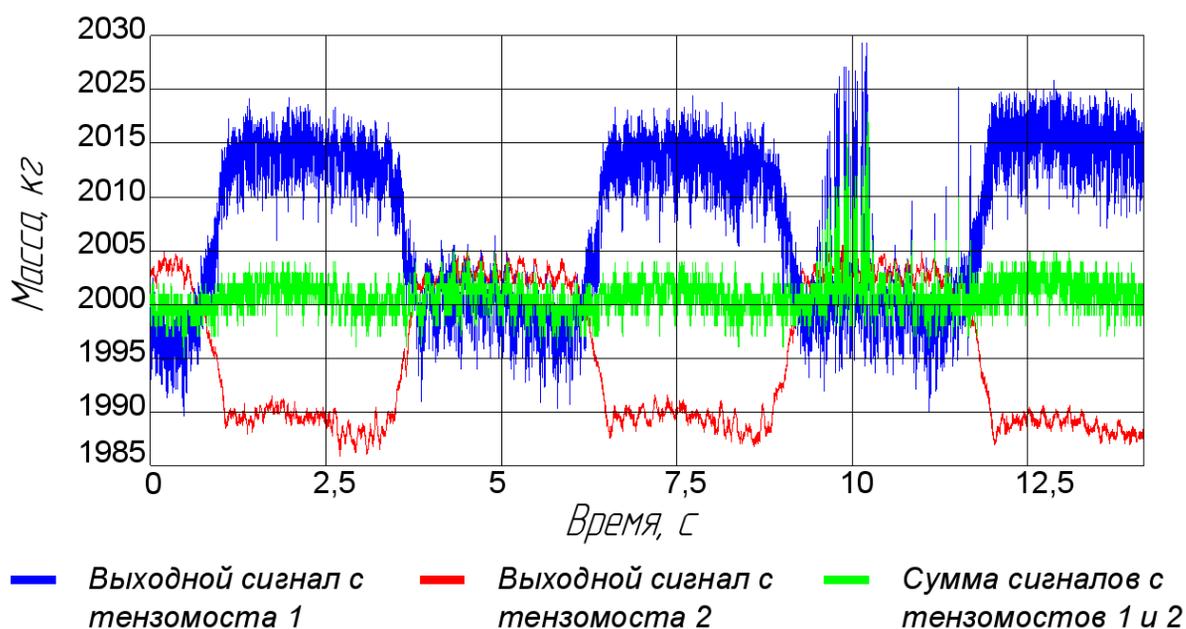


Рисунок 5 – Сигналы соответственно первого и второго тензомоста, а также сигнал, соответствующий среднему арифметическому их значению  
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Signals of the first and second strain bridge, respectively, as well as a signal corresponding to their arithmetic mean  
Source: compiled by the authors.

На рисунке 6 приведен результат предварительной фильтрации сигнала датчика нагрузки. Длина окна сглаживания фильтра кратна периоду шума, связанного с электромагнитными помехами, и составляет 50 мс.

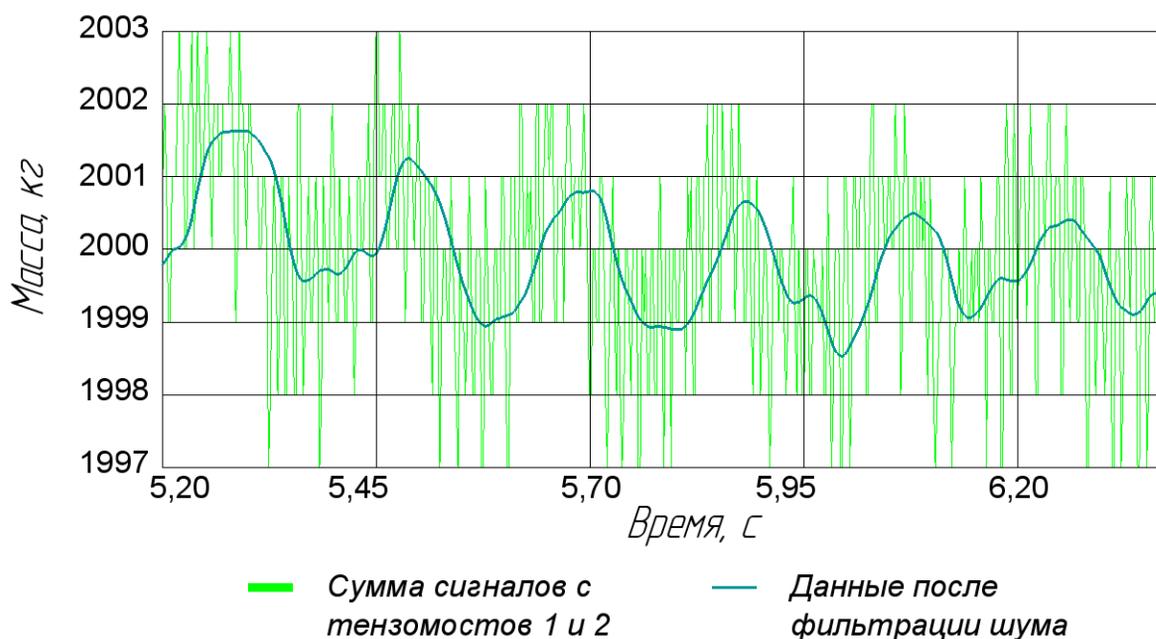


Рисунок 6 – Фильтрация шума, вызванного электромагнитными помехами  
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Filtering of noise caused by electromagnetic interference  
Source: compiled by the authors.

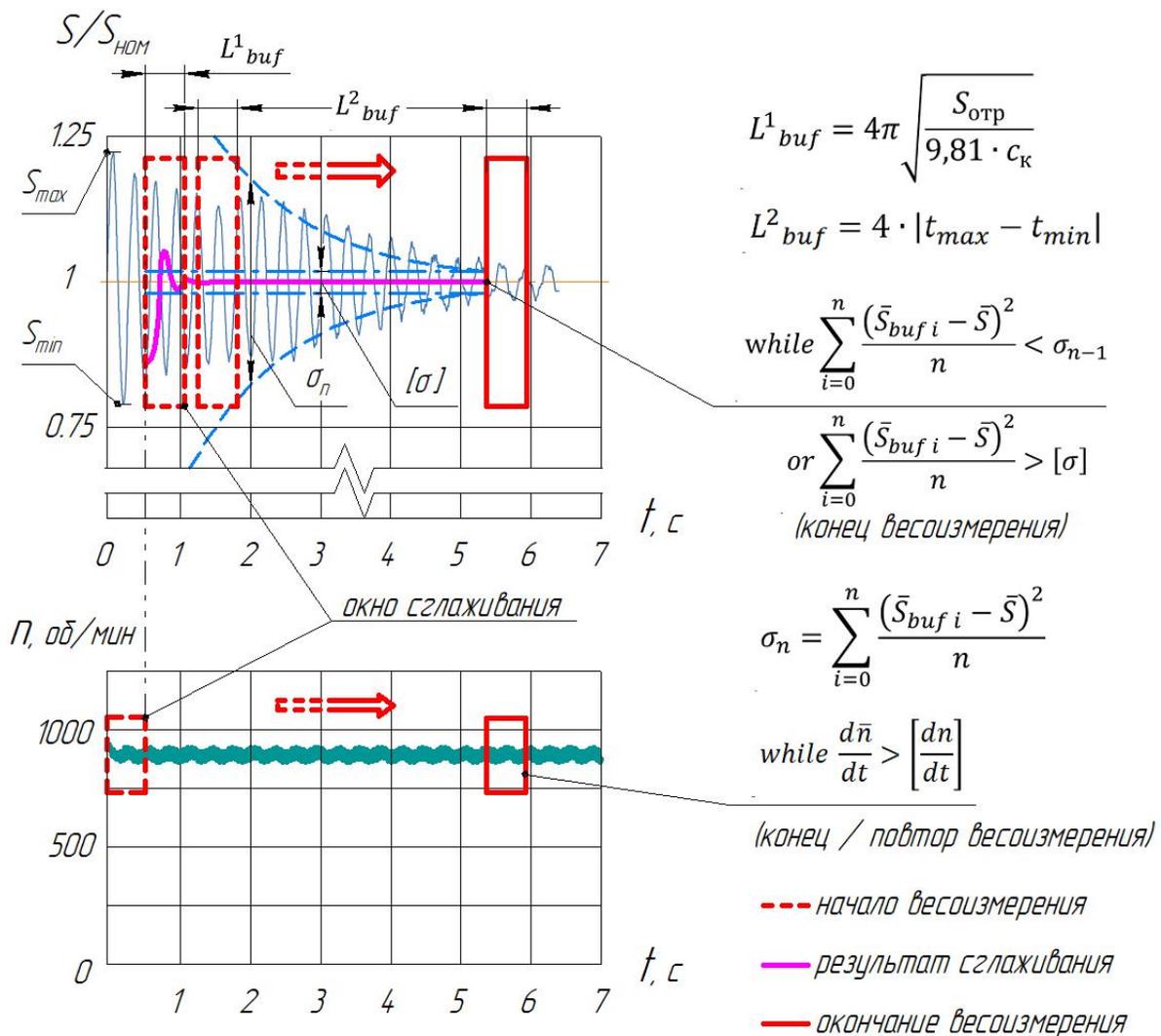


Рисунок 7 – Иллюстрация алгоритма работы весоизмерения:  $S$  – показание датчика нагрузки,  $S_{НОМ}$  – показание датчика нагрузки от груза номинальной массы,  $S_{max}$  – максимальная динамическая нагрузка,  $S_{min}$  – нагрузка, соответствующая первому минимуму после отрыва груза от основания,  $n$  – скорость вращения электродвигателя механизма подъема, об/мин,  $t$  – время, с  
 Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Illustration of the algorithm of the weighing operation.  $S$  – load sensor reading,  $S_{НОМ}$  is the indication of the load sensor from the load of the nominal mass,  $S_{max}$  is the maximum dynamic load,  $S_{min}$  is the load corresponding to the first minimum after the load is detached from the base,  $n$  is the rotation speed of the electric motor of the lifting mechanism, rpm,  $t$  is the time  
 Source: compiled by the authors.

Последовательность обработки сигнала на основном этапе цикла представлена на рисунке 7. Одновременная запись сигналов тензометрического датчика и датчика скорости позволяют вычислить участок, пригодный для измерения (скорость электродвигателя механизма подъема постоянная + отрыв груза от основания). Показаны участки динамического процесса, на которых для фильтрации используются теоретически и экспериментально вычисленные длины окна сглаживания. Также приведено условие окончания алгоритма – до-

стижение точностью весоизмерения требуемого значения.

На рисунке 8 представлена обработка динамического процесса, содержащего переходный процесс торможения механизма подъема. В момент остановки основной этап алгоритма завершается, и алгоритм возвращается к предварительному этапу, после чего основной этап повторяется с вновь рассчитанными параметрами фильтра до момента определения массы груза с точностью, равной требуемому значению.

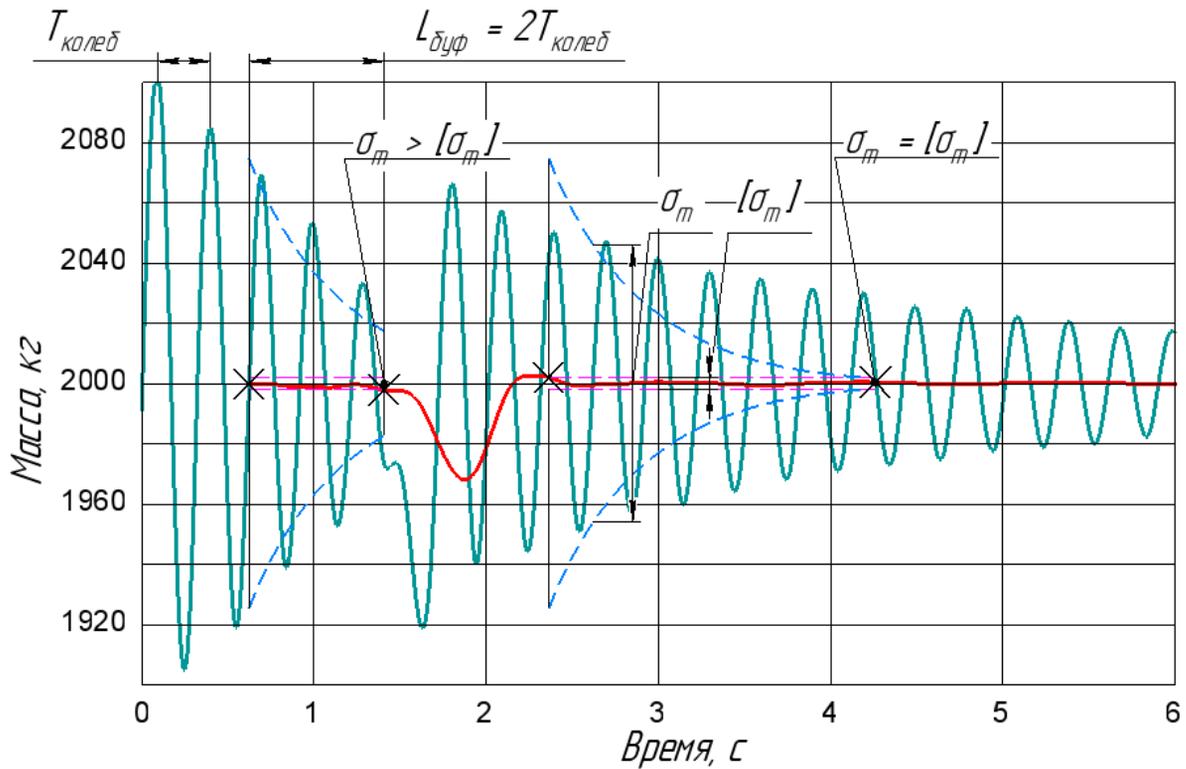


Рисунок 8 – Работа алгоритма весоизмерения при наличии динамических нагрузок  
 Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Operation of the weighing algorithm in the presence of dynamic loads  
 Source: compiled by authors.

В таблице 2 приведены результаты работы алгоритма весоизмерения и их статистическая обработка. В таблице условием завершения алгоритма являлось достижение точности весоизмерения 3%, что соответствует требуемой

точности данных регистратора параметров согласно ГОСТ 33713–2015. При этом эффективность работы алгоритма оценивалась по времени, требуемому на схождение к требуемой точности.

Таблица 2  
 Измерение массы груза с уровнем точности 3%  
 Источник: составлено авторами.

Table 2  
 Measuring the weight of a load with an accuracy level of 3%  
 Source: compiled by the authors.

№	1	2	3	4	5	Δ
$m_{гр}, кг$	1968	1985	2028	2036	1961	$1996 \pm 38$
$t_{изм}, с$ ( $\sigma = 3\%$ )	4,7	3,6	2,0	3,2	4,1	$3,5 \pm 1,4$
$\frac{min}{k_p^{max}}$	0,87/1,04	0,89/1,07	0,95/1,14	0,96/1,15	0,86/1,03	-
$\frac{min}{N_t^{max}}$	0,87/1,04	1,76/2,11	2,71/3,25	3,67/4,40	4,53/5,43	-9% / +8%

Таблица 3  
Измерение массы груза с предельным временем весоизмерения 10 сек  
Источник: составлено авторами.

Table 3  
Measurement of the weight of the cargo with a maximum weighing time of 10 s  
Source: compiled by the authors.

№	1	2	3	4	5	Δ
$m_{гр}$ , КГ	2014	2006	1981	2010	2001	2002 ± 17
$t_{изм}$ , с ( $\sigma = var$ )			10			-
$\sigma$ , %	0,8	1,0	1,2	1,1	0,5	1,2
$\frac{min}{k_p^{max}}$	1,00/1,05	0,98/1,04	0,94/1,01	0,98/1,05	0,99/1,01	-
$\frac{min}{N_t^{max}}$	1,00/1,05	1,98/2,10	2,92/3,11	3,90/4,16	4,89/5,17	-2% / +3%

В таблице 3 условием завершения алгоритма являлось достижение предельного времени весоизмерения, принятого равным  $t_{изм} = 10$  с.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Из рисунка 6 видно, что на вход разработанному алгоритму весоизмерения подается предобработанный сигнал. Схема наклейки и соединения тензорезисторов (см. рисунок 4) позволяет компенсировать колебания груза (см. рисунок 5), вызванные его раскачиванием (аналогично математическому маятнику). Фильтрация этой гармоникой до входа алгоритма позволяет значительно сократить время его работы пропорционально отношению периодов поперечных колебаний груза и продольных колебаний усилия в канатном подвесе.

На основании данных таблицы 2 видно, что среднее время работы алгоритма весоизмерения при схождении точности к 3% составляет 2...5 сек. Такое значение точности характерно для регистраторов параметров работы крана. Полученный результат в несколько раз меньше, чем средняя продолжительность включения механизма подъема. Этого удалось достичь за счет того, что алгоритм, включающий подстраиваемый под каждый подъем фильтр, способен на ранней стадии динамического процесса преобразовать и далее использовать данные, близкие к среднему значению нагрузки, и фактически всё время основного

этапа тратится на накопление статистики для вхождения измерения в требуемую трубку точности.

Известный алгоритм весоизмерения, используемый регистраторами параметров работы крана фирмы ЗАО «ИТЦ «КРОС», имеет постоянный интервал осреднения, равный 1 сек, и нагрузка за цикл работы определяется как наибольшее из секундных осреднений нагрузки. Недостатков данного алгоритма, заключающихся в ложной фиксации динамической нагрузки, и ошибкой, вызванной отклонением интервалом осреднения от значения, кратного периоду главной гармоникой, лишен разработанный алгоритм. Этого удалось достичь за счет введения в алгоритм предварительного этапа и функции контроля установившегося движения, выделяющих наиболее пригодный для весоизмерения участок динамического процесса; а также за счет адаптивного фильтра, подстраиваемого под параметры динамической системы: вес груза, текущую жесткость и длину канатного подвеса.

Из таблицы 3 сделан вывод, что для некоторых технологических процессов с достаточно продолжительным этапом подъема груза или остановки привода с поднятым грузом порядка 10 сек возможно получить требуемую ГОСТ 33713–2015 точность определения расчетных параметров, таких как коэффициент распределения нагрузки и характеристическое число.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка точностных и временных параметров показала применимость разработанного алгоритма весоизмерения в задаче определения массы груза для регистраторов параметров работы крана. Требуемая ГОСТ 33713–2015 точность 3% достигается в режиме подъема груза с установившейся скоростью за 2...5 сек, что в разы меньше среднего времени работы механизма подъема за цикл.

Преимуществом разработанного алгоритма является оцененная точность, что позволяет получать расчетные параметры регистратора параметров (коэффициент распределения нагрузки и характеристическое число) с гарантированной точностью.

Алгоритм весоизмерения позволяет адаптировать прибор, его реализующий, под технологический процесс работы крана и эффективно использовать пригодные для измерения участки динамического процесса. Расчет точности в каждом рабочем цикле позволяет без повышения характеристик элементной базы повысить точность интегральных (расчетных) параметров.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Полквой М. А., Сторожев А. А. Анализ Федеральных норм и правил, регламентирующих процесс безопасной эксплуатации подъемных сооружений // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. 2015. № 1 (21). С. 65 – 75. EDN TKBISD.

2. Воронцов Д. С. Применение данных с регистраторов параметров работы крана с целью определения ресурса работы грузоподъемных кранов с истекшим сроком службы // European Science. 2015. № 3 (4). С. 10 – 17. EDN TXGUAB.

3. Скосырский Н. П., Даньшин В. В., Будаков Д. С. Использование регистраторов параметров работы на мостовых грузоподъемных кранах, работающих со сменными грузозахватными приспособлениями // Инновации в строительстве и промышленности. 2016. № 7(9). 5 с. EDN VTINPX.

4. Объективная информация о работе подъемно-транспортных машин как основа повышения качества информационных систем грузообработывающих предприятий / Н. Ю. Иванова, С. Д. Иванов, С. А. Надеженков, А. Н. Назаров // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2023. № 2. С. 81 – 96. EDN MRGIFW.

5. Иванов С. Д. Стенд для изучения работы ограничителя грузоподъемности и регистратора параметров работы мостового крана // Механизация строительства. 2012. № 8 (818). С. 32 – 37. EDN PEWNOL.

6. Бром А. Е., Иванов С. Д., Шакаров К. К. Использование регистраторов параметров при эксплуатации мостовых кранов // Механизация строительства. 2016. Т. 77, № 6. С. 36 – 40. EDN VZYBZX.

7. Скосырский Н. П., Даньшин В. В., Будаков Д. С. Применение приборов безопасности ЗАО «ИТЦ «КРОС» // Промышленные и строительные технологии. 2016. № 8 (10). 5 с. EDN VTPROD.

8. Тимин Ю. Ф., Сушинский В. А. Опыт применения регистраторов параметров в кранах мостового типа // Подъемно-транспортное дело. 2009. № 3(53). С. 12 – 14. EDN NDIICZ.

9. Скосырский Н. П., Даньшин В. В., Будаков Д. С. Влияние предварительных порогов срабатывания ограничителя грузоподъемности на динамику мостового крана // Промышленные и строительные технологии. 2016. № 7 (9). 8 с. EDN VTPRKH.

10. Иванов С. Д., Михальчик Н. Л. Создание и экспериментальное обоснование алгоритма работы весоизмерительной системы на базе регистратора параметров // Подъемно-транспортное дело. 2019. № 3-4 (97). С. 27–30. EDN WRJTFW.

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

12. Переверзев А. Л. Адаптивный цифровой фильтр на основе скользящего среднего // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2005. № 2. С. 70 – 72. EDN HZNLZN.

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

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

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

## REFERENCES

1. Polkvoj M. A. Analiz Federal'nyh norm i pravil, reglamentirujushhih process bezopasnoj jekspluatacii pod'emnyh sooruzhenij [Analysis of the Federal norms and rules regulating the process of safe operation of lifting structures]. *Chrezvychajnye situacii: promyshlennaja i jekologicheskaja bezopasnost'*. 2015; 1 (21): 65 – 75. EDN TKBISD. (In Russ.)

2. Voroncov D. S. Primenenie dannyh s registratorov parametrov raboty kрана s cel'ju opredelenija resursa raboty gruzopod'emnyh kранov s istekshim srokom sluzhby [Application of the data from the crane operation parameters recorders in order to determine the resource of the hoisting cranes with the expired service life]. *European Science*. 2015; 3 (4): 10 – 17. EDN TXGUAB. (In Russ.)

3. Skosyrskij N. P., Dan'shin V. V., Budanov D. S. Ispol'zovanie registratorov parametrov raboty na mostovykh gruzopod'emnykh kranah, rabotajushhih so smennymi gruzozahvatnymi prispособlenijami [The use of recorders of operation parameters on overhead lifting cranes operating with replaceable lifting devices]. *Innovacii v stroitel'stve i promyshlennosti*. 2016; 7 (9): 5. (In Russ.)

4. Ivanova N. Ju., Ivanov S. D., Nadezhenkov S. A., Nazarov A. N. Ob'ektivnaja informacija o rabote pod'emno-transportnykh mashin kak osnova povyshenija kachestva informacionnykh sistem gruzoobrabatyvajushhih predpriyatij [Objective information about the operation of lifting and transport machines as a basis for improving the quality of information systems of cargo handling enterprises]. *Mashiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i jekspluatacija*. 2023; 2: 81 – 96. EDN MRGIFShh. (In Russ.)

5. Ivanov S. D. Stend dlja izuchenija raboty ogranichitelja gruzopod'emnosti i registratora parametrov raboty mostovogo krana [A stand for studying the operation of the load capacity limiter and the recorder of the parameters of the bridge crane]. *Mehanizacija stroitel'stva*. 2012; 8 (818): 32-37. EDN PESHh-NOL. (In Russ.)

6. Brom A. E., Ivanov S. D., Shakarov K. K. Ispol'zovanie registratorov parametrov pri jekspluatacii mostovykh kranov [Use of parameter recorders in the operation of overhead cranes]. *Mehanizacija stroitel'stva*. 2016; T. 77, 6: 36 – 40. EDN VZYBZX. (In Russ.)

7. Skosyrskij N. P., Dan'shin V. V., Budanov D. S. Primenenie priborov bezopasnosti ZAO "ITC "KROS" [Application of safety devices of CJSC "RDC KROS"]. *Promyshlennye i stroitel'nye tehnologii*. 2016; 8 (10): 5. EDN VTPROD. (In Russ.)

8. Timin Ju. F., Sushinskij V. A. Opyt primeneniya registratorov parametrov v Kranah mostovogo tipa [Experience in the application of parameter recorders in bridge-type cranes]. Pod'emno-transportnoe delo. 2009; 3 (53):12 – 14. EDN NDIICZ. (In Russ.)

9. Skosyrskij N. P., Dan'shin V. V., Budanov D. S. Vlijanie predvaritel'nykh porogov srabatyvanija ogranichitelja gruzopod'emnosti na dinamiku mostovogo krana [Influence of the preliminary thresholds of the capacity limiter operation on the dynamics of the overhead crane]. *Promyshlennye i stroitel'nye tehnologii*. 2016; 7 (9): 8. EDN VTPRKH. (In Russ.)

10. Ivanov S. D., Mihal'chik N. L. Sozdanie i jeksperimental'noe obosnovanie algoritma raboty vesozmeritel'noj sistemy na baze registratora parametrov [Creation and experimental substantiation of the algorithm of the weight-measuring system based on the parameter recorder]. Pod'emno-transportnoe delo. 2019; 3-4 (97): 27 – 30. EDN WRJTFW. (In Russ.)

11. Ivanov S., D. Nazarov A. N., Mikhachik N. L. Selection of a rational algorithm for data processing of the weight measuring system of a hoisting crane. *Journal of Physics: Conference Series*, Belgorod,

09–10 марта 2021 года. Vol. 1926. Belgorod: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012047. DOI 10.1088/1742-6596/1926/1/012047. EDN JIUUGG.

12. Pereverzev A. L. Adaptivnyj cifrovoj fil'tr na osnove skol'zjashhego srednego [Adaptive digital filter based on the moving average]. *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Jelektronika*. 2005; 2: 70-72. EDN HZNLZN. (In Russ.)

13. Mihalev A. V., Nazarov A. N. Primenenie algoritma skol'zjashhego srednego dlja zadachi opredele-nija massy gruzha [Application of the moving average algorithm for the problem of the cargo mass determination]. *Mashiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i jekspluatacija*. 2023; 2: 44 – 57. EDN XLXJRI. (In Russ.)

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

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

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Назаров А. Н. Разработка алгоритма весоизмерения, проведение эксперимента, анализ результатов, оформление статьи.*

*Иванов С. Д. Постановка задачи, анализ результатов.*

## COAUTHORS' CONTRIBUTION

*Alexander N. Nazarov. Development of weight measurement algorithm, experimentation, analysis of results, paper design.*

*Sergey D. Ivanov. Problem statement, analysis of the results.*

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Назаров Александр Николаевич – аспирант кафедры «Подъемно-транспортные системы». SPIN-код: 2028-7651.*

*Иванов Сергей Дмитриевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Подъемно-транспортные системы».*

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Alexander N. Nazarov. Postgraduate student of the Hoisting and Transport Systems Department. SPIN-код: 2028-7651.*

*Sergey D. Ivanov. Cand. of Sci., Associate Professor of the Hoisting and Transport Systems Department.*

Научная статья  
УДК 629.084  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-432-442>  
EDN: EETOYC



## ПАРАМЕТРЫ ОТПЕЧАТКА КОНТАКТА ПЕРСПЕКТИВНОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА ДОРОЖНОГО КАТКА С ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРИ УПЛОТНЕНИИ ДОРОЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ

С. В. Савельев\*, Р. Е. Литовченко, А. А. Юрченко

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

saveliev\_sergval@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4034-2457>,

darxil@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0916-4586>

anastasia.yurch2003@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-8397-995x>

\*ответственный автор

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассматривается наиболее эффективное средство механизации при уплотнении дорожно-строительных материалов для устройства транспортных объектов – дорожный каток с перспективным пневмошинным вальцом, способным эффективно использовать вибрацию.

**Материалы и методы.** Приводятся результаты исследований, описывающие изменение параметров контакта вальца дорожного катка с уплотняемой поверхностью. Данные параметры оказывают значительное влияние на эффективность деформирования дорожных материалов при их уплотнении в технологическом слое. В процессе эксперимента выявлены значения малой и большой осей эллипса отпечатка контакта, его площадь, величина контактных давлений в зависимости от нагрузки на валец и количества установленных на вальце металлических бандажей.

**Результат.** В статье приводятся иллюстрации проведённых экспериментов, полученные данные представлены в виде аналитических и графических зависимостей.

**Обсуждение и заключение.** Установка бандажей осуществляется на стандартные шины, выпускаемые серийно. Представленный перспективный дорожный каток, который сочетает в себе возможности разных типоразмеров (по массе) катков, чем можно ускорить процесс уплотнения материалов, снизить энерго-, металло- и трудоемкость и повысить эффективность строительства автомобильных дорог.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** дорожные катки, пневмошины, бандажи, параметры, контакт, площадь, уплотнение, вибрация

**БЛАГОДАРНОСТИ:** авторы благодарят заведующего и коллектив кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники (ЭНСТ)» за всестороннюю помощь и предоставленную возможность проведения экспериментальных исследований в лабораториях кафедры.

Статья поступила в редакцию 01.06.2023; одобрена после рецензирования 04.08.2023; принята к публикации 30.08.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Савельев С. В., Литовченко Р. Е., Юрченко А. А. Параметры отпечатка контакта перспективного рабочего органа дорожного катка с опорной поверхностью при уплотнении дорожных материалов // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 4 (92). С. 432-442. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-432-442>

© Савельев С. В., Литовченко Р. Е., Юрченко А. А., 2023



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-432-442>

EDN: EETOYC

## PERSPECTIVE CONTACT IMPRINT PARAMETERS OF ROAD ROLLER WORKING BODY WITH BEARING SURFACE WHEN COMPACTING ROAD MATERIALS

**Sergei V. Saveliev\*, Roman E. Litovchenko, Anastasia A. Yurchenko**  
Siberian State Automobile and Road University (SibADI)

Omsk, Russia

[saveliev\\_serghval@mail.ru](mailto:saveliev_serghval@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4034-2457>,

[darxil@mail.ru](mailto:darxil@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0004-0916-4586>

[anastasia.yurch2003@gmail.com](mailto:anastasia.yurch2003@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0001-8397-995x>

\*corresponding author

### ABSTRACT

**Introduction.** The most efficient machine for compacting road building materials in the construction of transport facilities, a road roller with a promising pneumatic tire roller that can effectively use vibration, is considered.

**Materials and methods.** The results of the studies characterizing the parameters of the imprint of the contact of the working body of the roller with the supporting surface, which significantly affect the efficiency of the technological operation of compacting road materials, are presented. During the experiment, the values of the minor and major axes of the contact imprint ellipse, its area, the value of contact pressures depending on the load on the roller and the number of metal bands installed on the roller were revealed.

**Result.** The article provides illustrations of the experiments carried out, the data obtained in the form of analytical and graphical dependencies are presented.

**Discussion and conclusion.** The bandages on standard tires that are mass-produced are installed. The presented promising road roller, which combines the capabilities of different sizes (by weight) of rollers, which can speed up the process of compacting materials, reduce energy, metal and labour intensity and increase the efficiency of road construction.

**KEYWORDS:** road rollers, pneumatic tires, tires, parameters, contact, area, compaction, vibration

**ACKNOWLEDGMENTS:** The authors express their gratitude to the head and staff of the Operation of Oil and Gas and Construction Equipment Department for their comprehensive assistance and the opportunity to conduct experimental research in the laboratories of the department.

The article was submitted 01.06.2023; approved after reviewing 04.08.2023; accepted for publication 30.08.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

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

© Savelyev S. V., Litovchenko R. E., Yurchenko A. A., 2023



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

## ВВЕДЕНИЕ

Уплотнение строительных материалов дорожными катками – основная операция для обеспечения прочности, долговечности и работоспособности всех технологических слоёв автодороги. Одними из наиболее эффективных уплотняющих машин считаются дорожные катки с пневмошинными рабочими органами. Одной из основных характеристик, оказывающих влияние на эффективность уплотнения дорожных материалов, являются параметры контакта пневмошинного вальца с поверхностью уплотняемого материала [1, 2, 3]. Цель исследования: определение зависимостей параметров отпечатка контакта пневмошин с уплотняемой поверхностью от внутреннего давления воздуха и количества бандажей на рабочем органе дорожного катка.

Анализ состояния вопроса по свойствам пневматических шин [3, 4, 5, 6, 7] показал, что при определении характеристик пятна контакта пневматических шин необходимо обращать внимание на конкретные экспериментальные испытания конкретных пневматических шин. Именно эти характеристики важны для определения напряжений и деформаций в уплотняемом грунтовом слое [4, 5, 6, 8, 9, 10].

Исследования посвящены статическим испытаниям пневмошин. Это основной метод для изучения интересующих нас параметров. Экспериментальные исследования позволяют выявить значения среднего удельного давления  $\sigma_k$  и площади контакта  $F_k$  в пятне отпечатка контакта пневмошины с опорной поверхностью, а также длину  $a$  и ширину  $b$  отпечатка контакта.

Финальный этап уплотнения характеризуется малым приращением относительной деформации материала, поэтому геометрические размеры площади контакта пневматического колеса на этой стадии могут быть идентичными площади, полученной в результате статических испытаний шин на упругой опорной поверхности [3, 4]. К такому выводу пришли и другие исследователи [8, 9].

Площадь контакта шины с поверхностью будет определяться как площадь эллипса с большой и малой осью:

$$F_k = \frac{\pi \cdot a \cdot b}{4}, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $b$  – малая и большая оси эллипса отпечатка соответственно.

Исследования перспективных пневмошинных вальцов, разработанных в СибАДИ [11, 12] выявили, что бандажи увеличивают показатели жесткости вальца в таких пределах, когда пятно контакта практически не изменяется от прилагаемой нагрузки за исключением прогиба пневмошины в зоне контакта. Также выявлено, что при воздействии статической силы на пневмошинный валец, оборудованный двенадцатью бандажами (при  $P_w=0,6$  МПа), геометрическая форма вальца значительно не изменяется [11, 12].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовался метод пассивного эксперимента. Важным условием проведения исследований являлось обеспечение достоверности информации с требуемой доверительной вероятностью. В прикладных исследованиях считается достаточной доверительная вероятность  $(1-\alpha_0) = 0,95$ .

Точность результатов исследования обеспечивалась количеством повторных измерений. Число повторных измерений определялось по формуле

$$n = \frac{z^2 \cdot v^2}{\Delta^2}, \quad (2)$$

где  $z$  – квантиль нормального распределения;  $v$  – коэффициент вариации величины, для которой определяется количество повторных измерений;  $\Delta$  – допустимая погрешность в определении искомой величины. С учётом предварительных данных значение коэффициента вариации не превышает 0,15. При допустимой погрешности эксперимента 0,14 и доверительной вероятности 0,95 квантиль нормального распределения равен 1,82. Тогда необходимое число экспериментов составит

$$n = \frac{1,82^2 \cdot 0,15^2}{0,14^2} = 3,8.$$

Для достижения точности результатов эксперимента в пределах 14% необходимо выполнить 4 повторных наблюдения.

Зная статическую силу  $Q$  (масса всех элементов колеса и масса груза были известны из характеристик), действующую от вальца на площадь контакта, определим средние значения контактного давления для статической нагрузки  $\sigma_k^{stat}$ .

Таблица 1

**Характеристики грузовой шины 8.25-20 (240-508) КИ-63**

Источник: Грузовые шины в Челябинске [Электронный ресурс] // Грузовая шина 8.25-20 (240-508) КИ-63 [сайт]. [2022].  
URL: <https://sovara74.ru/product/11avtoshina-altajshina-ki-63-240h508-r20> (дата обращения 30.07.2023).

Table 1

**Truck tire characteristics 8.25-20 (240-508) KI-63**

Source: Truck tires in Chelyabinsk [Electronic resource] // Truck tire 8.25-20 (240-508) KI-63 [website]. [2022].  
URL: <https://sovara74.ru/product/11avtoshina-altajshina-ki-63-240h508-r20> (accessed 07/30/2023).

Характеристика	Значение
Посадочный диаметр, дюймы	20
Ширина профиля, мм	240
Наружный диаметр, мм	852
Рисунокось	универсальный
Комплектность	укомплектована камерой
Индекс скорости	100 (J)
Индекс нагрузки	125/122
Вес товара, кг	38.5
Норма слойности	10

$$\sigma_k^{стат} = \frac{Q}{F_k}. \quad (3)$$

У вибрационных катков помимо статической силы действует ещё и динамическая составляющая [13, 14, 15, 16, 17], которую следует учитывать при расчёте характеристик вибрационных дорожных катков.

В экспериментальных исследованиях применялась грузовая шина 8.25-20 (240-508) КИ-63, характеристики шины представлены в таблице 1.

Следует отметить, что рассматривается новая разработка [2, 4, 13, 17] и в первом приближении предполагается, что представленное конструктивное решение для пневмовальца позволит увеличивать его жёсткость до величины сопоставимой с жёсткостью металлических вальцов. При этом подразумевается, что вид контактной эпюры будет соответствовать типу I [13], поскольку именно этот тип эпюр для пневмошинных вальцов наиболее приближен к эпюре давлений под металлическими вальцами.

Представлен эксперимент по определению площади пятна контакта и контактных давле-

ний в зависимости от количества бандажей и внутреннего давления в шинах. В процессе эксперимента изменялось давление в шинах и количество металлических бандажей (рисунки 1, 2, 3).

Задачей эксперимента являлась возможность минимизации площади пятна контакта, т.е. достижения максимально возможных в этих условиях контактных давлений, сопоставимых с величиной контактных давлений у катков с металлическими вальцами. Максимальные контактные давления требуются в конце процесса уплотнения, когда уплотняемая среда практически не деформируется, поэтому эксперимент проводился на твердой бетонной поверхности.

Определение размеров пятна контакта (в продольном и поперечном направлении), проводилось с помощью измерительной линейки. Количество повторных измерений составляло не менее 4, как определено в вышеописанной методике построения эксперимента. Результаты исследований, представленные на рисунках 4, 5, 6 приводятся для статического режима.



Рисунок 1 – Эксперимент по определению пятна контакта рабочего органа  
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Experiment to determine the contact patch of the working body  
Source: compiled by the authors.



Рисунок 2 – Размер пятна контакта экспериментального рабочего органа (8 бандажей)  
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – The size of the contact patch of the experimental working body (8 bandages)  
Source: compiled by the authors.



Рисунок 3 – Размер пятна контакта экспериментального рабочего органа (12 бандажей)  
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – The size of the contact patch of the experimental working body (12 bandages)  
Source: compiled by the authors.

Таблица 2  
Значения площади контакта и средних контактных давлений при нагрузке 6 кН  
Источник: составлено авторами.

Table 2  
Values of the contact area and contact pressures at a load of 6 kN  
Source: compiled by the authors.

Количество бандажей N, шт.	Внутреннее давление в шине P <sub>w</sub> , МПа							
	0,4				0,6			
	F <sub>к</sub> , м <sup>2</sup>	a, м	b, м	$\sigma_{\kappa}^{стат}$ , МПа	F <sub>к</sub> , м <sup>2</sup>	a, м	b, м	$\sigma_{\kappa}^{стат}$ , МПа
6	0,138	0,46	0,38	0,043	0,114	0,41	0,35	0,053
8	0,102	0,38	0,34	0,059	0,075	0,31	0,31	0,082
10	0,080	0,33	0,30	0,075	0,053	0,26	0,26	0,113
12	0,059	0,29	0,26	0,102	0,035	0,20	0,22	0,174

## РЕЗУЛЬТАТ

Рисунки 4, 5, 6 иллюстрируют изменения параметров контакта и контактных давлений, что характерно для рабочего органа с бандажами. Установленные бандажи позволяют «расширить» пределы значений параметров контакта рабочего органа катка с уплотняемой поверхностью по сравнению с обычным пневматиком. Главная отличительная особенность состоит в том, что при одной площади контак-

та можно изменять контактные давления. На стандартном пневмошинном рабочем органе такая возможность отсутствует (пятно контакта, контактные давления находятся в строгой зависимости). Таким образом, использованием бандажей и регулированием внутреннего давления в шине можно расширить возможности пневмошинного рабочего органа. Этот эффект повышает производительность и эффективность катков с пневмошинными рабочими органами.

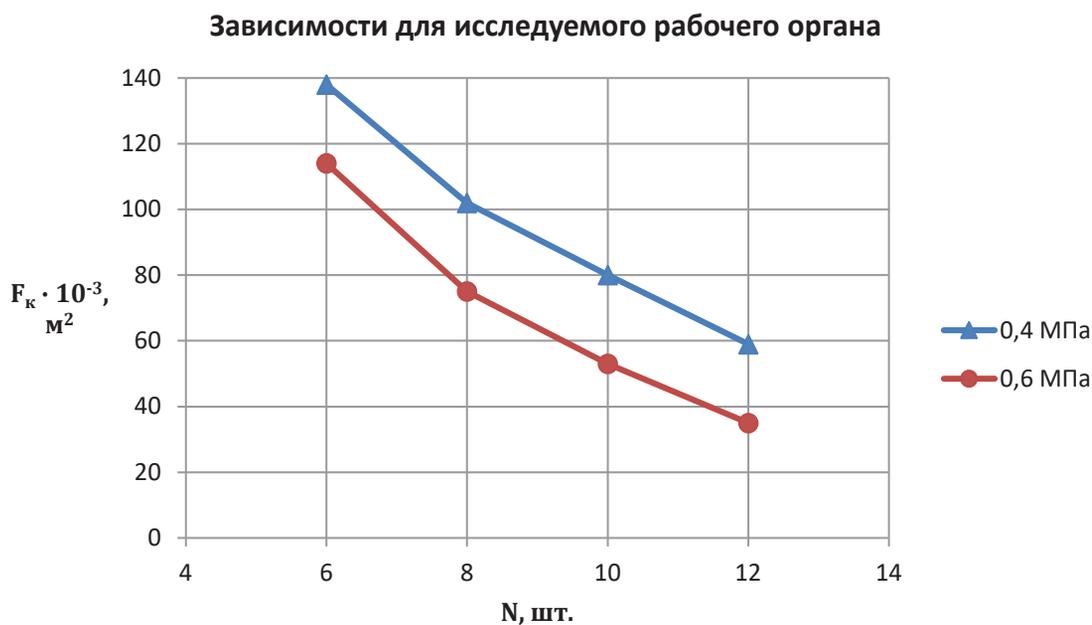


Рисунок 4 – Зависимость  $F_k$  от числа установленных бандажей  $N$   
Источник: составлено авторами.

Figure 4 –  $F_k$  dependence on the number of installed bandages  $N$   
Source: compiled by the authors.

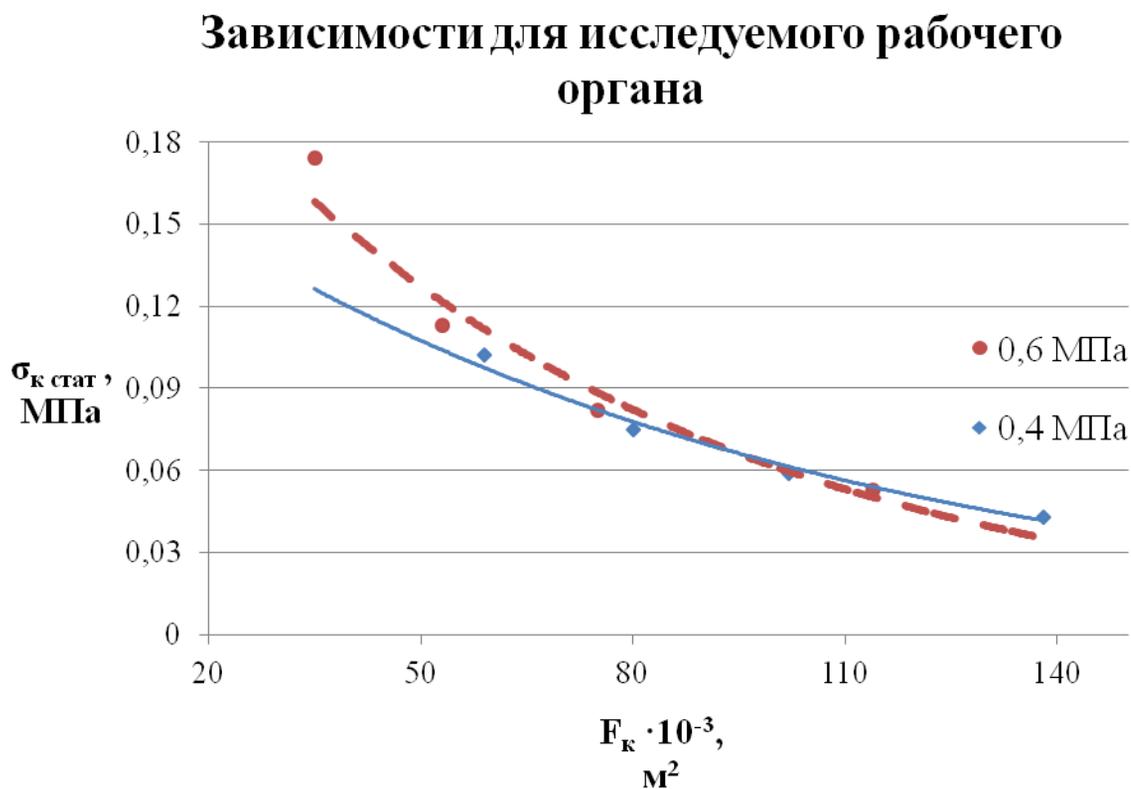


Рисунок 5 – Расчётная зависимость среднего контактного давления от площади контакта с поверхностью  $F_k$   
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Dependence of the medium contact pressure on the area of contact with  $t F_k$  surface  
Source: compiled by the authors.

### Зависимости для исследуемого рабочего органа

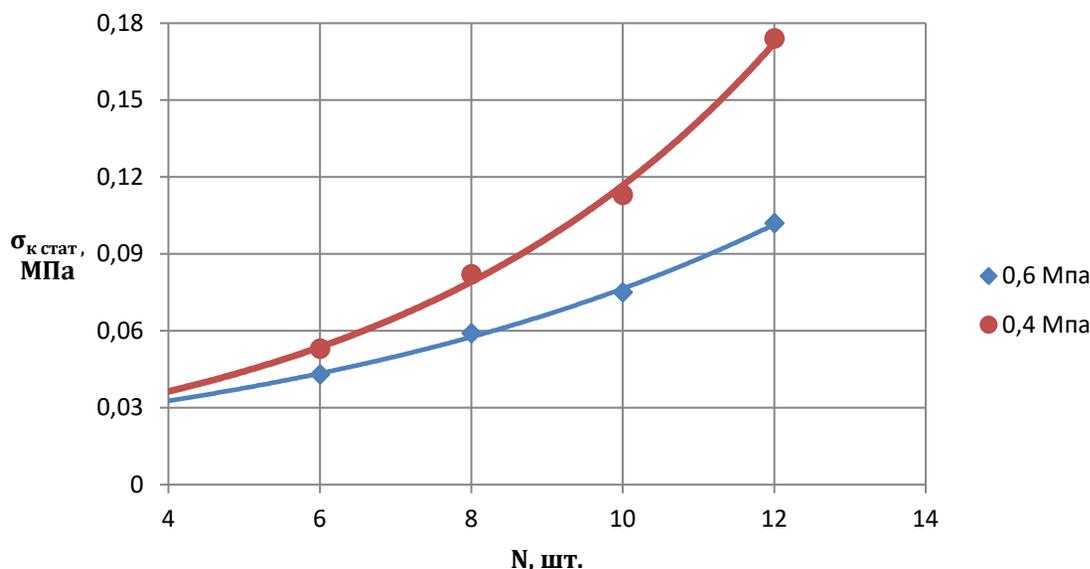


Рисунок 6 – Расчётная зависимость среднего контактного давления от числа установленных бандажей  $N$   
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Dependence of the medium contact pressure on the number of installed bandages  $N$   
Source: compiled by the authors.

Анализ рисунка 5 позволяет сделать вывод, что при малой площади контакта  $F_k$  и одинаковом количестве бандажей внутреннее давление в шинах существенно влияет на жёсткость рабочего органа, контактные давления  $\sigma_k$  отличаются. При снижении внутреннего давления в шинах бандаж «перестают» оказывать своё влияние на жёсткость рабочего органа и контактные давления  $\sigma_k$  при увеличенной площади контакта  $F_k$  практически не отличаются.

Данные, полученные в результате эксперимента, позволили провести теоретические расчёты для выявления зависимости контактных давлений, возникающих при работе катка.

#### ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные пневмошинные катки могут использоваться на любой стадии укатки дорожного материала. Это связано с возможностью относительно широкого регулирования контактных давлений  $\sigma_k$  на протяжении всего процесса уплотнения. Например, от момента когда грунт находится в «рыхлом» состоянии и до момента, когда достигается нормативная плотность [2, 3, 17, 18, 19, 20]. Представлен-

ные исследования выявили, что использование съёмных металлических бандажей даёт возможность широко регулировать характеристики жёсткости и вязкости пневмошинного вальца. Можно существенно снизить деформативность рабочего органа, тем самым интенсифицируя действие вибровозбудителя на уплотняемый материал. Эффект от использования металлических бандажей заключается в снижении деформирования шин от вибрации и увеличения процента энергии от вибровозбудителя, которая передаётся уплотняемому материалу. При этом остаётся основное преимущество пневмошинных вальцов, при необходимости регулировать контактные давления для обеспечения эффективного уплотнения.

Установка бандажей возможна на серийно выпускаемые пневмошины. Поэтому требуемые финансовые вложения для создания такого рабочего органа катка будут незначительны. Обслуживание и ремонт данной техники также не потребует больших трудозатрат. В результате мы имеем перспективный дорожный каток, сочетающий в себе возможности разных конструкций уплотняющей техники.

Использование данных машин тенсифицирует операцию уплотнения дорожных материалов, снижает энерго-, металло- и трудоемкость и повышает эффективность строительства автомобильных дорог.

Исследования проводятся при поддержке Российского научного фонда и Правительства Омской области, научный грант № 23-29-10010 «Разработка дорожных катков для повышения эффективности транспортного строительства с учетом региональных условий Омской области».

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дубков В. В., Сокирко С. А. Определение параметров пневмошинного катка с осцилляторным вибрационным механизмом // *Техника и технологии строительства*. 2019. № 4 (20). С. 15 – 21.

2. Савельев С. В., Потеряев И. К. Исследования эффективности уплотняющей техники для строительства автомобильных дорог // *Строительные и дорожные машины*. 2021. № 2. С. 44 – 48.

3. Артемов А. В., Гончаренко С. В., Прядкин В. И. Определение пятна контакта шин сверхнизкого давления 1020X420-18 БЕЛ-79 лесной техники малого класса // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2020. Т. 8, № 1 (48). С. 250 – 256.

4. Щиголов С. В., Ломакин С. Г. Определение нагрузок на колеса зерноуборочного комбайна, находящегося на поперечном склоне // *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина»* 2017. № 3 (79). С. 24 – 30.

5. Каспаров А. А., Веселов И. В., Соколов С. Л. Расчётные исследования низкопрофильных шин специального назначения // *Известия высших учебных заведений // Машиностроение*. 2016. № 11 (680). С. 34 – 39.

6. Кравченко В. А., Кравченко Л. В. Аналитическое обоснование параметров внутреннего строения шин движателей мобильных энергетических средств тягового класса 1, 4 // *Вестник аграрной науки Дона*. 2023. Т. 16, № 1 (61). С. 17 – 28.

7. Шилько С. В., Черноус Д. А., Бухаров С. Н., Хотько А. В. Метод расчёта коэффициента сопротивления качению автомобильных шин на основе моделирования термовязкоупругого деформирования шинных резин // *Актуальные вопросы машиноведения*. 2021. Т. 10. С. 124 – 128.

8. Аналитическое исследование деформации пневмоколеса и параметров шины / В. Н. Тарасов, И. В. Бояркина, В. С. Серебренников, В. В. Дубков // *Строительные и дорожные машины*. 2020. № 3. С. 11 – 16.

9. Тарасов В. Н. Аналитическое исследование методом сечений длины контакта и параметров пневмоколес строительных и дорожных машин / В. Н. Тарасов, И. В. Бояркина, В. С. Серебренников,

В. В. Дубков // *Строительные и дорожные машины*. 2020. № 1. С. 10 – 17.

10. Тетерина И. А., Корчагин П. А., Летопольский А. Б. Влияние динамических характеристик шин на вибронегруженность рабочего места оператора // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2019. Т. 7, № 1. С. 176–181.

11. Савельев С. В. Пермяков В. Б., Михеев В. В., Потеряев И. К. Инновационная уплотняющая техника и рекомендации по её использованию для ресурсосберегающих технологий дорожного строительства монография. Омск: СибАДИ, 2019. 193 с.

12. Permyakov V. B., Savel'ev S. V., Mikheev V. V. Using the Deformational Properties of Tires in Vibrational Systems // *Russian Engineering Research*. 2015, Vol. 35., No. 2, pp. 102-104.

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

14. Кустарёв Г. В., Баловнев В. И., Данилов Р. Г. Особенности формирования программного продукта выбора вибрационных катков // *Строительные и дорожные машины*. 2017. № 6. С. 36 – 41.

15. Тиллоев К. З., Кромский Е. И., Кондаков С. В. Выбор рациональных параметров конусного раскатчика для глубокого уплотнения оснований дорог // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2021. № 1. С. 82 – 89.

16. Korchagin P. A., Teterina I. A., Korchagina E. A. Road roller operator's vibroprotection system improvement // *Journal of Physics: Conference Series*: 14, Omsk, 10 – 12 November 2020 года. Omsk, 2021. P. 012012. DOI 10.1088/1742-6596/1791/1/012012. EDNFKOJMB.

17. Суэтина Т. А., Марсова Е. В., Кустарев Г. В., Борисов Ю. В. Сравнительный анализ схем послыного уплотнения грунта при выполнении строительных работ // *Academia. Архитектура и строительство*. 2018. № 1. С. 73 – 77.

18. Исследование взаимосвязи конструктивных и технологических параметров вибрационных и осцилляционных катков/ Е. А. Шишкин, С. Н. Иванченко, В. В. Сидорков, Л. А. Мамаев, А. А. Смоляков // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2021. № 2. С. 183 – 188.

19. Мошева А.А., Вахрушев С.И. Исследование особенностей процесса уплотнения грунта дорожными катками // *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*. 2016. Т. 2, С. 250 – 258.

20. Kenneally, B., Musimbi, O.M., Wang, J., Mooney, M.A. Finite element analysis of vibratory roller response on layered soil systems // *Computers and Geotechnics* this link is disabled. 2015. 67. p. 73 – 82.

### REFERENCES

1. Dubkov V. V., Sokirko S. A. Opredelenie parametrov pnevmoshinnogo katka s oscilljatornym vibracionnym mehanizmom [Determination of the parameters of a pneumatic tire roller with an oscillatory vibrating mechanism]. *Tehnika i tehnologii stroitel'stva*. 2019; 4 (20):15 – 21. (In Russ.)

2. Savel'ev S. V., Poterjaev I. K. Issledovanija jeffektivnosti uplotnjajushhej tehniki dlja stroitel'stva avtomobil'nyh dorog [Research on the effectiveness of compaction equipment for the construction of roads «Construction and road machines»]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2021; 2: 44 – 48. (In Russ.)
3. Artemov A. V., Goncharenko S. V., Prjadkin V. I. Opređenje pjatna kontakta shin sverhnizkogo davlénija 1020H420-18 BEL-79 lesnoj tehniki malogo klassa [Determination of the contact patch of ultra-low pressure tires 1020X420-18 BEL-79 small-class forestry equipment]. *Aktual'nye napravlenija nauchnyh issledovanij XXI veka: teorija i praktika*. 2020; T. 8. № 1 (48): 250 – 256. (In Russ.)
4. Shhigolev S. V., Lomakin S. G. Opređenje nagruzok na kolesa zernoborochnogo kombajna, nahodjashhegosja na poperechnom sklone [Determination of loads on the wheels of a grain harvester located on a transverse slope]. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdenija vysshego professional'nogo obrazovanija «Moskovskij gosudarstvennyj agroinzhenernyj universitet imeni V. P. Gorjachkina»*. 2017; 3 (79): 24 – 30. (In Russ.)
5. Veselov I. V., Sokolov S. L. Raschjotnye issledovanija nizkoprofil'nyh shin special'nogo naznachenija Kasparov Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij [Computational studies of low-profile tires for special purposes]. *Mashinostroenie*. 2016. № 11 (680): 34 – 39. (In Russ.)
6. Kravchenko V. A., Kravchenko L. V. Analytical substantiation of the parameters of the internal structure of the tires of the movers of mobile power equipment of traction class 1, 4 Bulletin of Agrarian Science of the Don. 2023. V. 16. No. 1 (61). pp. 17 – 28. (In Russ.)
7. Shil'ko S. V., Chernous D. A., Buharov S. N., Hot'ko A. V. Metod raschjota koeficienta soprotivleniju kacheniju avtomobil'nyh shin na osnove modelirovanija termovjazkoupругogo deformirovanija shinnyh rezin [Method for calculating the coefficient of rolling resistance of automobile tires based on the simulation of thermoviscoelastic deformation of tire rubber]. *Aktual'nye voprosy mashinovedenija*. 2021; T. 10: 124 – 128. (In Russ.)
8. Tarasov V. N., Bojarkinal. V., Serebrennikov V. S., Dubkov V. V. Analiticheskoe issledovanie deformacii pnevmokolesa i parametrov shiny [Analytical study of deformation of pneumatic wheels and tire parameters]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2020; 3: 11 – 16. (In Russ.)
9. Tarasov V. N., Bojarkinal. V., Serebrennikov V. S., Dubkov V. V. Analiticheskoe issledovanie metodom sechenij dliny kontakta i parametrov pnevmokoles stroitel'nyh i dorozhnyh mashin [Analytical study by the method of sections of the contact length and parameters of pneumatic wheels of construction and road machines]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2020; 1:10 – 17. (In Russ.)
10. Teterina I. A., Korchagin P. A., Letopol'skij A. B. Vlijanie dinamicheskikh harakteristik shin na vibrongruzhennost' rabochego mesta operatora [Influence of dynamic characteristics of tires on the vibration loading of the operator's workplace]. *Dinamika sistem, mehanizmov i mashin*. 2019; T. 7. No 1: 176 – 181. (In Russ.)
11. Savel'ev S. V., Permjakov V. B., Miheev V. V., Poterjaev I. K. *Innovacionnaja uplotnjajushhaja tehnika i rekomendacii po ejo ispol'zovaniju dlja resursosberegajushchih tehnologij dorozhnogo stroitel'stva: monografija* [Innovative compaction technology and recommendations for its use for resource-saving road construction technologies]. Omsk: SibADI, 2019. 193 p. (In Russ.)
12. Permyakov V. B., Savel'ev S. V., Mikheev V. V. Using the Deformational Properties of Tires in Vibrational Systems. *Russian Engineering Research*. 2015; Vol. 35., No. 2: 102-104. I
13. Harhuta N. Ja., Vasil'ev Ju. M. Prochnost', ustojchivost' i uplotnenie gruntov zemljanogo polotna avtomobil'nyh dorog [Strength, stability and compaction of road roadbed soils]. Moscow: Transport, 1975. 288 p. (In Russ.)
14. Kustarjov G. V., Balovnev V. I., Danilov R. G. Osobennosti formirovanija programmogo produkta vybora vibracionnyh katkov [Features of the formation of a software product for the selection of vibratory rollers]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2017; 6: 36 – 41. (In Russ.)
15. Tilloev K. Z., Kromskij E. I., Kondakov S. V. Vybór racional'nyh parametrov konusnogo raskatchika dlja glubokogo uplotnenija osnovanij dorog [The choice of rational parameters of a cone roller for deep compaction of road foundations]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Brjanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2021; 1: 82 – 89. (In Russ.)
16. Korchagin P. A., Teterina I. A., Korchagina E. A. Road roller operator's vibroprotection system improvement. *Journal of Physics: Conference Series*: 14, Omsk, 10 -12 nojabrja 2020 goda. Omsk, 2021. P. 012012. DOI 10.1088/1742-6596/1791/1/012012. EDN FKOJMB.
17. Sujetina T. A., Marsova E. V., Kustarev G. V., Borisov Ju. V. Sravnitel'nyj analiz shem poslojnjogo uplotnenija grunta pri vypolnenii stroitel'nyh rabot [Comparative analysis of layer-by-layer soil compaction schemes during construction works]. *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo*. 2018; 1: 73 – 77. (In Russ.)
18. Shishkin E. A., Ivanchenko S. N., Sidorkov V. V., Mamaev L. A., Smoljakov A. A. Issledovanie vzaimosvjazi konstruktivnyh i tehnologicheskikh parametrov vibracionnyh i oscil'jacionnyh katkov [Study of the relationship between design and technological parameters of vibratory and oscillatory rollers]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Brjanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2021; 2: 183 – 188. (In Russ.)
19. Mosheva A. A., Vahrushev S. I. Issledovanie osobennostej processa uplotnenija grunta dorozhnyimi katkami [Study of the features of the process of soil compaction by road rollers]. *Sovremennye tehnologii v stroitel'stve. Teorija i praktika*. 2016; T. 2: 250 – 258. (In Russ.)
20. Kenneally, B., Musimbi, O. M., Wang, J., Mooney, M. A. Finite element analysis of vibratory roller response on layered soil systems. *Computers and Geotechnics* [this link is disabled](#). 2015; 67: 73 – 82.

**ВКЛАД СОАВТОРОВ**

Савельев С. В. – 60% (основной организатор и участник приведённых в статье исследований).

Литовченко Р. Е. – 25% (обработка экспериментальных данных, оформление наглядных материалов для статьи).

Юрченко А. А. – 15%. (оформление статьи).

**COAUTHORS' CONTRIBUTION**

Sergei V. Saveliev – 60% (the main organizer and participant of the studies cited in the article).

Roman E. Litovchenko – 25% (processing of experimental data, design of visual materials for the article).

Anastasia A. Yurchenko – 15%. (layout of the article).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

Савельев Сергей Валерьевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» института «Автомобильный транспорт, нефтегазовая и строительная техника».

Литовченко Роман Евгеньевич – студент 4-го курса института «Автомобильный транспорт, нефтегазовая и строительная техника». SPIN-код: 4135-8370.

Юрченко Анастасия Александровна – студентка 2-го курса института «Автомобильный транспорт, нефтегазовая и строительная техника». SPIN-код: 4135-8370.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Sergei V. Saveliev – Dr. of Sci., Professor of the Operation of Oil Gas and Construction Equipment Department, Motor transport, Oil, Gas and Construction Equipment Institute. SPIN-код: 4135-8370.

Roman E. Litovchenko – 4th year student of the Motor Transport, Oil, Gas and Construction Equipment Institute at SibADI.

Anastasia A. Yurchenko – 2nd year student of the Motor Transport, Oil, Gas and Construction Equipment Institute at SibADI.

## РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



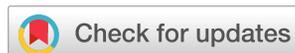
## PART II. TRANSPORT

Научная статья

УДК 656

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-444-457>

EDN: GVVSBЕ



## СРАВНЕНИЕ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ И ТРУДОЁМКОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ И РЕМОНТУ ТРОЛЛЕЙБУСОВ И АВТОБУСОВ

**А. В. Колин, П. В. Рыбаков\***Российский университет транспорта (МИИТ),  
г. Москва, Россияalex5959@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8206-1656>rybakov.sc@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-4554-013X>

\*ответственный автор

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Троллейбусы и автобусы – основной вид безрельсового общественного транспорта. В данной статье подробно разобраны факторы, влияющие на себестоимость перевозок, в части технического обслуживания и ремонта подвижного состава. Основная цель данного исследования – это сравнение значений трудоёмкости по техническому обслуживанию и ремонту троллейбусов и автобусов и выявление причин, влияющих на разницу в значениях трудоёмкости обслуживания и ремонта троллейбусов и автобусов.

**Материалы и методы.** Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: 1. Проведён анализ руководств по эксплуатации, инструкций по обслуживанию и ремонту, действовавших в соответствующие периоды эксплуатации, для троллейбусов (ЗИУ-9, БКМ-321, ПКТС 6281) и автобусов (ЛиАЗ-677, МАЗ-103, МАЗ-203). Анализ и сравнение были произведены для транспортных средств трёх условных поколений: 1970–1990 гг., 2000 и 2010 гг. 2. Определены причины, влияющие на разницу в значениях трудоёмкости обслуживания и ремонта автобусов и троллейбусов. 3. Сформулированы предложения по внесению изменений в Приказ № 351 Министерства транспорта РФ.

**Обсуждение и заключение.** Произведено сравнение значений трудоёмкостей выбранных транспортных средств. Даны рекомендации по изменению значений трудоёмкости по обслуживанию и ремонту троллейбусов в сравнении с автобусами, устанавливаемых Приказом Министерства транспорта РФ № 351, при расчёте начальной минимальной цены контракта на обслуживание пассажиров троллейбусами и автобусами.

**Оригинальность.** Произведено сравнение трудоёмкости выполнения операций по техническому обслуживанию и ремонту троллейбусов и автобусов в разрезе видов оборудования и для транспортных средств разных технических поколений.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** троллейбус, автобус, трудоёмкость выполнения операций, техническое обслуживание, ремонт

Статья поступила в редакцию 23.06.2023; одобрена после рецензирования 17.08.2023; принята к публикации 30.08.2023.

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: Колин А. В., Рыбаков П. В. Сравнение ремонтнопригодности и трудоёмкости выполнения операций по техническому обслуживанию и ремонту троллейбусов и автобусов // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 4 (92). С. 444-457. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-444-457>

© Колин А. В., Рыбаков П. В., 2023

Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-444-457>  
EDN: GVVSB E

## REPAIRABILITY AND LABOUR INTENSITY COMPARISON FOR TROLLEYBUSES AND BUSES MAINTENANCE AND REPAIR OPERATIONS

**Aleksei V. Kolin, Pavel V. Rybakov\***  
Russian University of Transport (MIIT),  
Moscow, Russia

[alex5959@yandex.ru](mailto:alex5959@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8206-1656>  
[rybakov.sc@mail.ru](mailto:rybakov.sc@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0000-4554-013X>

\*corresponding author

### ABSTRACT

**Introduction.** Trolleybuses and buses are the main type of railless public transport. This article examines the factors affecting the cost of transportation, in terms of maintenance and repair of rolling stock in detail. The main purpose of this study is to compare the values of labour intensity for maintenance and repair of trolleybuses and buses and to identify the reasons that affect the difference in the values of labour intensity for maintenance and repair of trolleybuses and buses.

**Materials and methods.** To achieve this goal, the following tasks were solved: 1. The analysis of operating manuals, maintenance and repair instructions, valid during the corresponding periods of operation, for trolleybuses (ZIU-9, BKM-321, PKTS 6281) and buses (LiAZ-677, MAZ-103, MAZ-203) was carried out. The analysis and comparison were made for vehicles of three conditional generations: the 1970s - 1990s, 2000s and 2010s. 2. The reasons influencing the difference in the values of labour intensity of maintenance and repair of buses and trolleybuses are determined. 3. Proposals to amend Order No. 351 of the Ministry of Transport of the Russian Federation have been formulated.

**Discussion and conclusion.** The comparison of the values of the labour intensity of the selected vehicles was made. The recommendations on changing the labor intensity values for maintenance and repair of trolleybuses in comparison with buses, established by Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 351, when calculating the initial minimum price of the contract for passenger service by trolleybuses and buses are given.

**Originality.** The comparison of the complexity of performing maintenance and repair operations of trolleybuses and buses in the context of types of equipment and for vehicles of different technical generations is made.

**KEYWORDS:** trolleybus, bus, labour intensity of operations, maintenance, repair

The article was submitted 23.06.2023; approved after reviewing 17.08.2023; accepted for publication 30.08.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

*For citation.* Colin A. V., Rybakov P. V. Repairability and labour intensity comparison for trolleybuses and buses maintenance and repair operations. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (4): 444-457. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-444-457>

© Colin A. V., Rybakov P. V., 2023



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

**ОПРЕДЕЛЕНИЯ:**

**Планово-предупредительная система ремонтов транспортных средств** – система, предусматривающая проведение ремонтов, предупреждающих возникновение технических неисправностей.

**Техническое обслуживание транспортного средства** – плановый профилактический осмотр и замена расходных комплектующих с целью поддержания работоспособности транспортного средства.

**Ремонт транспортного средства** – комплекс операций по восстановлению исправности или работоспособности транспортного средства.

**Ремонтопригодность** – свойство транспортного средства, характеризующее его приспособленность к восстановлению работоспособного состояния после отказа или повреждения.

**СОКРАЩЕНИЯ:**

**БК** – группа транспортных средств, характеризующихся определенными габаритами в части длины (большой класс транспортных средств – длина от 10 до 16 м включительно).

**ОБК** – группа транспортных средств, характеризующихся определенными габаритами в части длины (особо большой класс транспортных средств – длина более чем 16 м).

**ТУАХ** – троллейбус с увеличенным автономным ходом.

**ВВЕДЕНИЕ**

Троллейбусы и автобусы являются основными видами безрельсового общественного пассажирского транспорта в городах России и стран СНГ. Во внутригородском сообщении в 2021 г. в РФ троллейбусами было перевезено 808 млн пассажиров, автобусами 8 054 млн пассажиров (метрополитеном – 2 680 млн пассажиров, трамваями – 992 млн пассажиров)<sup>1</sup>.

В первой половине 20-го столетия в крупнейших городах СССР, включая Москву, Ленинград, Киев, троллейбус получил опережающее развитие по сравнению с автобусами.

А вплоть до конца 1990-х годов открывались новые троллейбусные системы и новые троллейбусные линии в городах, где троллейбус уже эксплуатировался.

Можно выделить следующие причины, по которым отдавались предпочтения троллейбусным перевозкам, а не использовались автобусы:

- вплоть до 1960-х годов промышленность СССР не выпускала автобусы большой вместимости (с длиной кузова более 9,5 м), тогда как троллейбусы, начиная с модели МТБ-82 (1940–1950 гг.), имели большую вместимость;

- троллейбусы при определённой интенсивности движения обеспечивали существенную экономию эксплуатационных расходов;

- троллейбусы не создавали эмиссию вредных веществ в зоне непосредственного вдыхания воздуха человеком;

- троллейбусный транспорт придавал городу дополнительный статус<sup>2,3,4</sup>.

В период с 2010 по 2023 г. в ряде городов России от троллейбуса полностью отказались (Архангельск, Курган, Благовещенск, Тверь, Белгород, Кострома). В августе 2020-го прекратила существовать и самая крупная троллейбусная система в мире – Московская.

Причинами отказа от троллейбусов обычно называют высокий уровень износа троллейбусной инфраструктуры и отсутствие экономической целесообразности их эксплуатации по сравнению с автобусами. В связи с этим возникает интерес к экономике эксплуатации автобусов и троллейбусов. С одной стороны, троллейбусы являются более энергоэффективными. КПД троллейбусов вместе с системой тягового электроснабжения выше, чем у автобусов, отсутствует холостой ход работы двигателей (что существенно для городских условий перевозок), а стоимость энергоносителя ниже [1, 2].

Так, например, в Санкт-Петербурге, по отчётным данным, расходы на топливо автобусов предприятия ГУП «Пассажиравтотранс» в первом полугодии 2022 г. составили 195 руб. на 1000 место-км транспортной работы (13,5% от общих расходов), а расходы на электроэнергию, потребляемую троллейбусами ГУП

<sup>1</sup> Федеральная служба государственной статистики. Основные показатели транспортной деятельности в России [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Transport\\_2022.pdf](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Transport_2022.pdf). (дата обращения: 20.05.2023)

<sup>2</sup> Розалиев В. В., Егоров М. В. История московского троллейбуса (1933-2003). М.: Мосгортранс, 2003. 296 с.

<sup>3</sup> Бодня О. Ю., Лысянский Р. В., Мартианов В. Е., Трамвай, троллейбус и Краснодар: история развития электротранспорта в столице Кубани (XX- начало XXI в.). Краснодар: Традиция, 2012. 331 с.

<sup>4</sup> Чапчаев В. В., Черноусов Ф. Г., Шаляпин Д. В., Клепикова Т. А. 90 лет с любимым городом: К юбилею регулярного автобусного движения в Санкт-Петербурге. СПб: Типография «Любавич», 2016. 324 с.

«Горэлектротранс», за тот же отчётный период составили 128 руб. (5,2%) на 1000 место-км.

С другой стороны, на содержание системы тягового электроснабжения и контактной сети требуются дополнительные расходы, которых нет при автобусных перевозках<sup>4</sup>.

Расходы на фонд оплаты труда водителей, прочие расходы сопоставимы между собой.

Другими составляющими эксплуатационных расходов, в которых троллейбус потенциально может показывать себя более экономичным по сравнению с автобусом, – это амортизация подвижного состава (зависит от стоимости машины и срока службы) и расходы на техническое обслуживание и ремонт. Троллейбусы имеют больший срок службы [1], поэтому расходы на амортизацию у них ниже. Остановимся теперь подробно на вопросе стоимости технического обслуживания и ремонта троллейбусов и автобусов. Доля расходов на техническое обслуживание и ремонт подвижного состава в общих расходах на эксплуатацию городского пассажирского транспорта составляет примерно 10%.

В соответствии с Приказом № 351 Министерства транспорта Российской Федерации от 21.12.2021<sup>5</sup> для троллейбусов рекомендованы большие значения трудоёмкости по обслуживанию и ремонту машин по сравнению с автобусами. Так, для автобусов большого и очень большого класса предусмотрены значения, соответственно, – 13,3 и 19,1 ч/1000 км пробега, а для троллейбусов большого и очень большого класса – 25 и 30 ч/1000 км пробега, для трамваев большого и очень большого

класса – 20 и 26 ч/1000 км пробега. В пересчёте на годовой пробег транспортного средства (около 60 тыс. км) это составит для автобусов большого класса 798 чел.-ч в год, а для троллейбусов – 1500 чел.-ч, то есть на ремонт и обслуживание троллейбусов изначально закладывается практически вдвое больше времени, чем на ремонт и обслуживание автобуса.

Базовые стоимости запасных частей и материалов в расчёте на 1 км пробега для автобусов БК и ОБК рекомендуются соответственно 6,4 и 8,6 руб./км, для троллейбусов БК и ОБК – 12,6 и 16,0 руб./км, а для трамваев БК и ОБК – 17,0 и 22,0 руб./км.

Для электробусов подобные нормативы не установлены, но в целом электробус довольно близок по своему конструктивному исполнению к троллейбусу.

Данные цифры говорят о том, что троллейбус – технически более сложная и менее ремонтпригодная машина по сравнению с автобусом. Так ли это на самом деле?

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Авторами проведён подробный анализ трудозатрат на техническое обслуживание и ремонт троллейбусов и автобусов на основе действовавших в соответствующие периоды эксплуатации инструкций<sup>6,7,8,9,10,11</sup>.

Для сравнения трудозатрат ремонтов и обслуживания подвижного состава общественного транспорта выделено условно три поколения: 1) 1980–2000 гг., 2) 2000–2010 гг., 3) 2010–2020 гг. Для каждого поколения выбраны близкие по характеристикам троллейбус и автобус.

<sup>5</sup> Об утверждении Порядка определения начальной максимальной цены контракта, а также цены контракта, заключаемого с единственным поставщиком (подрядчиком, исполнителем), при осуществлении закупок в сфере регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным и городским электрическим транспортом и городским наземным электрическим транспортом: приказ № 351 Министерства транспорта Российской Федерации от 21.12.2021 г.

<sup>6</sup> Технология ежедневного технического обслуживания, первого технического обслуживания, второго технического обслуживания и сезонного технического обслуживания автобусов МАЗ-101, МАЗ-103, МАЗ-103С, МАЗ-104, МАЗ-104С (пост канавный) / Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь. Белорусский научно-исследовательский институт транспорта «Транстехника» (БелНИИТ «Транстехника»). Минск. 2002.

<sup>7</sup> Технологический процесс технического обслуживания троллейбуса МАЗ-203 (пост канавный) / Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь. Республиканское унитарное предприятие. Белорусский научно-исследовательский институт транспорта «Транстехника» (БелНИИТ «Транстехника»). Минск. 2022.

<sup>8</sup> Троллейбус пассажирский низкопольный ПКТС-6281 «Адмирал». Руководство по эксплуатации. Том 2, часть 1. ООО ПК «Транспортные системы», Москва, 2020, 220 с.

<sup>9</sup> Технологический процесс ежедневного, первого, второго и сезонного технического обслуживания троллейбуса АКМ 321 (пост канавный) / Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь. Республиканское унитарное предприятие. Белорусский научно-исследовательский институт транспорта «Транстехника» (БелНИИТ «Транстехника»). Минск, 2006.

<sup>10</sup> Автобус ЛиАЗ-677М. Руководство по эксплуатации. М., Транспорт, 1979. 213 с., с ил., табл.

<sup>11</sup> Троллейбус пассажирский ЗиУ-682Г-01. Руководство по эксплуатации. Энгельс, АО «Тролза», 1999. 291 с.

Таблица 1  
Характеристика отдельных троллейбусов и автобусов трёх сформированных поколений  
Источник: составлено авторами.

Table 1  
Characteristics for separate trolleybuses and buses of three formed generations  
Source: compiled by the authors.

Поколение	Модель ТС	Годы эксплуатации СССР-РФ	Количество мест: для сидения (максимальное)	Срок службы, год <sup>Λ</sup>	Количество обслуживаний по их видам в течение года в среднем за срок службы, ед. (числитель), межремонтные пробеги, тыс. км (знаменатель)				
					ЕО *	ТО-1000	ТО-1	ТО-2	СО
3	Троллейбус ПКТС-6281	2015 –н.в.	27 (118)	18	274		$\frac{17}{3}$	$\frac{3}{20}$	2
	Автобус МАЗ-203	2005 –н.в.	25 (110)	10	274	1	$\frac{2}{15}$	$\frac{2}{30}$	2
2	Троллейбус БКМ-321	2000-н.в.	26 (115)	18	274		$\frac{17}{3}$	$\frac{3}{18}$	2
	Автобус МАЗ-103	1997 –н.в.	28 (110)	10	274		$\frac{4}{10}$	$\frac{2}{30}$	2
1	Троллейбус ЗИУ-682Г	1972 –н.в.	25 (125)	18	274		$\frac{32}{1,6}$	$\frac{7}{9}$	2
	Автобус ЛиАЗ-677М	1969 –2009	28 (102)	10	274		$\frac{17}{2,8}$	$\frac{4}{14}$	2

\*- количество ежедневных обслуживаний определено в соответствии с коэффициентом выпуска подвижного состава 0,75. Средний годовой пробег транспортных средств принят равным 60 000 км  
Λ- срок службы уточняется региональными органами власти в зависимости от местных условий в соответствии с ФЗ № 220 от 13.07.2015

В таблице 1 представлены общие характеристики анализируемых модификаций троллейбусов и автобусов и количество обслуживаний по видам: ЕО – ежедневное обслуживание, ТО-1, ТО-2 – техническое обслуживание первого и второго объёмов, ТО-1000 – техническое обслуживание по пробегу 1000 км, СО – сезонное обслуживание.

Трудозатраты, приведенные в статье, определены с учётом частоты выполнения операций и не являются нормативными, так как рассчитаны для конкретного значения годового

пробега (60 тыс. км), выбранной оснащённости зон обслуживания ремонтного предприятия и т.п.

Инструкции, на основании которых проводился анализ, обычно разрабатываются по факту разработанной и принятой технологии.

С целью подробного анализа для троллейбусов и автобусов выделены следующие группы оборудования:

- 1) экипажная часть;
- 2) тормозная система и рулевое оборудование;

3) двигатель внутреннего сгорания (ДВС) и его системы, трансмиссия (только у автобусов);

4) тяговое электрооборудование – тяговый электродвигатель, высоковольтные цепи, преобразователи и силовые системы управления тягой, токоприёмники (только у троллейбусов);

5) вспомогательное электрическое оборудование (низковольтные цепи, аккумулятор-

ные батареи для собственных нужд, генератор собственных нужд, освещение и др.);

6) кузов, салон, системы жизнеобеспечения.

В таблице 2 представлен перечень операций, которые проводятся с троллейбусами и автобусами соответственно при ЕО, ТО-1, ТО-2, СО.

Таблица 2

Перечень операций, выполняемых при ЕО, ТО-1, ТО-2, СО по видам оборудования

Источник: составлено авторами.

Table 2

List of operations performed at the DM, M-1, M-2, SM by type of equipment

Source: compiled by the authors.

№ категории	Перечень основных выполняемых операций
Экипажная часть	<p>(ЕО) Визуальная проверка состояния колёс и узлов тормозной системы, проверка работы картера (у автобусов), проверка двигателя и редукторов на наличие посторонних шумов.</p> <p>(ТО-1) Диагностика карданных валов, ступиц, мостов, амортизаторов и др.</p> <p>(ТО-2) Стендовая диагностика колёс передней оси. Проверка состояния мостов, амортизаторов, карданных валов, болтов и затяжки гаек фланцевых соединений.</p> <p>(СО) Замена масел и смазок на сорта, соответствующие наступающему сезону эксплуатации, подготовка аппаратов пневмосистемы подвески к наступающему сезону эксплуатации</p>
Тормозная система и рулевое оборудование	<p>(ЕО) Визуальная проверка герметичности пневматического тормозного оборудования и давления воздуха, исправности рулевого управления и свободного хода рулевого колеса.</p> <p>(ТО-1) Проверка исправности рулевого механизма, герметичности тормозной системы, реактивных штанг на предмет отсутствия механических повреждений, уровня масла в бачке гидроусилителя рулевого управления.</p> <p>(ТО-2) Стендовая диагностика тормозных систем и механизмов. Проверка состояния рулевых тяг, рулевой колонки, пневмосистемы.</p> <p>(СО) Замена масел и смазок на сорта, соответствующие наступающему сезону эксплуатации, подготовка аппаратов пневмосистемы тормозного оборудования к наступающему сезону эксплуатации</p>
ДВС и его системы, трансмиссия (только для автобусов)	<p>(ЕО) Проверка уровня масла в ДВС и гидромеханической передаче, визуальная проверка уровня и цвета охлаждающей жидкости, датчика уровня топлива (при необходимости дозаправка).</p> <p>(ТО-1) Проверка подвески силового агрегата и его систем, герметичности соединений трубопроводов, засорённости фильтрующего элемента воздушного фильтра (при необходимости замена), качества работы гидромеханической передачи.</p> <p>(ТО-2) Стендовая диагностика ДВС и его систем.</p> <p>(СО) Работы по ДВС и его системам, пополнение бака топливом сезонной марки.</p>
Тяговое электрооборудование (только для троллейбусов)	<p>(ЕО) Визуальная проверка величины тока утечки, состояния крышевого оборудования.</p> <p>(ТО-1) Проверка автоматического выключателя, состояния тягового электродвигателя, моторовводной панели, основной изоляции высоковольтных цепей. Удаление пыли и грязи с изоляторов основной и дополнительной ступеней всех аппаратов и панелей.</p> <p>(ТО-2) Стендовая диагностика величины тока утечки. Проверка состояния крышевого оборудования, контейнеров с электрооборудованием, состояния контактов и контакторов. Обслуживание электродвигателя.</p> <p>(СО) Доводка плотности электролита аккумуляторных батарей до необходимых параметров, зарядка, подзарядка батарей (для ТУАХов)</p>

№ категории	Перечень основных выполняемых операций
Вспомогательное электрическое оборудование и низковольтные цепи	<p>(ЕО) Проверка наличия и состояния предохранителей на низковольтных цепях, работы внешних световых приборов, функционирования приборов световой и звуковой сигнализации, контрольно-измерительных приборов, контрольных ламп, стеклоочистителей и омывателей ветрового стекла.</p> <p>(ТО-1) Проверка и исправление ошибок в работе электронных систем в зависимости от комплектации транспортного средства.</p> <p>(ТО-2) Проверка состояния элементов по позициям ТО-1 и замена при необходимости. Проверка и исправление ошибок в работе электронных систем в зависимости от комплектации транспортного средства.</p> <p>(СО) Подготовка системы отопления и электрического оборудования к наступающему сезону эксплуатации</p>
Кузов, салонные системы жизнеобеспечения	<p>(ЕО) Производство уборочно-моечных работ. Проверка исправности дверей, работы отопителей, комплектность автобуса или троллейбуса.</p> <p>(ТО-1) Проверка укомплектованности транспортного средства предметами экипировки, наличия загрязнений воздушных каналов системы вентиляции, работы отопителей, исправности кузовных элементов.</p> <p>(ТО-2) То же что и при ТО-1.</p> <p>(СО) Подготовка системы отопления, проверка герметичности кузова и утепления кабины водителя (при переходе к осенне-зимнему сезону); проверка наличия и исправности огнетушителей</p>

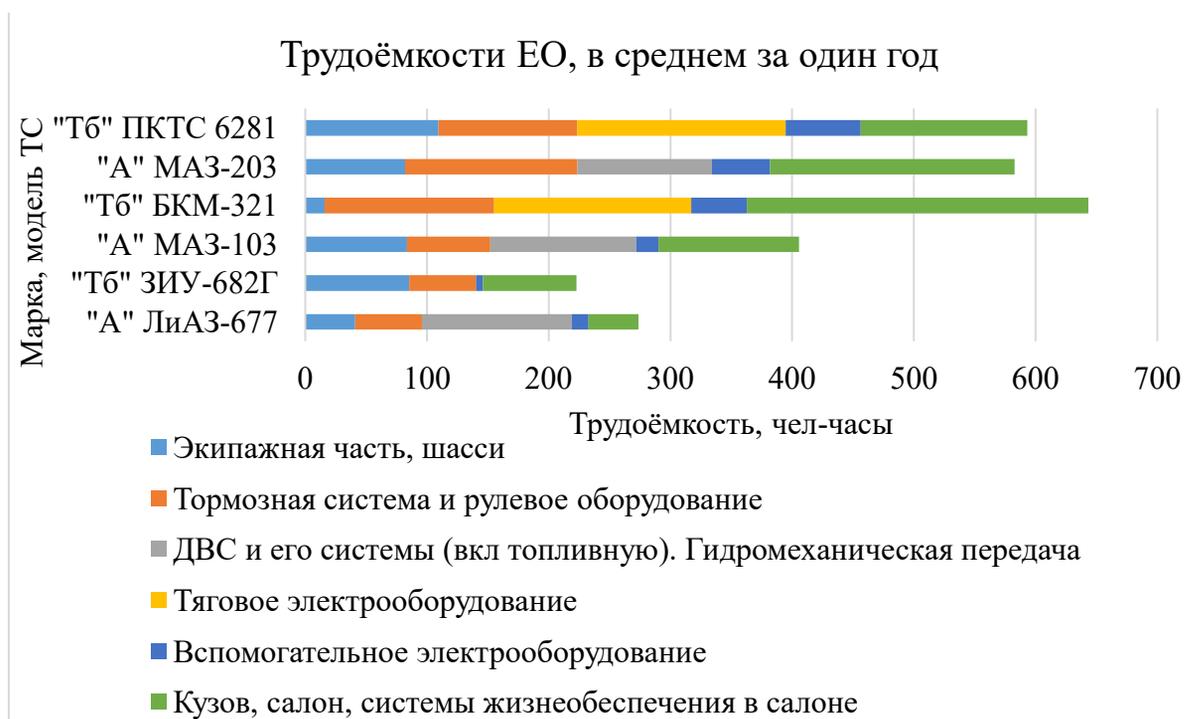


Рисунок 1 – Средние значения трудоёмкости по ЕО за год  
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Average labour intensity values for daily maintenance per year  
Source: compiled by the authors.

## Трудоёмкости ТО-1000, в среднем за один год



Рисунок 2 – Средние значения трудоёмкости по ТО-1000 за год (условные обозначения см. на рисунке 1)

Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Average labour intensity values for technical maintenance-1000 per year (see the legend in Figure 1)

Source: compiled by the authors.

## Трудоёмкости ТО-1, в среднем за один год

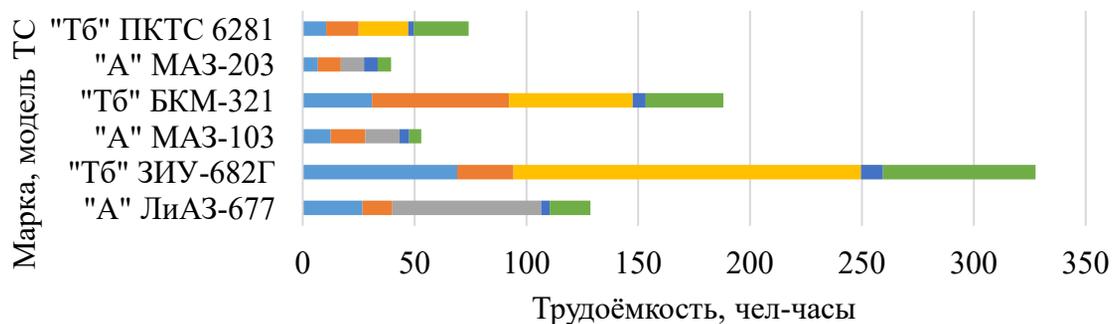


Рисунок 3 – Средние значения трудоёмкости ТО-1 за год (условные обозначения см. на рисунке 1)

Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Average values of labour intensity for maintenance-1 per year (see the legend in Figure 1)

Source: compiled by the authors.

На рисунках 1, 2, 3, 4, 5 показаны значения трудозатрат в чел.-ч по видам оборудования на выполнение соответственно ЕО, ТО-1, ТО-2, ТО-1000 и СО. На рисунке 6 показаны общие трудозатраты за год (средние в течение срока службы) по обслуживанию троллейбусов и автобусов по видам оборудования.

Как видно из рисунка 1, большие затраты трудоёмкости приходятся на категорию оборудования «кузов, салон, системы жизнеобеспечения» за счёт отдельных трудоёмких операций.

ТО-1000 присутствует только у одного выбранного ТС ввиду норм обслуживания ДВС, его систем и отдельных узлов.

## Трудоёмкости ТО-2, в среднем за один год

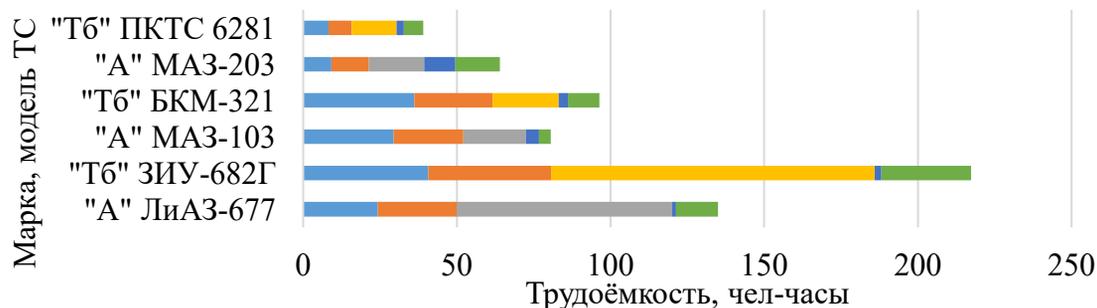


Рисунок 4 – Средние значения трудоёмкости ТО-2 за год (условные обозначения см. на рисунке 1)  
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Average values for the labour intensity of maintenance-2 per year (see the legend in Figure 1)  
Source: compiled by the authors.

## Трудоёмкости СО, в среднем за один год

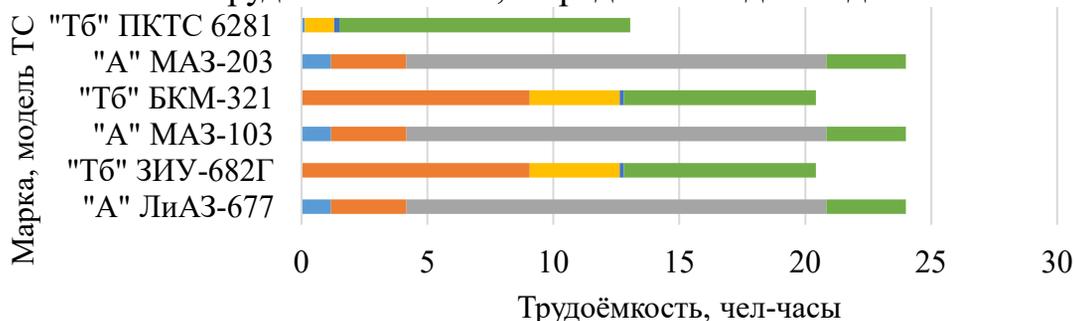


Рисунок 5 – Средние значения трудоёмкости СО за год (условные обозначения см. на рисунке 1)  
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Average values of the labour intensity of meson maintenance per year (see the legend in Figure 1)  
Source: compiled by the authors.

Как видно из рисунка 3, одна из трудоёмких категорий обслуживания – это обслуживание тягового электрооборудования у троллейбуса ЗиУ-682Г. Высокая трудоёмкость обусловлена несовершенством конструкции и частотой производимых обслуживаний ТО-1 и ТО-2, которая больше, чем у современных троллейбусов БКМ-321 и ПКТС-6281 [3, 4].

Рисунок 5 показывает трудоёмкости сезонных обслуживаний за год. Значения трудоёмкостей выбранных ТС не имеют больших отличий друг от друга. Это связано с малым перечнем операций, выполняемых при пере-

ходе к летнему или зимнему периоду эксплуатации ТС.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе исследования значений трудоёмкостей каждой операции в каждом виде обслуживания и ремонта было выявлено, что одни и те же операции у разных транспортных средств имеют разные трудоёмкости [5]. Ввиду идентичности сравниваемых узлов и их элементов можно сделать вывод об отличиях в технической оснащённости ремонтных депо и парков<sup>12</sup> [6, 7]. Так, например, операция

<sup>12</sup> Приказчиков К. Н. Направления развития производственно-технической базы пассажирского автотранспорта крупных городов // Проблемы и перспективы развития региональной инфраструктуры. Сборник по результатам международной научно-практической конференции 15 апреля 2014 г. СГТУ имени Гагарина Ю. А. С. 112 – 121.

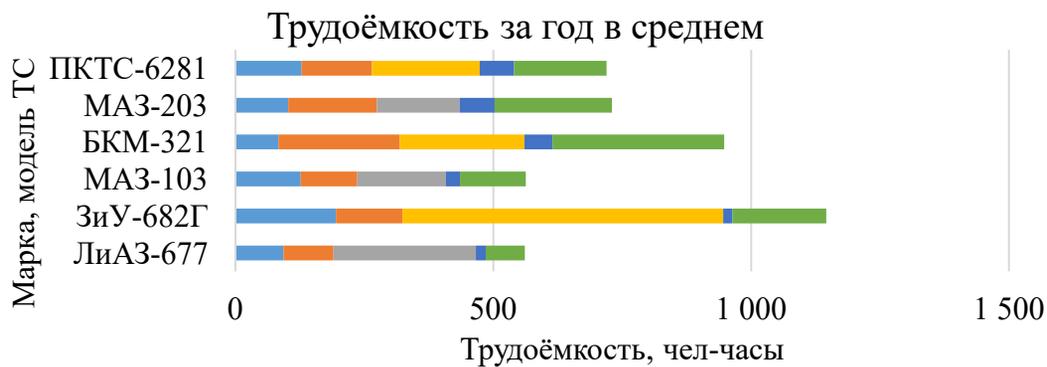


Рисунок 6 – Средние значения трудоёмкости за год по всем видам обслуживания, вместе взятым (условные обозначения см. на рисунке 1)  
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Average labour intensity values for the year for all types of services taken together (see the legend in Figure 1)  
Source: compiled by the authors.

в ТО-2 «Очистить аккумуляторную батарею от пыли, грязи и следов электролита, прочистить вентиляционные отверстия в крышках аккумуляторной батареи, проверить крепление контактов наконечников проводов с выводами АКБ и смазать их» занимает 7 чел.-мин у автобуса МАЗ-103 и 14 чел.-мин у автобуса МАЗ-203. Технологии технического обслуживания МАЗ-103 (2003 г.) и МАЗ-203 (2022 г.) разработаны Белорусским научно-исследовательским институтом транспорта «Транстехника» (БелНИИТ «Транстехника»). Что касается данной операции, можно сделать вывод о том, что отличия в трудоёмкостях из-за норм и технологий выполнения, так как отличия в конструкциях рассматриваемого узла минимальны.

Как видно из рисунков 1, 2, 3, 4, 5, 6, при переходе от поколения к поколению суммарные трудозатраты сокращались. Так, например, для троллейбусов первого и третьего поколений трудозатраты сократились с 1150 чел.-ч на одну машину в год до 720 чел.-ч в год, а для автобусов увеличились с 560 до 730 чел.-ч в год.

Согласно таблице 1 и рисункам 1-6 можно сделать вывод о том, что трудозатраты по каждому виду обслуживания зависят от значенной межремонтного пробега.

При этом в 1970–1980 гг. разрыв по трудозатратам на обслуживание между автобусами и троллейбусами был фактически двукратным, а к 2010 годам разрыв практически исчез.

В первом поколении транспортных средств трудозатраты на обслуживание тягового элек-

трооборудования у троллейбусов составляли 622 чел.-ч в год, а трудозатраты на обслуживание ДВС и топливной системы у автобусов составляли около 276 чел.-ч в год. В третьем поколении транспортных средств трудозатраты по обслуживанию тягового оборудования у троллейбусов составляют 209 чел.-ч в год, а у автобусов – 160 чел.-ч в год.

На величину трудозатрат технического обслуживания подвижного состава влияют следующие факторы:

- сложность технического устройства подвижного состава;
- применяемое техническое оборудование для диагностики и ремонта подвижного состава, уровень механизации и автоматизации процессов проведения технического обслуживания и ремонтов подвижного состава;
- качество администрирования регламента выполняемых работ (культура обслуживания подвижного состава);
- порядок нормирования работ по техническому обслуживанию и ремонту подвижного состава (наличие завышенных или заниженных требований к обслуживанию отдельных узлов или к транспортному средству в целом).

Для троллейбусов ввиду их особой статусности по сравнению с автобусами во времена существования СССР были характерны более высокие эксплуатационные требования, и в связи с этим троллейбусы отличались более высокой надёжностью, что в свою очередь вызывало необходимость в более тщательном техническом обслуживании. Вместе с тем троллейбусы были более уязвимы к условиям

движения. Для них требовались идеальные условия для токосъёма, исключение автономного движения без привязки к контактной сети, что, с одной стороны, требовало идеально ровной проезжей части, с другой стороны – на самих машинах применялась улучшенная амортизация кузова, дополнительные резервные системы торможения. Другими словами, троллейбус ЗиУ-682 вынужденно технически более сложная и более надёжная машина в сравнении с автобусом ЛиАЗ-677 того же поколения и требовала дополнительного ухода.

Так, троллейбус ЗиУ-682 при общей схожести с автобусом ЛиАЗ-677 по таким элементам как кузов, элементы подвески, органы рулевого управления, был более сложной и тяжёлой машиной и имел более сложную систему торможения. Из-за этого норма слойности шин у троллейбусов составляла 18 против 16 у автобусов.

На троллейбусе применялись четыре тормозные системы: рабочая (с пневматическим двухконтурным приводом), запасная (функции выполняет один из контуров рабочей системы), вспомогательная (электродинамическая – за счёт тягового электродвигателя) и стояночная (механический привод, воздействующий на тормозные механизмы задних колёс). У автобуса тормозные системы были следующими: рабочая (пневматическая двухконтурная), которая действует на все колёса, стояночная (механическая), которая действует только на задние колёса и запасная тормозная система (выполняет один из контуров рабочей системы).

В процессе эволюционирования с 1990 по 2010 г., производимые в РФ и РБ троллейбусы и автобусы технически усовершенствовались<sup>13</sup>. Вместе с тем значительно повысились требования к надёжности работы автобусов 2,4<sup>14,15</sup> [8, 9, 10].

Так, на троллейбусах сильно изменилось тяговое электрооборудование. Вместо коллекторных тяговых электродвигателей (КТЭД) и реостатно-контакторных систем управления

(РКСУ) применяются асинхронные тяговые электродвигатели (АТД) и преобразователи (транзисторы). А ведь именно на очистку и обслуживание щёточно-коллекторных узлов КТЭД и контакторов РКСУ приходились самые значительные трудозатраты. Коллекторы нужно было прочищать салфеткой, смоченной в уайт-спирте (авиабензине), а зачистка и шлифовка коллектора осуществлялась стеклянной шкуркой при помощи специальных деревянных оправок. После шлифовки и очистки коллектора нужно было удалить угольную пыль волосяной щёткой. Коллектору нужно было иметь отполированную и чистую поверхность с отсутствием следов чёрного налёта или подгара. Но частая очистка коллектора могла одновременно стать причиной повышенного износа коллектора и щёток 3<sup>16</sup>.

На автобусах значительно улучшились параметры двигателей внутреннего сгорания. В них увеличилась степень сжатия топливовоздушной смеси, что повысило их производительность, усовершенствованы системы подачи топлива и кривошипно-шатунный механизм [11]. Однако к сокращению трудозатрат в обслуживании это не привело, так как одновременно были повышены требования по технической надёжности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель, которая была обозначена в научной статье, достигнута за счёт решения задач. Ниже перечислены причины, влияющие на разницу в значениях трудоёмкости обслуживания и ремонта автобусов и троллейбусов:

1. Развитие троллейбусного движения в СССР и РФ/СНГ было обусловлено экономическими и экологическими факторами, а также придавало дополнительную статусность городам [12, 13]. Троллейбус долгое время (примерно до начала 2000-х годов) был технически более совершенной и надёжной машиной в сравнении с автобусом и требовал за собой большего ухода [14, 15].

<sup>13</sup> Силовые агрегаты ЯМЗ-236НЕ2, ЯМЗ-236НЕ, ЯМЗ-236Н, ЯМЗ-236БЕ2, ЯМЗ-236БЕ, ЯМЗ-236Б. Руководство по эксплуатации. ОАО «Автодизель», Ярославль, 2013. 398 с.

<sup>14</sup> Лучкина К. С., Калмыков Б. Ю. Совершенствование сертификационных испытаний автобусов // Перспективы науки – 2016: материалы III Международного заочного конкурса научно-исследовательских работ, Казань, 29 апреля 2016 года. Том 3. Казань: ООО «Рокета Союз», 2016. С. 141 – 146.

<sup>15</sup> Атаманов Ю. Е. Сафонов А. И. Троллейбус. Теория, конструирование, расчет, Минск, Ураджай, 1999. 342 с.

<sup>16</sup> Кот Е. Н., Рынкевич С. А., Семченков С. С. Состояние и перспективы систем наземного городского электрического транспорта Беларуси // Организация и безопасность дорожного движения: материалы XIII Национальной научно-практической конференции с международным участием, Тюмень, 19 марта 2020 года. Тюмень, Тюменский индустриальный университет. 2020. С. 372 – 377.

2. Трудоёмкость технического обслуживания и ремонта автобусов и троллейбусов зависит не только от их технического устройства<sup>17</sup>, но и от культуры, порядка нормирования и качества администрирования таких работ [11, 16, 17].

3. Техническая эволюция троллейбусов и автобусов в период с 1990 по 2010 г. позволила сделать эти машины технически совершенными и ремонтпригодными, кардинально сократить трудозатраты на их техническое обслуживание и ремонт. Вместе с тем требования по технической надёжности автобусов приблизились к аналогичным требованиям для троллейбусов, в результате чего разница в трудоёмкости обслуживания и ремонта троллейбусов и автобусов исчезла. Если годовые трудозатраты на техническое обслуживание и ремонт автобусов и троллейбусов в 1980-е годы составляли соответственно 1150 и 550 чел.-ч в год, то для современных транспортных средств они практически не отличаются и составляют примерно 700 чел.-ч.

4. Используемые в Приказе Минтранса РФ № 321 нормы трудозатрат по обслуживанию и ремонту троллейбусов и автобусов, а также по расходу запасных частей и комплектующих, являются устаревшими (рассчитаны на устаревшие модели транспортных средств, массово выходящих из эксплуатации) и нуждаются в актуализации. Так, для троллейбуса значение по трудозатратам должно быть уменьшено примерно на 45%. Аналогично следует пересмотреть и расход материалов, используемых при техническом обслуживании и ремонте. Такая актуализация повысит расчётные экономические преимущества троллейбуса в сравнении с автобусами.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Глушкова Ю.О., Пахомова А.В., Асоян А.Р. Сравнение экономической эффективности эксплуатации троллейбуса и автобуса с учетом экологического фактора. *Вестник СибАДИ*. 2018;15(3):372 – 389. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-3-372-389>

2. Блудян Н. О., Певная А. А., Уваров Б. О. Перспективы развития электрических автобусов // *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. 2020. № 3 (62). С. 19 – 24.

3. Шавкун В. М. Исследование влияния эксплуатационных факторов на параметры нагружения силового электрооборудования троллейбусов // *Символ науки: международный научный журнал*. 2015. № 11 – 1. С. 64 – 67.

4. Старикова А. Г., Ганичев А. И., Тычков А. С. Повышение эксплуатационной надежности работы тягового привода троллейбуса АКМ-321 // *Наука и образование транспорта*. 2022. № 1. С. 119 – 122.

5. Денисов А.С., Феклин Е.В., Игнатов А.В. Влияние уровня специализации производства на эффективность технического сервиса и безопасность эксплуатации автобусов. *Вестник СибАДИ*. 2022;19 (5): 666 – 679. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-666-679>

6. Феклин Е. В. Повышение эффективности технического сервиса автобусов формированием централизованных специализированных производств // *Грузовик*. 2022. № 9. С. 22 – 26.

7. Денисов А. С., Приказчиков К. Н. Влияние периодичности, объема и качества технического обслуживания на затраты на обеспечение работоспособности автобусов // *Мир транспорта и технологических машин*. 2015. № 3. С. 17 – 24.

8. Пашукевич С. В. Образование и влияние сажи на моторные масла. *Вестник СибАДИ*. 2023; 20 (2): 248 – 259. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-248-259>. EDN: ZPHHOZ

9. Корнеев С. В., Пашукевич С. В., Бакулина В. Д., Певнев Н. Г. Загрязнение моторных масел при зимней эксплуатации автомобилей. *Вестник СибАДИ*. 2022;19 (5): 680 – 691. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-680-691>

10. Колин А. В. Троллейбус, автобус или электробус? // *Транспорт Российской Федерации*. 2018. № 3 (76). С. 38 – 42.

11. Сулейманов Э. С., Умеров Э. Д., Менасанова С. Э. Анализ изменения затрат на обеспечение работоспособности автобусов в зависимости от качества технического обслуживания // *Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета*. 2023. № 1 (79). С. 173 – 179.

12. Абрамян С. К. Голубкина К. В. История развития троллейбусного движения в Новороссийске (часть 1) // *Вопросы истории*. 2021. № 12-2. С. 164 – 169.

13. Абрамян С. К., Голубкина К. В. История развития троллейбусного движения в Новороссийске (Часть 2) // *Вопросы истории*. 2021. № 12 – 3. С. 102-107.

14. Орлов В. А. Диспетчерское управление городским транспортом. Троллейбусы и трамваи // *Вестник транспорта*. 2020. № 9. С. 37 – 39. EDN ICDXIT.

<sup>17</sup> Денисов А. С., Кайданов Б. А., Феклин Е. В., Приказчиков К. Н. Совершенствование технического состояния пассажирского подвижного состава как составляющей городской агломерацией // *Эффективность технической эксплуатации и автосервиса транспортных и технологических машин: Сборник научных статей по материалам III Международной научной конференции*, Саратов, 14 апреля 2017 года. Саратов: Государственное автономное учреждение дополнительного профессионального образования «Саратовский областной институт развития образования». 2017. С. 26 – 29.

15. Мухаметова М. Основные тенденции в мировой автомобильной промышленности // РИСК. 2012. №IV – 2012. С. 193. С. 189 – 195.

16. Тузов Н. С. Попов Е. В. Техническая подготовка производства технического обслуживания и ремонта автобусов – основа эффективности // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2019. № 1 – 3. С. 216 – 220.

17. Мальцев Д. В. Пестриков С. А. Определение оптимальной периодичности технического обслуживания автобусов // Мир транспорта. 2018. Т. 16, № 2 (75). С. 96 – 105.

## REFERENCES

1. Glushkova Yu.O., Pahomova A.V., Asoyan A.R. Comparison of economic effectiveness between trolley and bus operation process according to ecological factor. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2018; 15 (3): 372 – 389. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-3-372-389>

2. Bludjan, N. O., Pevnaja A. A., Uvarov B. O. Perspektivy razvitiya jelektricheskikh avtobusov [Prospects for the development of electric buses]. Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta (MADI). 2020; 3 (62): 19 – 24. (In Russ.)

3. Shavkun V. M. Issledovanie vlijaniya jekspluatacionnykh faktorov na parametry nagruženija silovogo jelektrooborudovanija trollejbusov [Investigation of the influence of operational factors on the loading parameters of power electrical equipment of trolleybuses]. Simvol nauki: mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal. 2015; 11 – 1: 64 – 67. (In Russ.)

4. Starikova A. G., Ganchev A. I., Tychkov A. S. Povyshenie jekspluatacionnoj nadezhnosti raboty tjagovogo privoda trollejbusa AKSM-321 [Improving the operational reliability of the traction drive of the AXM-321 trolleybus]. Nauka i obrazovanie transportu. 2022; 1: 119 – 122. (In Russ.)

5. Denisov A. S., Feklin E. V., Ignatov A. V. Influence of production specialisation level on efficiency of technical service and safety of buses operation. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2022; 19 (5): 666 – 679. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-666-679>

6. Feklin E. V. Povyshenie jeffektivnosti tehničeskogo servisa avtobusov formirovaniem centralizovannykh specializirovannykh proizvodstv [Improving the efficiency of technical service buses by the formation of centralized specialized industries]. Gruzovik. 2022; 9: 22 – 26. (In Russ.)

7. Denisov A. S., Prikazchikov K. N. Vlijanie periodičnosti, ob'ema i kachestva tehničeskogo obsluzhivaniya na zatraty na obespechenie rabotosposobnosti avtobusov [The influence of periodicity, volume and quality of maintenance on the costs of ensuring the operability of buses]. Mir transporta i tehnologičeskikh mashin. 2015; 3: 17 – 24. (In Russ.)

8. Pashukevich S. V. Soot formation and effect on engine oils. The Russian Automobile and

Highway Industry Journal. 2023; 20 (2): 248 – 259. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-248-259>. EDN: ZPHHOZ

9. Korneev S. V., Pashukevich S. V., Bakulina V. D., Pevnev N. G. Contamination of engine oils during winter vehicle operation. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2022; 19 (5): 680 – 691. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-680-691>

10. Kolin A. V. Trollejbus, avtobus ili jelektrobus? [Trolleybus, bus or electric bus?]. Transport Rossijskoj Federacii. 2018; 3 (76): 38 – 42. (In Russ.)

11. Sulejmanov Je. S. Umerov Je. D., Menasanova S. Je. Analiz izmenenija zatrat na obespechenie rabotosposobnosti avtobusov v zavisimosti ot kachestva tehničeskogo obsluzhivaniya [Analysis of changes in the costs of ensuring the operability of buses depending on the quality of maintenance]. Uchenye zapiski Krymskogo inženerno-pedagogičeskogo universiteta. 2023; 1 (79): 173 – 179. (In Russ.)

12. Abramjan S. K. Golubkina K. V. Istorija razvitiya trollejbusnogo dvizhenija v Novorossijske (chast' 1) [History of trolleybus traffic development in Novorossiysk (Part 1)]. Voprosy istorii. 2021; 12 – 2: 164-169. (In Russ.)

13. Abramjan S. K., Golubkina K. V. Istorija razvitiya trollejbusnogo dvizhenija v Novorossijske (Chast' 2) [History of trolleybus traffic development in Novorossiysk (Part 2)]. Voprosy istorii. 2021; 12-3: 102 – 107. (In Russ.)

14. Orlov V. A. Dispatcherское управление городским транспортом. Trollejbusy i tramvai [Dispatching management of urban transport. Trolleybuses and trams]. Vestnik transporta. 2020; 9: 37 – 39. EDN ICDXIT. (In Russ.)

15. Muhametova M. Osnovnye tendencii v mirovoj avtomobil'noj promyshlennosti [The main trends in the global automotive industry]. RISK. 2012; №IV-2012: 193. 189 – 195. (In Russ.)

16. Tuzov N. S. Popov E. V. Tehničeskaja podgotovka proizvodstva tehničeskogo obsluzhivaniya i remonta avtobusov - osnova jeffektivnosti [Technical preparation of production of maintenance and repair of buses - the basis of efficiency]. Dal'nij Vostok: problemy razvitiya arhitekturno-stroitel'nogo kompleksa. 2019; 1 – 3: 216-220. (In Russ.)

17. Mal'cev D. V. Pestrikov S. A. Opredelenie optimal'noj periodičnosti tehničeskogo obsluzhivaniya avtobusov [Determining the optimal frequency of bus maintenance]. Mir transporta. 2018; Т. 16. № 2 (75): 96 – 105. (In Russ.)

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Колин А.В. Поиск и анализ руководств по эксплуатации приведенных транспортных средств. Детализация трудоёмкостей операций по каждому виду ремонта и обслуживания. Выявление причин, влияющих на разницу в значениях трудоёмкости обслуживания и ремонта троллейбусов и автобусов.*

*Рыбаков П.В. Анализ руководств по эксплуатации приведенных транспортных средств. Оформление материала.*

## COAUTHORS' CONTRIBUTION

*Aleksei V. Kolin. Search and analysis of the operating manuals for the above vehicles. Detailing the complexity of operations for each type of repair and maintenance. Identification of the reasons affecting the difference in the values of labour intensity of trolleybuses and buses maintenance and repair.*

*Pavel V. Rybakov. Analysis of the operating manuals for the above vehicles. The layout of the article.*

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Колин Алексей Валентинович – начальник центра «Научно-образовательный центр (НКТИ)», старший преподаватель кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», УТБиИС Российского университета транспорта (МИИТ). SPIN-код: 5721-8320.*

*Рыбаков Павел Валерьевич – инженер центра «Научно-образовательный центр (НКТИ)», ассистент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», УТБиИС Российского университета транспорта (МИИТ). SPIN-код: 4822-3515.*

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Aleksei V. Kolin. Head of the Scientific and Educational Center (NKTI), Senior Lecturer of the Transport Business Management and Intelligent Systems Department, Russian University of Transport (MIIT). SPIN-код: 5721-8320.*

*Pavel V. Rybakov. Engineer of the Scientific and Educational Center (NKTI), Assistant of the Transport Business Management and Intelligent Systems Department, Russian University of Transport (MIIT). SPIN-код: 4822-3515.*

Научная статья  
УДК 621.757  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-458-473>  
EDN: HIKZCC



## ИССЛЕДОВАНИЯ АДГЕЗИОННЫХ И ИЗНОСОУСТОЙЧИВЫХ СВОЙСТВ ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ И ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

А. Н. Котомчин<sup>1</sup>, В. А. Зорин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко,  
г. Тирасполь, Молдавия

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

[aleshka81@list.ru](mailto:aleshka81@list.ru), <http://orcid.org/0000-0002-4750-525>  
[madi-dm@list.ru](mailto:madi-dm@list.ru), <http://orcid.org/0009-0006-8565-7707>

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Использование хромирования в качестве способа восстановления деталей, работающих при гидроабразивном изнашивании, имеет большое значение для восстановления работоспособности агрегатов и деталей гидропривода, используемых на специализированном автотранспорте и дорожно-строительной технике. Предлагаемый способ восстановления хромированием обладает необходимыми преимуществами, это достаточно высокая производительность и микротвердость получаемых хромовых покрытий. Однако для внедрения в производство потребовались дополнительные исследования надёжности получаемых хромовых покрытий, а именно прочность сцепления и износостойкость. Это позволит сделать выводы перспектив дальнейшего внедрения и использования для восстановления деталей гидропривода и других деталей, которые работают при гидроабразивном изнашивании.

**Материалы и методы.** Для проведения исследований использовалось оборудование, отвечающее требованиям технических условий, с использованием существующих и разработанных приспособлений и приборов для получения хромированных осадков. С этой целью были изготовлены необходимые приспособления и образцы из соответствующего материала для приближения достоверности получаемых результатов исследований. Также для оцифровки получаемых данных на машине трения были произведены необходимые усовершенствования.

**Результаты.** Выполненные исследования прочности сцепления показали, что данные хромовые покрытия из нового состава электролита позволят получать прочность сцепления, достигающее 270 МПа, что достаточно для деталей, работающих при больших давлениях (20 МПа) с необходимым запасом прочности. Также проведенные исследования износостойкости хромовых покрытий позволили заключить, что износостойкость получаемых хромовых покрытий выше на 20 – 30% по сравнению с эталонной поверхностью (материал изготовления золотника).

**Обсуждение и заключение.** Исследования полученных хромовых покрытий из нового состава электролита установили закономерности влияния состава электролита и режимов проведения испытания на износостойкость получаемых осадков по сравнению с существующим универсальным электролитом хромирования. Полученные результаты подтвердили возможность использования хромового покрытия из нового электролита хромирования для восстановления деталей автомобилей и дорожно-строительных машин, работающих при гидроабразивном изнашивании.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** хромирование, холодный электролит, прочность сцепления, износостойкость, гидроабразивное изнашивание

**БЛАГОДАРНОСТИ:** благодарность рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 06.07.2023; одобрена после рецензирования 28.08.2023; принята к публикации 30.08.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Котомчин А. Н., Зорин В. А., 2023



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Котомчин А. Н., Зорин В. А. Исследования адгезионных и износостойчивых свойств хромовых покрытий для восстановления деталей автомобилей и дорожно-строительной техники // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 4 (92). С. 458-473. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-458-473>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-458-473>

EDN: HIKZCC

## STUDIES OF ADHESIVE AND WEAR-RESISTANT PROPERTIES OF CHROME COATINGS FOR CAR PARTS AND ROAD CONSTRUCTION EQUIPMENT RESTORATION

Aleksei N. Kotomchin<sup>1</sup>, Vladimir A. Zorin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>T.G. Shevchenko Pridnestrovian State University  
Tiraspol, Moldavia.

<sup>2</sup>Moscow State Automobile and Highway Technical University (MADI),  
Moscow, Russia

[aleshka81@list.ru](mailto:aleshka81@list.ru), <http://orcid.org/0000-0002-4750-525>  
[madi-dm@list.ru](mailto:madi-dm@list.ru), <http://orcid.org/0009-0006-8565-7707>

### ABSTRACT

**Introduction.** The use of chrome plating as a method of restoring parts that work with waterjet wear is important for restoring the operability of hydraulic drive units and parts used in specialized vehicles and road construction equipment. The proposed method of chrome recovery has the necessary advantages, it is a sufficiently high performance and microhardness of the resulting chrome coatings. However, for implementation in production, additional studies of the reliability of the chrome coatings obtained, namely, adhesion strength and wear resistance, were required. This will make possible to draw conclusions about the prospects for further implementation and use for the restoration of hydraulic drive parts and other parts that work with waterjet wear.

**Materials and methods.** To conduct the research, equipment meeting the requirements of technical conditions, using existing and developed devices and devices for obtaining chrome precipitation was used. For this purpose, the necessary devices and samples from the appropriate material to approximate the reliability of the obtained research results were made. Also the necessary improvements to digitize the data obtained on the friction machine were made.

**Results.** The performed studies of adhesion strength have shown that the chrome coatings obtained from the new electrolyte composition will make possible to obtain adhesion strength reaching 270 MPa, which is sufficient for parts operating at high pressures (20 MPa) with the necessary margin of safety. Also the studies conducted on the wear resistance of chrome coatings let to conclude that the wear resistance of the chrome coatings obtained is 20-30% higher compared to the reference surface (the material of the spool manufacture).

**Discussion and conclusion.** The studies of the obtained chrome coatings from the new electrolyte composition made possible to establish, which let to establish the regularities of the influence of the electrolyte composition and the modes of testing the wear resistance of the precipitation obtained compared with the existing universal chromium plating electrolyte. The results obtained confirmed the possibility of using a chrome coating from a new chromium plating electrolyte for the restoration of car parts and road construction machines operating under waterjet wear.

**KEYWORDS:** chrome plating, cold electrolyte, adhesion strength, wear resistance, waterjet wear

**ACKNOWLEDGEMENT.** We are grateful to the reviewers of the article.

**The article was submitted 06.07.2023; approved after reviewing 28.08.2023; accepted for publication 30.08.2023.**

**The authors have read and approved the final manuscript.**

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

*For citation.* Aleksei N. Kotomchin, Vladimir A. Zorin Studies of adhesive and wear-resistant properties of chrome coatings for car parts and road construction equipment restoration. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (4): 458-473. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-458-473>

© Kotomchin A. N., Zorin V. A., 2023



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

## ВВЕДЕНИЕ

Известно, что по экономическим соображениям в нашей стране эксплуатация техники происходит с большими пробегами и наработкой. В результате чего количество отказов возрастает, что приводит к увеличению простоев в ТО и ремонте. Поэтому требуется проводить качественный ремонт с восстановлением работоспособности, с целью обеспечения надёжности на достаточном уровне с минимальными затратами. Восстановление деталей автомобилей и дорожно-строительной техники имеет большое экономическое значение для экономики страны. При этом отремонтированная машина должна ещё проработать не менее 80% от первоначального ресурса. Поэтому необходимо уделять большое внимание новым технологиям восстановления деталей, которые должны продлевать ресурс детали и восстанавливать машину ещё на один период эксплуатации не сильно уступающим новой машине<sup>1, 2, 3</sup> [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

Современная техника, в которой используются детали, зачастую имеет незначительный износ (менее 0,5 мм), который приводит к потере работоспособности агрегата и автомобиля в целом. Поэтому использование хромирования в качестве способа восстановления становится возможным для деталей, работающих при гидроабразивном изнашивании. При этом положительные качества (высокая износостойкость и прочность сцепления) делает их одним из перспективных<sup>4</sup> [9, 10, 11, 12, 13].

Изучение прочности сцепления и износостойкости хромовых получаемых покрытий имеет большое значение, с целью дальнейшего практического использования при вос-

становлении деталей автомобилей и дорожно-строительной техники<sup>5, 6</sup>. Это связано с тем, что данные детали работают с очень малыми зазорами, равными несколько микрон, что может приводить к разрушению прецизионной пары или к её заклиниванию. Поэтому от результатов исследования прочности сцепления будет зависеть дальнейшее использование получаемых покрытий для восстановления деталей автомобилей и дорожно-строительной техники.

Полученные результаты исследований электролитов хромирования позволили разработать новый способ получения электролитического покрытия – холодный саморегулирующийся электролит хромирования [14], обладающий рядом преимуществ в сравнении с существующими электролитами хромирования<sup>7</sup> [15, 16, 17, 18, 19]:

1. Достаточно большая производительность (выход по току 46–50%).
2. Более широкий диапазон рабочих температур (18–35 °С).
3. Хорошая рассеивающая способность.

При разработке любого электролита хромирования, с целью использования для восстановления деталей, возникает необходимость исследований их на прочность сцепления и износостойкость, которые являются важными характеристиками хромового покрытия. Поэтому проведение испытаний на адгезионную износостойкость является заключительным этапом проведения исследований хромовых покрытий перед практическим использованием и эксплуатационным испытанием восстановленных деталей автомобилей и дорожно-строительной техники, работающих при гидроабразивном изнашивании.

<sup>1</sup> Черноиванов В. И., Голубев И. Г. Восстановление деталей машин (состояние и перспективы) / М.: ФГНУ «Росинформ-агротех». 2010. 376 с.

<sup>2</sup> Восстановление деталей машин: справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов [и др.] / под общей редакцией В. П. Иванова. М: Машиностроение, 2003. 672 с.

<sup>3</sup> Носенко А. С., Домницкий А. А. Исследование надёжности и совершенствование конструкции контейнерных мусоровозов // Погрузочно-транспортные, строительно-дорожные и коммунальные машины. Технический сервис и конструкции: сб. науч. тр. / Шахтинский ин-т ЮРГТУ. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2004. С. 19 – 24.

<sup>4</sup> Петров Ю. Н., Корнейчук Н. И. и др. Прогрессивные способы восстановления деталей машин и повышения их прочности // Межвузовский сборник научных трудов. Кишинев: Кишиневский сельскохозяйственный институт им. М. В. Фрунзе, 1979. С. 48–51.

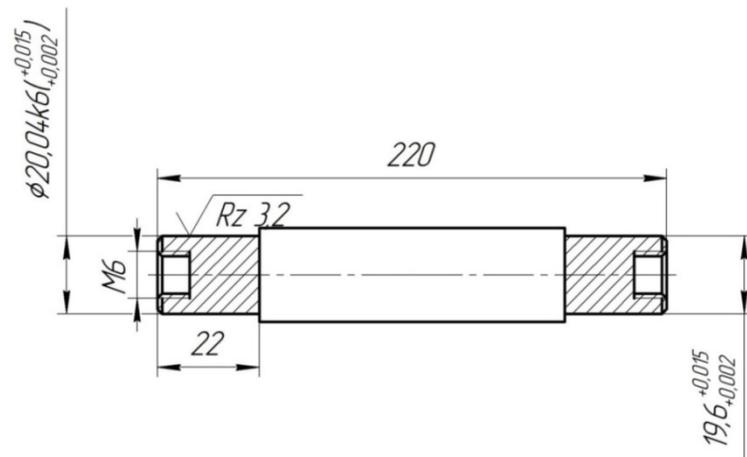
<sup>5</sup> Зорин В.А. Основы работоспособности технических систем: учебник для вузов. М.: ООО «Магистр-Пресс», 2005. 536 с.

<sup>6</sup> Зорин В.А. Надёжность механических систем: учебник для вузов. М.: Изд. «ИНФРА-М», 2015. 379 с.

<sup>7</sup> Стратулат М. П. Восстановление и упрочнение деталей машин скоростным электролитическим хромированием // Тезисы докладов международной научно-практической конференции, «Инженерно-техническое обеспечение АПК и машино-технологические станции в условиях реформирования». Т 1. Орел, 2000. С. 97 – 98.



а



б

Рисунок 1 – Оборудование для испытания прочности сцепления:  
а – приспособление с прессом для исследований; б – чертёж вала-образца<sup>8</sup> [15]

Figure 1 – Equipment for testing the strength of adhesion:  
a – a device with a press for research, b - a drawing of the sample shaft [15]

Целью исследований является анализ прочности сцепления и износостойкости получаемых хромовых покрытий из разработанного нового состава электролита по сравнению с существующим электролитом (универсального), с целью использования данного способа для восстановления деталей автомобилей и дорожно-строительной техники, работающих при гидроабразивном изнашивании.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

При проверке прочности сцепления получаемых хромовых покрытий использовали методику по ГОСТ-9.302–88. Для этого применяли необходимое оборудование в виде прессы с усилием 100 кН и вала-образца, который покрывался на необходимую толщину хромовым покрытием. Во время проверки прочности сцепления получаемых хромовых покрытий использовали многократную запрессовку-выпрессовку (циклы) матрицы для испытаний с необходимыми размерами (рисунок 1, а).

Для проведения исследований на прочность сцепления применяли образец-вал, который был изготовлен из стали марки 45 по ГОСТ-1050–88. Шейку готовили обработкой для покрытий с первоначальным размером с учётом толщины первоначального покрытия

0,3–0,35 – диаметром 19,60 мм, с последующим шлифованием до толщины 20,04...20,05 мм. В качестве матрицы (контртела) использовали шариковый радиально-упорный подшипник №204 ГОСТ 831–75 с внутренним диаметром  $20^{+0,015}_{+0,002}$  мм [20].

Шлифование хромированной поверхности осуществляли до шероховатости 3,2 мкм (рисунок 1, б).

При определении прочности сцепления получаемых хромовых покрытий с основой образца использовали формулу

$$\tau_{\text{пр.сц.}} = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot b}, \quad (1)$$

где  $\tau_{\text{пр.сц.}}$  – прочность сцепления хромового покрытия, МПа;

F – измеренный сдвиг на вал-образец, Н;

D – диаметр вала-образца, мм;

b – толщина хромового покрытия после шлифования, мм.

При испытаниях значение посадки с натягом превышало допуск в несколько раз. Запрессовку контртела на вал-образец производили с помощью прессы при различных нагрузках – от 0 МПа до нагрузки, при которой будет происходить разрушение и отделение хромированной поверхности (рисунок 2).

<sup>8</sup> Котомчин А.Н. Совершенствование технологии электролитического хромирования для восстановления деталей автомобилей, работающих при гидроабразивном изнашивании: дис. канд. техн. наук: 05.22.10. М., 2022. 198 с.



Рисунок 2 – Вид испытуемого образца-вала в зависимости от нагрузки: а – при нагрузке 0 МПа; б – при нагрузке до 270 МПа; в – при нагрузке 300 МПа<sup>9</sup> [19, 20, 21]

Figure 2 – Type of test sample-shaft depending on the load: a – at a load of 0 MPa; b – at a load of up to 270 MPa, c – at a load of 300 MPa [19, 20, 21]

Для оценки исследуемой износостойкости получаемых хромовых покрытий из нового и существующего электролита в сравнении с эталонной парой трения использовали машину трения СМЦ-2М. Испытания проводили по ГОСТ 23.224–86, с целью перевода результатов в цифровой вариант использовали цифровой осциллограф, который показан на рисунке 2, а.

Для испытаний на износостойкость применяли образцы-ролики, которые изготавливались диаметром 49,5...49,6 мм с толщиной 12 мм. В качестве материала использовали сталь 40Х (материал изготовления золотника гидрораспределителя Р-80). Хромировали образцы-ролики на толщину 0,35...0,40 мм с последующим шлифованием до размеров  $\varnothing 50^{+0,01}$  мм с шероховатостью 0,16...0,32 мкм (рисунок 2, б, в).

Подготовка к исследованиям на износостойкость образцов-роликов, покрытых хромом, и изготовление образцов-роликов проводилась с использованием оборудования на предприятии Научно-производственное закрытое акционерное общество «Электромаш», расположенное в г. Тирасполе (Приднестровье). Механическая обработка образцов-роликов состояла из следующих операций:

1. Подготовка поверхности под хромовое покрытие. Применяли образец-ролик из заготовки первичной расточкой и последующим шлифованием. Шлифование проводилось до необходимых размеров для достижения шероховатости 0,63...0,32 мкм с использованием оправки от машины трения. Это проводилось для получения необходимой точности и для

исключения лишней механической обработки.

2. Обработка и подготовка образцов-роликов под испытания на машине трения. Для этого использовали операцию шлифования, которая обязательно производилась в оправке от машины трения.

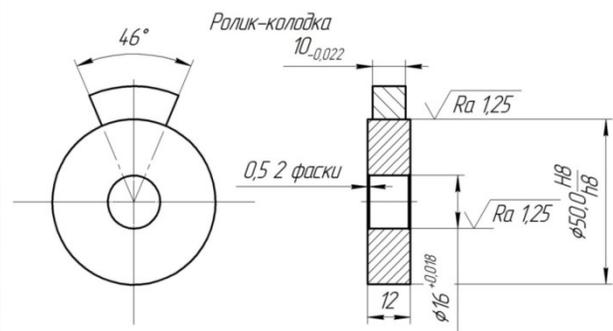
Операции шлифования проходили на шлифовальном станке ЗУ131 на режимах, которые исключали появления дефектов, повреждений обрабатываемых поверхностей для достижения необходимой шероховатости 0,63...32 мкм.

Контртелом (рисунок 3, г) для испытаний на износостойкость использовалась колодка, сделанная из материала, из которого изготавливался корпус гидрораспределителя Р-80 – из серого чугуна СЧ-21 ГОСТ 1412–93. При этом площадь контакта составляла 1 см<sup>2</sup>. При испытании образец-ролик вращался со скоростью оборотов 450 об/мин. Для снижения термического и граничного влияния при приработке и испытании на износостойкость использовали масло М10Г<sub>2</sub>, с подачей масла с периодичностью в течении 3-5 мин по одной капле. Применяли для этого специально оборудованную капельницу с микрорегулированием подачи масла, закрепленную на машине трения и с подачей масла по месту контакта пары трения. Для достижения максимального прилегания колодки к образцу-ролику использовали шарнирную опору. Чтобы снижение времени приработки пары трения выполняли подгонку с применением абразивного круга диаметром 50 мм с необходимой зернистостью, который закрепляли на оправке машины трения вместо образца-ролика [21].

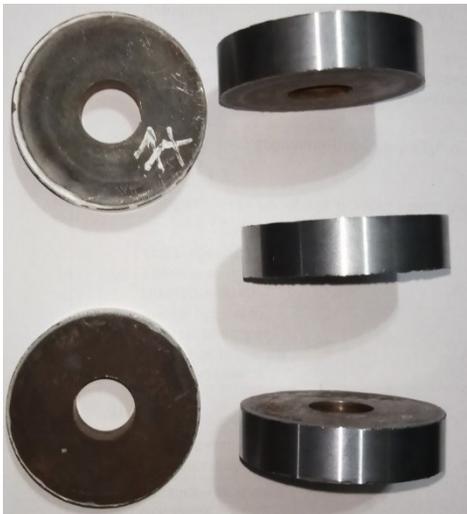
<sup>9</sup> Котомчин А. Н. Совершенствование технологии электролитического хромирования для восстановления деталей автомобилей, работающих при гидроабразивном изнашивании: дис. канд. техн. наук: 05.22.10. М., 2022. 198 с.



а



б



в



г

Рисунок 3 – Машины и приспособления для исследований износостойкости:  
а – машина трения СМЦ-2М с осциллографом; б – ролик-колодка с размерами; в – покрытые хромом ролики;  
г – колодка с отверстием для термопары (контртело)<sup>10</sup> [21];

Figure 3 – Machines and devices for wear resistance research:  
а – SMC-2M friction machine with an oscilloscope, б – roller-pad with dimensions,  
с – chrome-plated rollers, d - pad with a hole for a thermocouple (counter body) [21]

Микроструктуру поверхностей пар трения изучали с использованием микроскопа ММУ-3 с приставкой для оцифровки изображения на экране ноутбука. При исследовании микроструктуры проверяли поверхности на качество и состояние – наличие микротрещин, сколов, пригаров и т.п.

При исследовании начального периода износа использовали оборудование для оцифровки – осциллограф, подключенный к аналоговому осциллографу машины трения СМЦ-2М. Измерения проводились автоматически с выводом на экран ноутбука, обработанного сигнала с построением графика износа в реальном времени.

В процессе испытания на износостойкость пары трения колодка-ролик возникла необходимость контроля температуры в месте контакта, что косвенно давало информацию о динамике приработки и процесса износа под нагрузкой (рисунок 4). Кроме того, температура в месте контакта давала информацию о качестве смазки и при необходимости проводилась регулировка подачи масла для уменьшения трения скольжения. Конечным итогом оценки качества приработки являлась стабильность температуры и равномерное пятно места контакта с характерной шероховатостью.

<sup>10</sup> Котомчин А. Н. Совершенствование технологии электролитического хромирования для восстановления деталей автомобилей, работающих при гидроабразивном изнашивании: дис. канд. техн. наук: 05.22.10. М., 2022. 198 с.

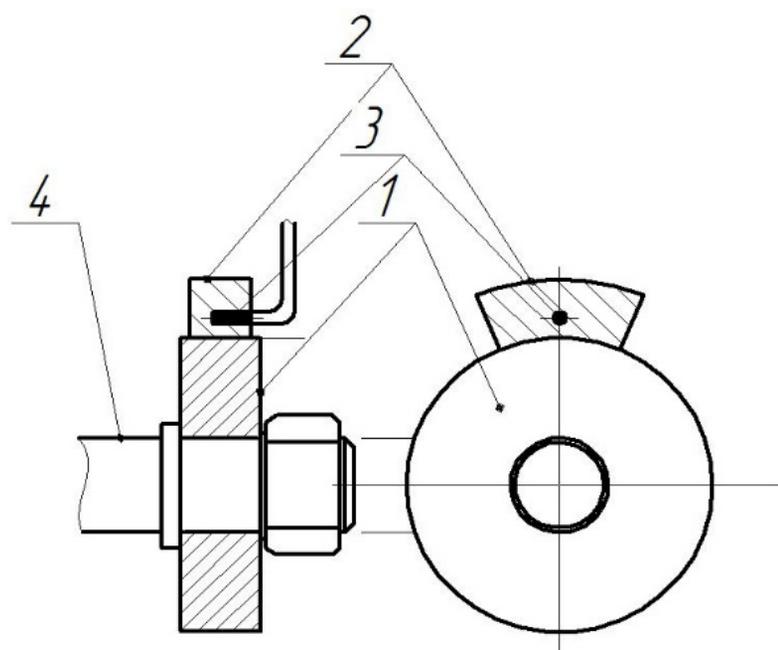


Рисунок 4 – Место контроля температуры в зоне контакта пары трения колодка-ролик:  
1 – образец-ролик; 2 – колодка (контртело); 3 – контакт термопары;  
4 – оправка машины трения<sup>11</sup> [21]

Figure 4 – Temperature control area in the contact zone of the pad-roller friction pair:  
1 – sample-roller, 2 – pad (counterbody), 3 – thermocouple contact, 4 – friction machine mandrel [21]

Контроль температуры в области контакта пары трения колодка-ролик выполнялся с помощью термопары 3 (рисунок 3). Оцифровка значений температуры осуществлялась при помощи осциллографа фирмы Nantek 1008, который был подключён к ПК, где формировался график изменения температуры, по которому можно было судить процесс приработки – время, качество, скорость и т.п. [21, 22].

Методику измерения температуры можно увидеть на рисунке 3, из которого видно, что для испытания на износостойкость пары трения ролик-колодка термопара была установлена в отверстие, выполненное в колодке на расстоянии 1–1,5 мм от места контакта, это позволило достичь точного измерения температуры в месте контакта, а также снизить возможность повреждения оборудования от контакта со смазкой и продуктами износа и дать возможность использовать оборудование для оцифровки сигнала. Испытания проводились согласно требованиям ГОСТ Р 8.585–2001. Подключение термопары 3 как датчика температуры производилось к одному из каналов

осциллографа и при помощи программного обеспечения, сигнал оцифровался и выводился на ПК с соответствующими значениями [22].

Перед измерением величины износа необходимо было обязательно промывать образец-ролик и колодку в керосине и в дистиллированной воде и тщательно просушивать. Для измерения величины износа использовался гравиметрический метод, который характеризовался путем измерения массы ролика и колодки через каждые 10 ч испытаний. Для измерения величины износа при испытаниях применялись аналитические весы ВАЛ-200 с точностью измерений 0,0001 г. Значения массы фиксировались с начала приработки.

Исследование поверхности испытуемых пар трения осуществлялось при нагрузке с 10 до 35 кг/см<sup>2</sup> с шагом изменения нагрузки 5 кг/см<sup>2</sup>. В результате приработки и стабилизированного момента трения площадь контакта не меньше 90% от общей площади. Постепенно увеличивали нагрузку до планируемой во избежание увеличения момента трения.

<sup>11</sup> Котомчин А. Н. Совершенствование технологии электролитического хромирования для восстановления деталей автомобилей, работающих при гидроабразивном изнашивании: дис. канд. техн. наук: 05.22.10. М., 2022. 198 с.

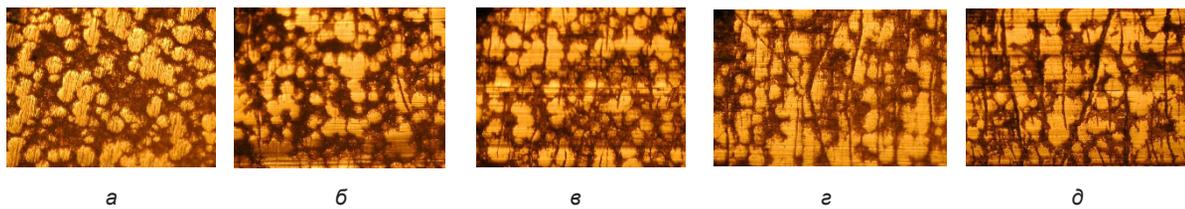


Рисунок 5 – Вид микроструктуры поверхности образца-вала, покрытого хромом: а – до испытания, б – после 3 циклов, в – после 6 циклов, г – после 9 циклов, д – после 12 циклов [21]

Figure 5 – Type of microstructure of the surface of the sample-shaft coated with chromium: а – before the test, б – after 3 cycles, в – after 6 cycles, г – after 9 cycles, д – after 12 cycles [21]

При этом предельно допустимой нагрузкой принималась нагрузка, при которой пара трения переходила в изнашивание с патологической формой<sup>12</sup> [23, 24], которую определяли с помощью микроскопа ММУ-3 с приставкой для оцифровки изображения на экране ноутбука.

Для вычисления коэффициента трения использовали формулу<sup>13</sup>

$$f = \frac{M_{\text{тр}}}{F \cdot r}, \quad (2)$$

где  $f$  – коэффициент трения;

$M_{\text{тр}}$  – момент трения, кг·см;

$F$  – внешняя нагрузка на поверхность контакта при трении, кг;

$r$  – радиус образца-ролика, см.

Определяли износ образцов-роликов по формуле

$$i = M_{\text{до}} - M_{\text{после}}, \quad (3)$$

где  $i$  – износ образца-ролика, г;

$M_{\text{до}}$  – масса образца-ролика до испытаний, г;

$M_{\text{после}}$  – масса образца-ролика после испытаний, г.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования прочности сцепления хромового покрытия, полученного из холодного саморегулирующегося электролита хромирования следующего состава: хромовый ангидрид – 400–450 г/л, сульфат никеля – 10 г/л,

сульфат кобальта – 10 г/л, карбонат кальция – 50–70 г/л, плавиковая кислота – 0,65–0,9 г/л, при режимах осаждения: плотность тока 75–200 А/дм<sup>2</sup> и рабочая температура электролита 18–35 °С [22, 23, 24].

Результаты исследований прочности сцепления<sup>14</sup> [25, 26, 27, 28, 29] показали, что прочность сцепления хромового покрытия из нового состава позволяет получать хромовые покрытия с прочностью сцепления в пределах 220–270 МПа. При этом поверхность оставалась стабильной, с небольшой деформацией, не влияющей на качество покрытия (см. рисунок 2, б). Дальнейшее увеличение нагрузки на поверхность начинало приводить к постепенному разрушению поверхности и при нагрузке более 300 МПа приводило к скалыванию и отслаиванию (см. рисунок 2, в).

Исследование микроструктуры хромовых покрытий при испытании прочности сцепления показали, что многократная запрессовка-выпрессовка приводила к появлению небольшого количества рисок и царапин, износ по диаметру практически отсутствовал. При этом на качество покрытия все полученные механические воздействия не влияли. На рисунке 5 показано изменение микроструктуры поверхности при 3, 6, 9, 12 количества циклов, при этом разрушение поверхности и скалывание не наблюдались (см. рисунок 5). Данные результаты дали предположение, что хромовые покрытия, получаемые из нового электролита, обладают высокой износостойкостью.

<sup>12</sup> Трение, изнашивание и смазка: справочник: в 2 кн. / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. М.: Машиностроение, 1978. 400 с.

<sup>13</sup> Исследование трения и износа деталей при ремонте машин и оборудования: методические указания / сост.: А. Т. Лебедев, П. А. Лебедев, А. В. Захарин, Р. В. Павлюк, Ю. И. Жевора, Н. П. Доронина, Н. А. Марьин. Ставрополь: АГРУС Ставропольского гос. аграрного ун-та, 2016. 57 с.

<sup>14</sup> Стратулат М.П. Сцепляемость упрочняющих электролитических хромовых покрытий с чугуной подложкой деталей машин // Сборник материалов IV Международной научно-практической интернет-конференции, «Энерго – и ресурсосбережение – XXI век». Орел: ОрелГТУ, 2006. 156 с.

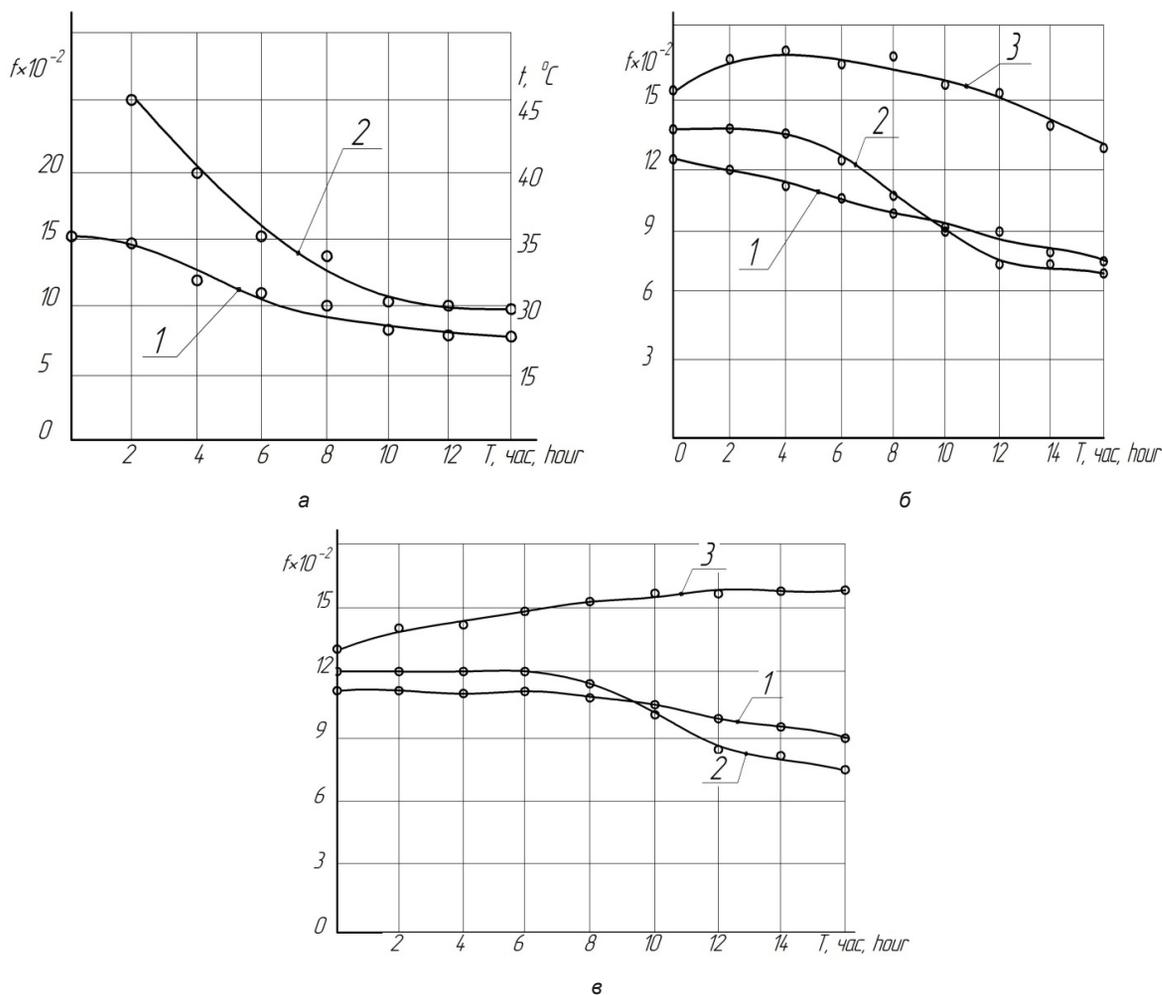


Рисунок 6 – Значение коэффициента трения ( $f \times 10^{-2}$ ) от времени приработки ( $T$ ) в зависимости от нагрузки: а – при  $15 \text{ кг/см}^2$ ; б – при  $20 \text{ кг/см}^2$ ; в – при  $25 \text{ кг/см}^2$ : 1 – с добавкой плавиковой кислоты, 2 – универсальный электролит; 3 – без добавки  $\text{HF}^{15}$

Figure 6 – The value of the coefficient of friction ( $f \times 10^{-2}$ ) from the running-in time ( $T$ ) depending on the load: а – at  $15 \text{ kg / cm}^2$ , б - at  $20 \text{ kg / cm}^2$ , с - at  $25 \text{ kg / cm}^2$ : 1 – with the addition of hydrofluoric acid, 2 – universal electrolyte; 3 – without HF addition

Дальнейшие исследования подтвердили эти предположения.

Изучение микроструктуры при испытании на прочность сцепления показало, что хромовые покрытия удовлетворительны для деталей автомобилей и дорожно-строительных машин, работающих при гидроабразивном изнашивании. Примером таких деталей являются золотники гидрораспределителей, плунжеры масляных и топливных насосов.

Проведенные исследования нового состава электролита показали, что увеличение количе-

ства плавиковой кислоты в растворе более 1 г/л раствора приводило к снижению прочности сцепления. При испытаниях на прочность сцепления таких хромовых поверхностей приводило к появлению трещин и глубоких царапин и разрушению поверхности, что исключало применение для деталей, работающих при гидроабразивном изнашивании.

Это приводило к нецелесообразности дальнейшего увеличения концентрации плавиковой кислоты.

<sup>15</sup> Котомчин А. Н. Совершенствование технологии электролитического хромирования для восстановления деталей автомобилей, работающих при гидроабразивном изнашивании: дис. канд. техн. наук: 05.22.10. М., 2022. 198 с.

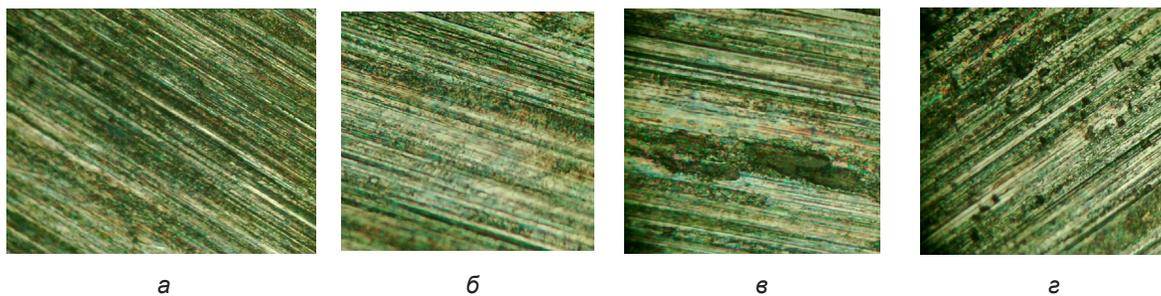


Рисунок 7 – Микроструктура поверхности хромированных ролик-образцов в зависимости нагрузки, кг/см<sup>2</sup>: а – 10, б – 15, в – 20, г – 25<sup>16</sup>

Figure 7 – Microstructure of the surface of chrome-plated sample rollers depending on the load, kg/cm<sup>2</sup>: a – 10, b – 15, b – 20, g – 25

В результате были сделаны предварительные выводы, что для достижения высокой прочности сцепления и износостойкости необходимо, чтобы концентрация плавиковой кислоты была в пределах 0,65–0,9 г/л.

Дальнейшие исследования износостойкости хромовых покрытий из нового электролита показали, что в начале работы пары трения колодка-ролик происходит их приработка. Приработка является важным этапом для формирования качественной поверхности и от режимов, которой напрямую зависит дальнейшие исследования износостойкости при нагрузке. В результате приработки происходит формирование новой микроструктуры и рельефа поверхности, от которой зависит дальнейшая работа пары трения и её износостойкость<sup>17</sup> (рисунок 6).

Анализ результатов исследований процесса приработки пары трения колодка-ролик показал, что наиболее оптимальная нагрузка – 10–15 кг/см<sup>2</sup>. Исследования микроструктуры приработанных покрытий при данных нагрузках показали, что повреждения не наблюдались, происходило выравнивание неровностей поверхностей при достижении шероховатости в пределах 0,04–0,16 мкм. В результате чего происходит снижение и стабилизация температуры места контакта, а также стабилизация и снижение коэффициента трения (см. рисунок 6).

Дальнейшее увеличения нагрузки приработке до 20 кг/см<sup>2</sup> приводит к зависимости вида и качества покрытия на условия приработки хромового покрытия (рисунок 6, б). Испытания хромовых покрытий без добавки плавиковой кислоты привели к снижению стабильности температуры и коэффициента трения (рисунок 6, б, кривая 3), также происходили в некоторых случаях повреждения поверхности (рисунок 7, в).

При исследованиях хромовых осадков, получаемых из нового электролита хромирования (см. рисунок 6, б, кривая 1) и у универсального электролита (см. рисунок 6, б, кривая 2), нагрузка приработке 20 кг/см<sup>2</sup> не приводила к ухудшению качества покрытий, коэффициент трения и температура изначально незначительно росли, а потом параметры приработки стабилизировались. Однако время приработки превышало время чем при нагрузке 10÷15 кг/см<sup>2</sup>.

Дальнейшее увеличение нагрузки до 25 кг/см<sup>2</sup> у хромированных поверхностей с добавкой плавиковой кислоты (рисунок 6, в, кривая 1) приводило к незначительным повреждениям (рисунок 7, г). Для хромовых покрытий, получаемых без добавки плавиковой кислоты приводило к значительным повреждениям и переходило к паталогическому изнашиванию (см. рисунок 6, в, кривая 3).

<sup>16</sup> Котомчин А. Н. Совершенствование технологии электролитического хромирования для восстановления деталей автомобилей, работающих при гидроабразивном изнашивании: дис. канд. техн. наук: 05.22.10. М., 2022. 198 с.

<sup>17</sup> Тикалов А. В., Ефремов Л. В. Испытания пар трения колодка-диск с применением вибрационных параметров на машине трения // Неделя науки СПбПУ: материалы Научной конференции с международным участием. Лучшие доклады, Санкт-Петербург, 14 – 19 ноября 2016 года. Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2016. С. 95 – 98.

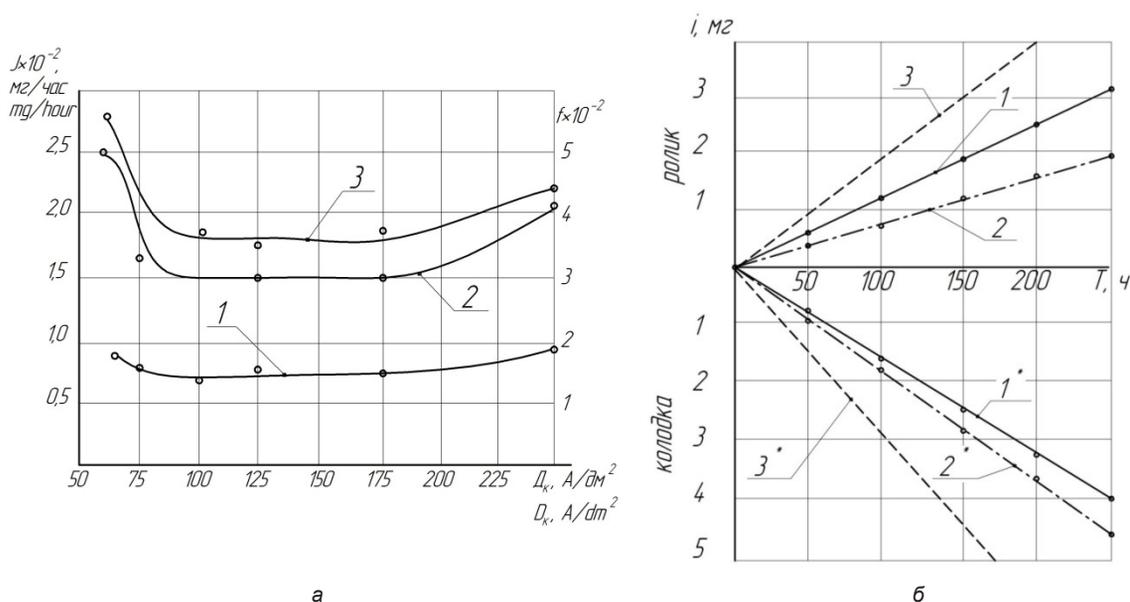


Рисунок 8 – Испытания износостойкости хромовых покрытий:  
 а – зависимость катодной плотности тока на процесс изнашивания: 1 – образец-ролик;  
 2 – колодка и 3 – коэффициент трения; внешняя нагрузка 100 кг/см<sup>2</sup>;  
 б – изнашивание пар трения ролик-колодка с роликом с различными покрытиями:  
 1 – в универсальном электролите; 2 – в разработанном электролите; 3 – без покрытия<sup>18</sup>

Figure 8 – The results of studies of the wear resistance of chrome coatings: a – the effect of the cathode current density on the wear intensity: 1 – roller, 2 – counterbody and 3 – coefficient of friction, external load in 100 kg / cm<sup>2</sup>;  
 b – wear of friction pairs roller-pad with roller with various coatings:  
 1 – in a universal electrolyte, 2 – in a developed electrolyte, 3 – uncoated

Хромовые покрытия, полученные из универсального электролита, по-прежнему оказались без повреждений (см. рисунок 6, в, кривая 2). Дальнейшее увеличение нагрузки до 30 кг/см<sup>2</sup> и более приводило к повреждениям всех поверхностей, что исключало дальнейшее использование и исследование.

По окончании приработки пары трения производили постепенное ступенчатое повышение нагрузки до предельно допустимого значения. При анализе процесса приработки было установлено, что наиболее оптимальный процесс приработки происходит при нагрузке 10–15 кг/см<sup>2</sup>, дальнейшее увеличение нагрузки приработки до 20 кг/см<sup>2</sup> приводило к снижению износостойкости, при снижении верхнего предела допустимой нагрузки испытаний (таблица).

Исследования приработки хромовых покрытий, полученных из нового электролита с добавлением плавиковой кислоты, показали, что повышение нагрузки до 20 кг/см<sup>2</sup> значение

коэффициента трения стабильное и постепенно начинает со временем снижаться (см. рисунок 6, в).

Приработка при соблюдении данных параметров нагрузок приводила к наименьшей интенсивности изнашивания как образца-ролика, так и колодки. Приработка является подготовительным этапом для установившегося изнашивания, поэтому ее нужно проводить с наибольшей интенсивностью с ограничениями по патологическим процессам, с одной стороны, но, с другой стороны, она должна привести к минимально возможной интенсивности изнашивания при нормальной последующей эксплуатации.

Испытания после приработки под нагрузкой в пределах 50–125 кг/см<sup>2</sup> показали, что коэффициент трения наименьший, что даёт сделать выводы, что хромовые покрытия обладают высокими антифрикционными свойствами (рисунок 8).

<sup>18</sup> Котомчин А. Н. Совершенствование технологии электролитического хромирования для восстановления деталей автомобилей, работающих при гидроабразивном изнашивании: дис. канд. техн. наук: 05.22.10. М., 2022. 198 с.

Таблица  
Средние значения параметров испытаний на износостойкость<sup>19</sup>

Table  
Average values of wear resistance test parameters

Вид покрытия	Нагрузка приработки, F, кг/см <sup>2</sup>	Значения параметров испытаний			
		F <sub>исп</sub> , кг/см <sup>2</sup>	Интенсивность изнашивания, i мг/час	Средний коэффициент трения, f	Рабочая средняя температура, T, °C
С добавкой плавиковой кислоты	15	100	0,0075	0,0278	55
Без добавки плавиковой кислоты	15	100	0,0110	0,0325	60
Из универсального электролита	30	100	0,0092	0,0290	55

Также исследования влияния катодной плотности в пределах 75–200 А/дм<sup>2</sup> показали, что изнашивание находится в стабильном состоянии (рисунок 8, а). Дальнейшее увеличение катодной плотности приводит к постепенному снижению износостойкости.

Для наглядного сравнения процесса испытания на износостойкость различных хромовых покрытий, в том числе из нового электролита с добавлением плавиковой кислоты, представлены данные в таблице.

Продолжительные испытания интенсивности изнашивания хромовых покрытий, полученных из нового электролита хромирования, по сравнению с универсальным электролитом, показали, что износостойкость хромовых покрытий из нового электролита на 20–30% выше, чем универсального, а по сравнению с эталонной парой трения на 30–40% (рисунок 8, б). Также из рисунка 8, б видно, что износостойкость колодки в паре трения с образцом-роликом, покрытым хромом из нового электролита, немного уступает при паре с образцом-роликом, покрытым в универсальном электролите. В процессе испытаний происходило изменение микротвёрдости хромового покрытия, которое могло повлиять на изменение износостойкости. Так, после 100 ч испытаний привело к снижению с 11500 до 7500 МПа. Испытания показали, что изменение ми-

кротвёрдости на износостойкость хромового покрытия незначительно повлияло, что подтвердило целесообразность использования способа для восстановления деталей, работающих при гидроабразивном изнашивании.

В результате полученных данных были сделаны выводы, что с увеличением нагрузки интенсивность изнашивания всех поверхностей со временем увеличивается по линейному закону (см. рисунок 8, б).

Было также установлено, что хромовые покрытия, полученные из нового электролита, обладают в 1,6 раз большей износостойкостью по сравнению с эталонной парой трения колодка-ролик. Можно сделать заключение о возможной применимости данного способа для восстановления деталей автомобилей и дорожно-строительной техники, работающих при гидроабразивном изнашивании.

Полученные результаты исследований изнашивания различных хромовых поверхностей удовлетворительно объясняют согласно теории, изложенной в теории внешнего износа и трения<sup>20</sup>.

## ВЫВОДЫ

1. Исследования нового состава электролита показали, что наибольшее влияние на физико-механические свойства хромовых по-

<sup>19</sup> Котомчин А. Н. Совершенствование технологии электролитического хромирования для восстановления деталей автомобилей, работающих при гидроабразивном изнашивании: дис. канд. техн. наук: 05.22.10. М., 2022. 198 с.

<sup>20</sup> Трение, изнашивание и смазка: справочник: в 2 кн. / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисына. М.: Машиностроение, 1978. 400 с.

крытий и стабильность осаждения, с целью получения качественных покрытий, оказывает плавиковая кислота. Наиболее оптимальное количество плавиковой кислоты составило в пределах 0,65–0,9 г/л.

2. Установлено, что в предлагаемом растворе можно получать покрытия толщиной до 0,5 мм, обладающие практически одинаковыми свойствами как по толщине, так и в зависимости от катодной плотности тока в интервале от 75 до 200 А/дм<sup>2</sup>.

3. Определены условия приработки хромо-вых покрытий, обеспечивающие формирование рабочего рельефа поверхностей трения без их повреждений, минимизацию коэффициента трения и интенсивность изнашивания.

4. Выявлены преимущества осадков хрома в электролите с добавкой HF и прошедших приработку при внешней нагрузке до 20 кг/см<sup>2</sup> (по сравнению с покрытиями из электролита без добавки и универсального):

а) обладают наибольшей износостойкостью и лучшими антифрикционными свойствами;

б) изменение плотности тока в пределах от 75 до 200 А/дм<sup>2</sup> не влияет на величину износа.

5. Износостойкость осадков, полученных в электролите с добавкой плавиковой кислоты, не уступает износостойкости хрома, осаждаемого в универсальной ванне, а по сравнению с эталонной парой трения выше на 2–30%.

6. Выполненные исследования прочности сцепления и износостойкости показали, что полученные результаты подтвердили использование для восстановления деталей автомобилей и дорожно-строительных машин, работающих при гидроабразивном изнашивании, примером из которых являются золотники гидрораспределителей, плунжеры гидравлических и топливных насосов и др.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Котомчин А. Н., Синельников А. Ф., Корнейчук Н. И. К вопросу выбора способа восстановления деталей машин. *Вестник СибАДИ*. 2020; 17 (1): 84 – 97. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-84-97>

2. Корнейчук Н. И., Лялякин В. П. Перспективы использования промышленных методов восстановления изношенных деталей машин гальваническими и полимерными покрытиями в современных условиях развития агропромышленного технического сервиса // *Труды ГОСНИТИ*. 2018. № 130. С. 254 – 265.

3. Котомчин А. Н., Ляхов Ю. Г. Анализ отказов узлов и агрегатов строительных, дорожных, подъ-

емно-транспортных машин и специальных автомобилей на примере МУП «КоммуналДорСервис» г. Бендеры // *Вестник Приднестровского университета*. Серия: Физико-математические и технические науки. Экономика и управление. 2019. № 3 (63). С. 174 – 178.

4. Мухаметшина Р. М. Отказы дорожно-строительных машин по параметрам коррозии // *Известия КГАСУ*. 2013. № 4 (26). С. 403 – 408.

5. Мухаметшина Р. М. Трибологические отказы дорожно-строительных машин // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. Т.18, 2016. № 1 (2). С. 252 – 255.

6. Густов Ю. И. Исследование конструкционно-технологических и эксплуатационных показателей строительной техники // *Известия КГАСУ*. 2014. № 4 (30). С. 470 – 475.

7. Шлугер М. А., Ток Л. Д. Новые электролиты для покрытий хромом и его сплавами // *Журнал Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева*. 1988. Т. 32, № 3. С. 297 – 305.

8. Стратулат М. П. Восстановление деталей машин электрохимическим хромированием: монография. Орел: издательство ОрелГТУ, 2009. 246 с.

9. Елинек Т. В. Успехи гальванотехники. Обзор мировой специальной литературы за 2017–2018 годы // *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2019. Том 27, № 3. С. 4 – 14.

10. Елинек Т. В. Успехи гальванотехники. Обзор мировой специальной литературы за 2016 – 2017 годы // *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2018. Том 26, № 1. С. 4 – 10.

11. Bolch T., Linde R., Metzner M., Müll K. Innovative Oberflächenstrukturen durch elektrochemische Beschichtungsverfahren // *Galvanotechnik*. 2005. № 103. pp. 2095 – 2100.

12. Distelrath A. Jakob, C. Investigation of structured electrodeposition of hard chromium coatings // *Information technology and electrical engineering - devices and systems, materials and technologies for the future*. Ilmenau: 2009. pp. 379.

13. Distelrath-Lübeck A. Untersuchung des Einflusses von Methansulfonsäure auf die Chromabscheidung aus Chromsäure-elektrolyten // *Galvanotechnik*. 2011. № 102. pp. 2647 – 2657.

14. Metzner M., Bolch T., Linde R., Müll K. Nasse Kombinationen – Funktionelle Oberflächen durch elektrochemische In-situ-Strukturierung // *Metalloberfläche*. 2003. № 57. pp. 18 – 22.

15. Kotomchin A. N., Zorin V. A. Study of High-Performance Chromium Electrolyte for Restoration of Automobile and Road-Construction Machinery Parts // *2021 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex, TIRVED 2021 - Conference Proceedings, Moscow, 11–12 November 2021. Moscow, 2021. DOI 10.1109/TIRVED53476.2021.9639216*.

16. Chromabscheidung aus wässrigen Lösungen // *Chromsaurelösungen Galvanotechnik*. 2005. № 9. Т. 1. pp. 2063 – 2071.

17. Корнейчук Н. И. Перспективы интенсификации восстановления деталей машин электролитическим хромированием // Труды ГОСНИТИ. 2010. Т. 106. С. 197 – 203.

18. Шишурин С. А., Семочкин В. С., Сафонов В. В., Гурьев А. Е. Структура и физико-механические свойства композиционных гальванохимических покрытий // Вестник АПК Ставрополя. 2014. № 3. С. 77 – 80.

19. Котомчин А. Н. Влияние электрохимической обработки на прочность сцепления с подложкой при восстановлении деталей автотранспорта, работающих при гидроабразивном изнашивании. *Вестник СибАДИ*. 2022; 19 (4): 546–559. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-546-559>

20. Котомчин А. Н., Синельников А. Ф., Корнейчук Н. И. Использование износостойкого хромирования при восстановлении и упрочнении деталей автомобилей // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2021. № 1(64). С. 11 – 17.

21. Котомчин А. Н., Янута А. С., Артёменко А. И. Проведение трибологических испытаний образцов, покрытых гальваническими износостойкими покрытиями, на машине трения СМЦ-2 // Вестник Приднестровского университета. Серия: Физико-математические и технические науки. Экономика и управление. 2020. № 3 (66). С. 127 – 132.

22. Korolev A. V., Korolev A. A. Friction machine for accelerated wear tests of frictional rolling elements // *Journal of Friction and Wear*. 2017. Vol. 38, No. 1. P. 77-81. DOI 10.3103/S1068366617010068.

23. Buyanovskii I. A., Pravotorova E. A., Bolshakov A. N., Levchenko V. A. Minimizing the number of experimental tribological tests on the friction machine of reciprocating motion // *Journal of Friction and Wear*. 2017. Vol. 38, No. 3. P. 190 – 194. DOI 10.3103/S1068366617030059.

24. Машков В. Н. Трибологические испытания пар трения с многофункциональными покрытиями // *Технология машиностроения*. 2016. № 1. С. 15 – 18.

25. Zhao J., Li Y., Liu Y. [et al.] Friction and wear performances of impregnated graphite in ring-on-ring tribological test // *Tribology International*. 2022. Vol. 174. P. 107715. DOI 10.1016/j.triboint.2022.107715.

26. Harsha A. P., Wäsche R., Joyce T. J. Friction and wear of two polyethylenes under different tribological contact conditions // *Polymers and Polymer Composites*. 2020. DOI 10.1177/0967391120920130.

27. Корнейчук Н. И. Влияние условий термообработки на физико-механические свойства хромовых покрытий // Вестник Приднестровского университета. Серия: Физико-математические и технические науки. Экономика и управление. 2015. № 3(51). С. 103 – 109.

28. Корнейчук Н. И. Оценка контактной усталостной прочности износостойких гальванических покрытий, применительно к восстановлению деталей машин // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 128. С. 152 – 161.

29. Корнейчук Н. И. Приработка электролитических хромовых покрытий // Труды ГОСНИТИ. 2010. Т. 105. С. 170–175.

## REFERENCES

1 Kotomchin A. N., Sinelnikov A. F., Korneychuk N. I. Restoration of machine parts: choice of the method. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (1): 84 – 97. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-84-97>

2. Korneychuk N. I., Lyalyakin V. P. Perspektivy ispolzovaniya industrialnykh metodov vosstanovleniya iznoshennykh detalej mashin galvanicheskimi i polimernymi pokrytiami v sovremennykh usloviyakh razvitiya agropromyshlennogo tehničeskogo servisa. [Prospects of using industrial methods of restoration of worn-out machine parts by electroplating and polymer coatings in modern conditions of development of agro-industrial technical service] *Trudy GOSNITI*. 2018;130: 254 – 265. (In Russ.)

3. Kotomchin A. N., Lyahov Yu. G. Analiz otkazov uzlov i agregatov stroitelnykh, dorozhnykh, podemno-transportnykh mashin i specialnykh avtomobilej na primere MUP «KommunalDorServis» g. Bendery [Analysis of failures of components and aggregates of construction, road, lifting and transport machines and special vehicles on the example of Municipal Unitary Enterprise «KommunalDorService» Bendery] *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tehničeskie nauki. Ekonomika i upravlenie*. 2019; 3 (63): pp. 174 – 178. (In Russ.)

4. Muhametshina R. M. Otkazy dorozhno–stroitelnykh mashin po parametram korrozii [Failures of road construction machines by corrosion parameters]. *Izvestiya KGASU*. 2013; 4:403 – 408. (In Russ.)

5. Muhametshina R. M. Tribologicheskie otkazy dorozhno–stroitelnykh mashin [Tribological failures of road–building machines]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. Vol.18. 2016; 1(2): 252 – 255. (In Russ.)

6. Gustov Yu. I. Issledovanie konstrukcionno–tehnologicheskikh i ekspluatacionnykh pokazatelej stroitelnoj tehniki [Research of structural, technological and operational indicators of construction equipment]. *Izvestiya KGASU*. 2014; 4(30): 470 – 475. (In Russ.)

7. Shluger M. A., Tok L. D. Novye elektrolity dlya pokrytij hromom i ego splavami [New electrolytes for coatings with chromium and its alloys]. *Zhurnal Vsesoyuznogo himicheskogo obshestva im. D. I. Mendeleeva*. 1988; Vol.32; 3:297 – 305. (In Russ.)

8. Stratulat M. P. Vosstanovlenie detalej mashin elektrohimičeskim hromirovanijem [Restoration of machine parts by electrochemical chrome plating] *Monografiya*. Orel: izdatelstvo OrelGTU, 2009: 246. (In Russ.)

9. Elinek T. V. *Uspehi gal'vanotehniki. Obzor mirovoj special'noj literatury za 2017–2018 gody* [Advances in electroplating. Review of world special literature for 2017 – 2018]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*; Vol. 27, 2019, No 3: 4 – 14. (In Russ.)

10. Elinek T. V. *Uspehi gal'vanotehniki. Obzor mirovoj special'noj literatury za 2016–2017 gody* [Advances in electroplating. Review of world special literature for 2016–2017]. *Gal'vanotehnika i obrabotka pov-erhnosti*; Vol. 26, 2018, No 1: 4 – 10. (In Russ.)
11. Bolch, T., Linde, R., Metzner, M., Müll, K.: Innovative surface structures through electrochemical coating processes. *Galvanotechnik* 103 (2005): 2095 – 2100.
12. Distelrath A. Jakob, C. Investigation of structured electrodeposition of hard chromium coatings. In: Information technology and electrical engineering - devices and systems, materials and technologies for the future. Ilmenau: 2009: 379.
13. Distelrath-Lübeck, A.: study of the influence of Methanesulfonic acid on Chromium deposition from chromic acid electrolytes. *Electro Technology* 102 (2011): 2647 – 2657.
14. Metzner, M., Bolch, T., Linde, R., Müll, K.: wet combinations-functional surfaces by electrochemical in-situ structuring. *Metal Surface* 57 (2003) Nr. 9: 18 – 22.
15. Kotomchin A. N., Zorin V. A. Study of High-Performance Chromium Electrolyte for Restoration of Automobile and Road-Construction Machinery Parts // 2021 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex, TIRVED 2021 - Conference Proceedings, Moscow, 11 – 12 November 2021. Moscow, 2021. DOI 10.1109/TIRVED53476.2021.9639216.
16. Chromabscheidung aus wässrigen Lösungen. Chromsaurelösungen *Galvanotechnik*. 2005; 9. Vol.1: 2063 – 2071.
17. Kornejchuk N. I. Perspektivy intensivatsii vosstanovleniya detalej mashin elektroliticheskim hromirovaniem [Prospects of intensification of restoration of machine parts by electrolytic chrome plating]. *Trudy GOSNITI*. 2010; 106: 197 – 203. (In Russ.)
18. Shishurin S. A., Semochkin V. S., Safonov V. V., Gurev A. E. Struktura i fiziko-mehaniicheskie svoystva kompozitsionnyh galvanohimicheskikh pokrytij [Structure and physico-mechanical properties of composite galvanochemical coatings]. *Vestnik APK Stavropolya*. 2014; 3: 77 – 80.
19. Kotomchin A. N. Effect of electrochemical treatment on substrate adhesion strength in the restoration of motor vehicle parts operating under hydroabrasive wear. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (4): 546 – 559. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-546-559>
20. Kotomchin A. N., Sinelnikov A. F., Kornejchuk N. I. Ispolzovanie iznosostojkogo hromirovaniya pri vosstanovlenii i uprochnenii detalej avtomobilej [The use of wear-resistant chrome plating in the restoration and hardening of car parts] *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta (MADI)*. 2021. № 1(64): pp. 11 – 17. (In Russ.)
21. Kotomchin A. N., Yanuta A. S., Artyomenko A. I. Provedenie tribologicheskikh ispytanij obrazcov, pokrytyh galvanicheskimi iznosostojkimi pokrytiami, na mashine treniya SMC-2 [Conducting tribological tests of samples coated with galvanic wear-resistant coatings on the SMC-2 friction machine]. *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tehničeskije nauki. Ekonomika i upravlenie*. 2020; 3 (66): 127–132. (In Russ.)
22. Korolev A. V., Korolev A. A. Friction machine for accelerated wear tests of frictional rolling elements // *Journal of Friction and Wear*. 2017; Vol. 38, No. 1: 77 – 81.
23. Buyanovskii I. A., Pravotorova E. A., Bolshakov A. N., Levchenko V. A. Minimizing the number of experimental tribological tests on the friction machine of reciprocating motion. *Journal of Friction and Wear*. 2017; Vol. 38, No. 3: 190 – 194.
24. Mashkov V. N. Tribologicheskie ispytaniya par treniya s mnogofunktsionalnymi pokrytiami [Tribological testing of friction pairs with multifunctional coatings]. *Tehnologiya mashinostroeniya*. 2016; 1: 15 – 18.
25. Zhao J., Li Y., Liu Y. [et al.] Friction and wear performances of impregnated graphite in ring-on-ring tribological test. *Tribology International*. 2022; Vol. 174:107715.
26. Harsha A. P., Wäsche R., Joyce T. J. Friction and wear of two polyethylenes under different tribological contact conditions. *Polymers and Polymer Composites*. 2020.
27. Kornejchuk N. I. Vliyanie uslovij termoo-brabotki na fiziko-mehaniicheskie svoystva hromovykh pokrytij [Influence of heat treatment conditions on the physical and mechanical properties of chrome coatings]. *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tehničeskije nauki. Ekonomika i upravlenie*. 2015; 3 (51): 103 – 109. (In Russ.)
28. Kornejchuk N. I. Ocenka kontaktnoj ustalostnoj prochnosti iznosostojkikh galvanicheskikh pokrytij, primenitelno k vosstanovleniyu detalej mashin [Evaluation of the contact fatigue strength of wear-resistant electroplating coatings, in relation to the restoration of machine parts]. *Trudy GOSNITI*. 2017; Vol. 128: 152 – 161. (In Russ.)
29. Kornejchuk N. I. Prirabotka elektroliticheskikh hromovykh pokrytij [Running-in of electrolytic chrome coatings]. *Trudy GOSNITI*. 2010; 105: 170 – 175. (In Russ.)

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Котомчин А. Н. Основная работа по исследованию и сбору информации для составления статьи.*

*Зорин В. А. Методическое и научное сопровождение при подготовке статьи, получение достоверных результатов исследований и их подтверждение.*

## COAUTHORS' CONTRIBUTION

*Aleksei N. Kotomchin. The main work on research and accumulation of information for the preparation of the article.*

*Vladimir A. Zorin. Methodological and scientific support in the preparation of the article, obtaining reliable research results and their confirmation.*

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

*Котомчин Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Инженерные науки, промышленность и транспорт». SPIN-код: 9826-9350.*

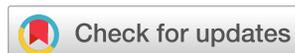
*Зорин Владимир Александрович – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин». SPIN-код: 5612-1652.*

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*Aleksei N. Kotomchin. Cand. of Sci., Associate Professor of the Engineering Sciences, Industry and Transport Department. SPIN-код: 9826-9350.*

*Vladimir A. Zorin – Dr. of Sci., Professor, Production and Repair of Cars and Road Vehicles Department. SPIN-код: 5612-1652.*

Научная статья  
УДК 629.33  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-474-486>  
EDN: LRLUCM



## СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

А. В. Пузаков

Оренбургский государственный университет,  
г. Оренбург, Россия

[And-rew78@yandex.ru](mailto:And-rew78@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9754-8165>

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Для оптимального функционирования системы электроснабжения автомобиля необходимо совершенствовать принципы и стратегии управления. В основе принципов управления может лежать постоянство напряжения, обеспечение заряженности батареи, снижение расхода топлива и т.п.

**Материалы и методы.** Отличительной особенностью стратегии управления первого уровня является отсутствие дополнительных датчиков в системе электроснабжения. Их появление привело к возникновению стратегии управления второго уровня, направленной на обеспечение заряженности стартерной батареи, что достигается организацией взаимодействия электронного блока управления двигателя с генератором. В стратегии управления третьего уровня на первое место выходит снижение расхода топлива автомобиля. Рассмотрены целевые функции перечисленных стратегий управления.

**Результаты.** Предложена стратегия управления четвертого уровня, целью которой является снижение затрат на эксплуатацию системы электроснабжения на всех этапах жизненного цикла. Рассмотрена структура затрат на эксплуатацию системы электроснабжения, в которые входят затраты на перерасход топлива, вызванный неисправностями в работе агрегатов, а также затраты на техническое обслуживание, диагностирование, ремонт (замену) и утилизацию.

**Обсуждение и заключение.** Практическое применение предложенной стратегии позволит учесть все виды затрат и минимизировать расходы на эксплуатацию системы электроснабжения как автомобилей с двигателями внутреннего сгорания, так и гибридных автомобилей и электромобилей, в которых электроэнергия имеет еще большую значимость.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** система электроснабжения автомобиля, автомобильный генератор, аккумуляторная батарея, целевая функция, стратегии управления, напряжение бортовой сети

**БЛАГОДАРНОСТИ:** выражаю благодарность анонимным рецензентам.

Статья поступила в редакцию 10.08.2023; одобрена после рецензирования 20.08.2023; принята к публикации 30.08.2023.

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: Пузаков А. В. Стратегии управления системой электроснабжения автомобилей // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 4 (92). С. 474-486. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-474-486>

© Пузаков А. В., 2023



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-474-486>  
EDN: LRLUCM

## VEHICLE POWER SUPPLY MANAGEMENT STRATEGIES

**Andrei V. Puzakov**

Orenburg State University,  
Orenburg, Russia

*And-rew78@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9754-8165>*

### ABSTRACT

**Introduction.** To optimize the performance of the vehicle electrical system, it is necessary to improve the control principles and strategies. The control principles may be based on voltage constancy, ensuring battery charge, reducing fuel consumption, etc.

**Materials and methods.** A distinctive feature of the first level control strategy is the absence of additional sensors in the power supply system. Their occurrence led to the emergence of the second level control strategy aimed at ensuring the starter battery charge, which is achieved by organizing the interaction between the electronic engine control unit and the generator. In the control strategy of the third level the first place is given to the reduction of the vehicle fuel consumption. The target functions of the listed control strategies are considered.

**Results.** The fourth level management strategy, the purpose of which is to reduce the costs of power supply system operation at all stages of the life cycle, is proposed. The structure of power supply system operation costs is considered, which includes the costs of fuel overconsumption caused by malfunctions in the operation of units, as well as the costs of maintenance, diagnostics, repair (replacement) and utilization.

**Discussion and conclusions.** Practical application of the proposed strategy will make it possible to take into account all types of costs and minimize the cost of operating the power supply system for both vehicles with internal combustion engines and hybrid and electric vehicles, in which electricity is even more important.

**KEYWORDS:** vehicle power supply system, automotive generator, battery, target function, control strategies, on-board voltage

**ACKNOWLEDGEMENT.** I express my gratitude to anonymous reviewers.

**The article was submitted 10.08.2023; approved after reviewing 20.08.2023; accepted for publication 30.08.2023.**

**The authors have read and approved the final manuscript.**

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

*For citation.* Andrei V. Puzakov Vehicle power supply management strategies. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (4): 474-486. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-474-486>

© Puzakov A. V., 2023



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

## ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития транспортных средств характеризуется значительным увеличением числа электрифицированных устройств, отвечающих за безопасность движения, автоматизацию рабочих процессов, комфортабельность салона и т.д. Мировая тенденция роста мощности потребителей электроэнергии на борту автомобилей составляет 15–20% за каждые 3–4 года. Рост мощности генераторов при сохранении воздушного охлаждения ограничен величиной 3–4 кВт.

Однако рост мощности генератора приведет к увеличению затрат энергии (топлива) на его привод относительно текущих 10–20% мощности двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [1]. К тому же генераторы большой мощности сложно разместить в условиях плотной компоновки подкапотного пространства. Сейчас при высоких требованиях к установленной мощности автопроизводители устанавливают два генератора на легковые и легкие коммерческие автомобили и три и более на автобусы большой вместимости.

Для увеличения возможностей хранения электроэнергии на борту автомобиля используют суперконденсаторы и литий-ионные батареи. Они позволяют запасать электроэнергию в процессе торможения транспортного средства.

Таким образом, непрерывно усложняющаяся система электроснабжения стала одной из наиболее важных систем автомобиля и для оптимального её функционирования необходимо совершенствовать принципы и стратегии управления.

В работах [1, 2] выполнен обзор стратегии управления электроэнергией с точки зрения их реализации на автомобилях с указанием достоинств и недостатков. Предложена собственная стратегия, реализованная в интеллектуальных регуляторах напряжения, позволяющая снизить расход топлива за счет периодической деактивации генератора.

В статье [3] проведены экспериментальные исследования и моделирование влияния генератора на экономию топлива. В результате в автомобиле с управляемым генератором можно добиться экономии топлива на 0,64% по сравнению с автомобилем с обычным генератором в условиях нового европейского ездового цикла.

Авторы работы [4] разработали интеллектуальную систему управления генератором, с помощью которой реализовано использование

энергии торможения. Результаты эксперимента на автомобиле показали, что с помощью этой системы расход топлива можно снизить примерно на 2–3%.

Исследование [5] направлено на экспериментальный анализ генератора, оснащенного системой механической развязки коленчатого вала ДВС. Система состоит из интегрированного шкива с электромагнитной муфтой. Развязка производится по степени заряженности аккумуляторной батареи и условиям работы ДВС. В испытаниях, проведенных с легковым автомобилем, было получено снижение энергопотребления на 2,8% в совмещенном городском и шоссейном циклах.

В работах [6, 7] принцип минимума Понtryгина применяется для решения задачи оптимального управления электроэнергией в транспортных средствах. Стратегия управления может изменять мощность интеллектуального генератора и аккумуляторной батареи в зависимости от изменения электрической нагрузки и условий движения в режиме реального времени. Экспериментальные результаты показывают, что по сравнению с традиционной стратегией управления без обратной связи, предлагаемая стратегия управления может эффективно снизить расход топлива, который уменьшается примерно на 1,7%.

В статье [8] предлагается стратегия снижения расхода топлива за счет зарядки аккумуляторной батареи с использованием остаточной кинетической энергии при торможении. Стратегия предлагает один из трех режимов управления, таких как зарядка, удержание и разрядка, в зависимости от состояния движения транспортного средства. Режим управления определяет мощность, вырабатываемую генератором переменного тока путем регулирования величины крутящего момента.

Цель статьи [9] состоит в том, чтобы улучшить эффект экономии топлива от системы Старт-Стоп путем оптимизации стратегии управления при различных ездовых циклах. В статье проанализирована причина неэффективной остановки на холостом ходу и предложены два параметра управления (время задержки действия и установленный порог скорости), которые использовались для предотвращения неэффективной остановки на холостом ходу и частых проблем с запуском-остановкой. Были выбраны четыре типичных ездовых цикла и предложена многорежимная стратегия управления, которая может улучшить эффект экономии топлива.

В статье [10] исследуются преимущества электрических нагрузок с гибким потреблением мощности. На основе методов оптимизации представлены оптимальная офлайн-стратегия, а также каузальная онлайн-стратегия. Реальные эксперименты на роликовом динамометрическом стенде подтверждают правильность стратегии. Измеренная прибыль от экономии топлива достигает 2,6% при минимальных изменениях в оборудовании автомобиля.

В работе [11] исследуется система управления электроэнергией, необходимая для координации потоков мощности в системе электроснабжения. Для того чтобы подача напряжения не была недостаточной для критически важных с точки зрения безопасности потребителей, можно отключить некоторые потребители комфорта. Заключительные измерения показывают, что метод способен увеличить напряжение в наиболее критических ситуациях системы электроснабжения примерно на 0,6 В.

Анализируя рассмотренные и другие публикации [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19], можно сделать вывод, что в большинстве случаев в них исследуется задача снижения расхода топлива или повышения напряжения бортовой сети на основе управления генератором или потребителями электроэнергии. В тоже время не выполнен комплексный анализ актуальных и ранее применявшихся стратегий управления с целью разработки перспективных стратегий, объединяющих в себе достоинства предыдущих.

Целью статьи является рассмотрение существующих задач и принципов управления системой электроснабжения, формирование целевых функций и разработка стратегии более высокого иерархического уровня.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Следует различать задачи и стратегии управления системой электроснабжения. Стратегии носят более глобальный характер и за все время существования системы электроснабжения изменялись незначительно. На сегодняшний день можно выделить три стратегии управления, расположив их в иерархическом порядке.

**Стратегия первого уровня** возникла в начале XX века вместе с появлением на автомобиле электрических машин для выработки электроэнергии путем преобразования механической энергии двигателя – *генераторов*. Так как напряжение генератора пропорцио-

нально частоте вращения ротора, появилась задача ограничения напряжения с целью сохранения ресурса ламп системы освещения и аккумуляторной батареи. Затем данная задача была дополнена необходимостью исключить перезаряд батареи при высоких температурах и повысить эффективность заряда при низких температурах (термокомпенсация).

Дальнейшее изменение в конструкции генераторов было вызвано необходимостью решить проблему разряда батареи на обмотку возбуждения генератора при включенном зажигании и неработающем двигателе. Это привело к появлению в конструкции выпрямителя дополнительного плеча диодов, предотвращающих разряд батареи. Параллельно решалась задача оповещения водителя о возникновении нештатных ситуаций в системе электроснабжения, сначала с помощью амперметра (наиболее информативного прибора), затем с помощью вольтметра, и наконец сейчас с помощью контрольной лампы, диагностические возможности которой ограничены [20].

Внедрение в конструкцию генераторов многофункциональных регуляторов напряжения позволило решить еще несколько задач. Для исключения негативного влияния тормозящего действия генератора на процесс запуска ДВС активация генератора происходит с помощью сигнала от электронного блока управления двигателем. Одновременное включение ряда мощных потребителей сопровождается плавным нарастанием тока нагрузки для снижения просадки напряжения бортовой сети.

Рассмотрим целевые функции стратегии управления первого уровня.

Постоянство напряжения бортовой сети обеспечивается путем регулирования тока обмотки возбуждения автомобильного генератора при вариации нагрузки и частоты вращения ротора. Преимущества: сравнительно простая схемная реализация. Недостатки: снижение возможности заряда батареи при низких температурах и возможность перезаряда батареи при высоких температурах. Такая схема регулирования широко использовалась на автомобильных генераторах до конца 80-х годов прошлого века.

$$U_{BC} = U_{\Gamma}^{\text{НОМ}} = \text{const},$$

$$I_B = \frac{U_{\Gamma}}{C_e \cdot n_{\text{ДВС}} \cdot i_{\Gamma} \cdot w_B \cdot \left(1 - \frac{r_{\Gamma}}{R_H}\right)}, \quad (1)$$

где  $U_{\Gamma}$  – текущее напряжение генератора, В;  $U_{\Gamma}^{\text{НОМ}}$  – номинальное (диапазон регулирования)

напряжение генератора,  $U_{Г}^{НОМ} = 14.0 \pm 0.4$  В;  $r_{Г}$  – внутреннее сопротивление автомобильного генератора, Ом;  $R_{Н}$  – сопротивление нагрузки, Ом;  $C_e$  – конструктивная постоянная автомобильного генератора;  $n_{ДВС}$  – частота вращения автомобильного двигателя, 1/мин;  $i_{Г}$  – передаточное отношение ременной (зубчатой) передачи вал двигателя – вал ротора генератора;  $w_{В}$  – число витков обмотки возбуждения автомобильного генератора.

Регулирование напряжения бортовой сети с учетом температуры окружающего воздуха обеспечивается на основе информации от датчика температуры генератора (встроен в регулятор напряжения) или от внешнего датчика температуры батареи.

Преимущества: сравнительно простая схемная реализация. Недостатки: температура генератора в процессе работы повышается значительно быстрее температуры батареи. Так как по мере повышения температуры генератора его напряжение снижается, то в холодное время это не позволяет компенсировать разряд батареи на запуск двигателя и работу нагревательных устройств.

$$U_{BC} = U_{Г}^{НОМ} + k_t \cdot T_{Г(Б)},$$

$$I_{В} = \frac{\left( \frac{U_{Г}}{\left(1 - \frac{r_{Г}}{R_{Н}}\right)} - k_t \cdot T_{Г(Б)} \right)}{C_e \cdot n_{ДВС} \cdot i_{Г} \cdot w_{В}}, \quad (2)$$

где  $k_t$  – коэффициент терморегулирования напряжения генератора. Обычно составляет (-10 мВ/°С);  $T_{Г(Б)}$  – температура генератора (батареи), °С.

Отличительной особенностью стратегии первого уровня, как правило, является отсутствие дополнительных датчиков в системе электроснабжения. Их появление привело к возникновению **стратегии второго уровня**.

Необходимым условием обеспечения заряженности аккумуляторной батареи является оперативное измерение ее напряжения, силы тока и температуры. Что касается измерения температуры батареи, то достаточно измерения температуры полюсного вывода (терминала) батареи, так как скорость изменения и числовые значения его температуры и температуры электролита практически совпадают.

Для измерения вышеперечисленных параметров используется комбинированный датчик аккумуляторной батареи (Intelligent Battery Sensor), который включает в себя чувствительные элементы для измерения температуры батареи, силы тока и напряжения, аналого-цифровой преобразователь, микропроцессор для обработки данных в режиме реального времени и сетевой интерфейс для передачи импульсных сигналов в блок управления двигателем/генератором.

Основной принцип мониторинга состояния аккумуляторной батареи заключается в отслеживании ее способности к последующему запуску автомобильного двигателя. Причиной появления в составе системы электроснабжения датчика аккумуляторной батареи стало внедрение системы Старт-Стоп. Работа системы подразумевает остановку автомобильного двигателя при снижении скорости движения транспортного средства до нуля. По замыслу разработчиков это позволит снизить время работы автомобильного двигателя на холостых оборотах и повысить тем самым топливную экономичность с одновременным снижением токсичности обработавших газов.

Для компенсации затраченной энергии на запуск автомобильного двигателя необходимо от 5 до 15 мин работы генератора, в зависимости от температуры окружающей среды. Если остановки автомобиля происходят чаще, заряженность батареи снижается (рисунок 1). Критическое значение заряженности батареи определяется температурой окружающей среды.

Вычисление степени заряженности батареи на борту автомобиля является нетривиальной задачей, поскольку точное определение возможно при обесточивании цепи аккумуляторной батареи. Однако отключение батареи на борту автомобиля неприемлемо, так как способно привести к выходу из строя потребителей и требует прописки батареи после включения в блоке управления.

На сегодняшний день сложилась следующая последовательность вычисления степени заряженности<sup>1</sup>. На первом этапе, при включении зажигания вычисляется начальное значение степени заряженности.

<sup>1</sup> Пузаков А. В. Концепция оперативного мониторинга системы электроснабжения автомобиля // Прогрессивные технологии в транспортных системах: сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции. Оренбург: ОГУ. 2019. С.515 – 522.

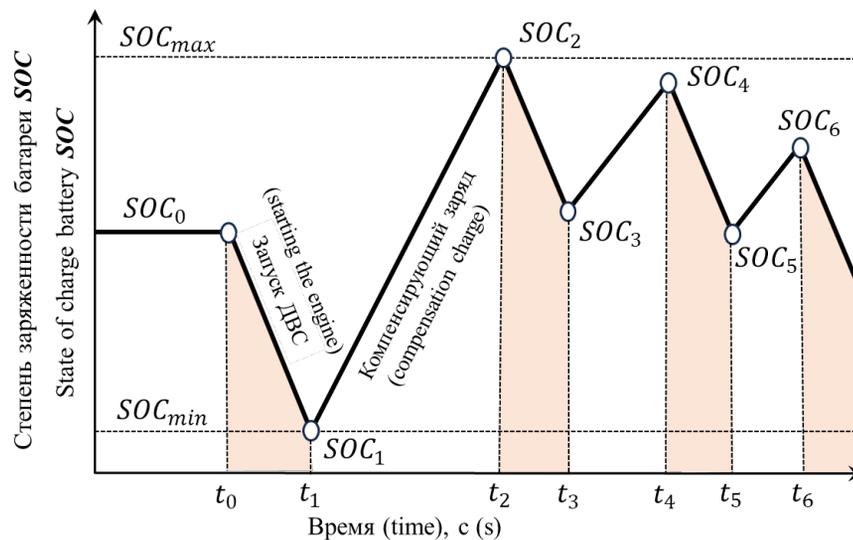


Рисунок 1 – Динамическое изменение степени заряженности батареи  
Источник: составлено автором

Figure 1 – Dynamic change of battery charge level  
Source: compiled by the author

$$SOC_0 = \frac{OCV - U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}}, \quad (3)$$

где  $OCV$  – напряжение разомкнутой цепи батареи;  $U_{\max}$  – максимальное значение напряжения, соответствующее полностью заряженной батарее, В;  $U_{\min}$  – минимально допустимое напряжение батареи, В.

Затем с помощью датчика тока непрерывно измеряется величина и направление (заряд/разряд) тока батареи [21]. Интегрируя полученные значения с учетом временных интервалов, получают заряд, полученный или затраченный в процессе эксплуатации и определяют абсолютное приращение степени заряженности батареи.

$$SOC_i = SOC_0 \pm \Delta SOC = SOC_0 \pm \frac{1}{C_{20}} \int I_B \cdot dt, \quad (4)$$

где  $SOC_i$  – текущее значение степени заряженности батареи;  $SOC_0$  – начальное (исходное) значение степени заряженности батареи;  $\Delta SOC$  – изменение степени заряженности батареи в процессе работы;  $C_{20}$  – номинальная ёмкость батареи, А·ч;  $I_B$  – зарядный (разрядный) ток батареи, А.

Высокая нагрузка на генератор на холостом ходу приводит к неравномерности работы

двигателя и разряду аккумуляторной батареи. Взаимодействие системы электроснабжения с электронным блоком управления двигателя позволяет повысить частоту вращения холостого хода.

Оптимизация мощности потребителей возможна с помощью динамического включения/отключения энергоёмких устройств. Примером решения такой задачи можно считать отключение потребителей с низким приоритетом в случае дефицита электроэнергии, реализованное на автомобилях высокого класса.

Кроме того, суммарная потребляемая мощность может быть снижена за счет правильно организованного управления потребителями. Сюда можно отнести ограничение включения мощных потребителей (например, отключение обогрева и электропривода зеркал в то время, когда включается насос антиблокировочной тормозной системы). Пример подобного управления приведен на рисунке 2.

Еще одним преимуществом взаимосвязи генератора и ЭБУ двигателя можно считать бортовое диагностирование ряда неисправностей генератора, направленное на предупреждение водителя о возможности обесточивания автомобиля и прекращении движения<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Пузаков А. В. Бортовое диагностирование системы электроснабжения автомобилей // Прогрессивные технологии в транспортных системах: Евразийское сотрудничество: сборник материалов XV Международной научно-практической конференции. Оренбург, ОГУ. 2020. С. 497 – 504.

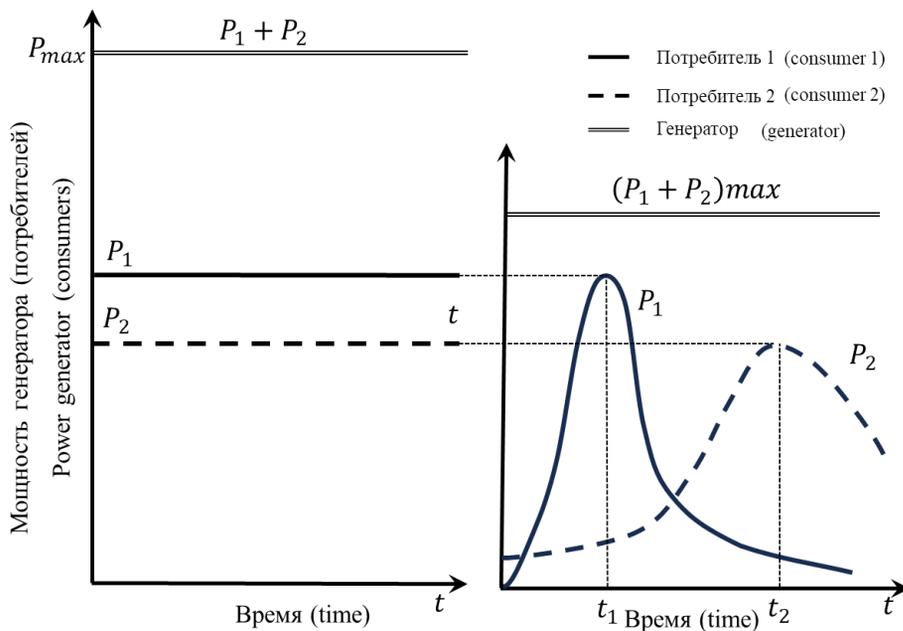


Рисунок 2 – Пример регулирования мощности нагрузки<sup>3</sup>

Figure 2 – Example of load power regulation

Целевая функция стратегии второго уровня заключается в постоянстве напряжения бортовой сети и максимизации заряженности батареи для выполнения запусков автомобильного двигателя. Это достигается асинхронностью напряжений генератора и аккумуляторной батареи

$$U_{\Gamma} = U_{\Gamma}^{\text{НОМ}} = \text{const},$$

$$U_{\Gamma} = (C_e \cdot n_{\text{ДВС}} \cdot i_{\Gamma} \cdot I_B \cdot w_B + k_t \cdot T_{\Gamma}) \cdot \left(1 - \frac{r_{\Gamma}}{R_H}\right); \quad (5)$$

Если степень заряженности батареи падает ниже критической, понижается температура батареи или снижается её функциональность, оцениваемая степенью работоспособности система Старт-Стоп деактивируется. Еще одним критерием деактивации является включение кондиционера. После деактивации целевая функция будет аналогична рассмотренной выше.

$$T_B \leq T_B^{\text{КРИТ}};$$

$$U_B \leq 0.5 \cdot (U_{\text{max}} - U_{\text{min}}) + U_{\text{min}}; \quad (6)$$

$$SOH_i = \frac{U_{cr} - U_0}{U_{new} - U_0} \leq SOH_{кр},$$

где  $SOH_i$  – текущее значение степени работоспособности батареи;  $U_{cr}$  – минимальное напряжение в процессе запуска двигателя, В;  $U_0$  – минимально необходимое напряжение в процессе запуска двигателя, В;  $U_{new}$  – минимальное напряжение в процессе запуска двигателя новой батареей, В;  $SOH_{кр}$  – минимальное (критическое) значение степени работоспособности батареи.

Таким образом, стратегия второго уровня в целом направлена на обеспечение заряженности стартерной (пусковой) батареи и достигается оснащением автомобиля дополнительными датчиками и организацией взаимодействия ЭБУ двигателя с автомобильным генератором.

<sup>3</sup> Ютт В. Е. Электрооборудование автомобилей и электромобилей: учебник для вузов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2019. – 480 с.

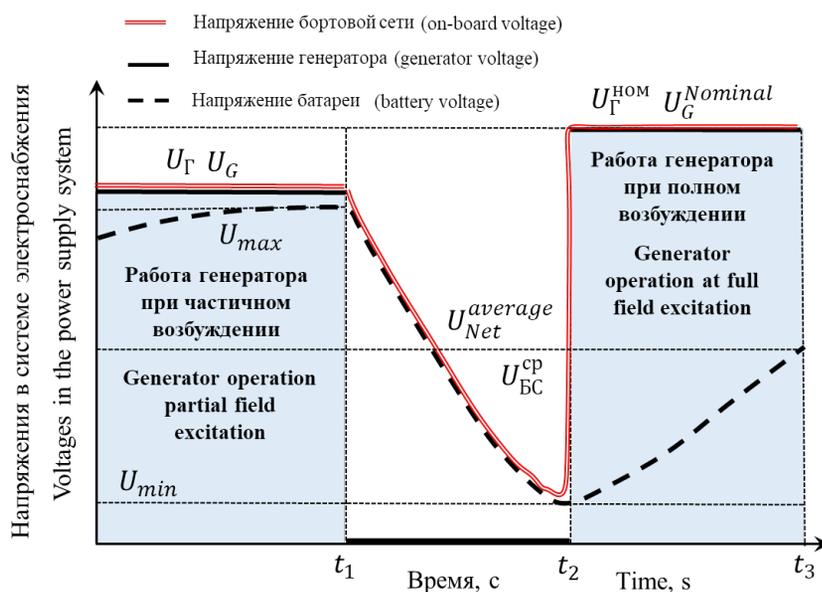


Рисунок 3 – Изменение напряжений в системе электроснабжения при периодическом отключении генератора  
Источник: составлено автором

Figure 3 – Change of voltages in the power supply system at periodic generator shutdown  
Source: compiled by the author

**Стратегия третьего уровня** часто пересекается с предыдущей, однако на первое место выходит снижение расхода топлива автомобиля<sup>4,5</sup> [22, 23, 24, 25]. Поскольку уровень выбросов отработавших газов напрямую связан с расходом топлива, одновременно решается задача снижения токсичности автомобиля.

В этом случае кратковременным снижением заряженности батареи можно пренебречь. Часто для управления генератором применяется отдельный блок управления, взаимодействующий с датчиком батареи и ЭБУ двигателя с помощью цифровых шин передачи данных. Внедрение ряда энергоёмких потребителей (электромеханический стабилизатор, электронагреватель отработавших газов, отопитель высокой мощности) потребовало увеличения уровня напряжения бортовой сети.

Для повышения динамических свойств автомобиля возможно отключение генератора во время ускорения. Достигается командами элек-

тронного блока управления двигателем, который отключает ток возбуждения генератора.

Одним из нововведений является рекуперация электроэнергии в процессе замедления автомобиля. Возникающую при преобразовании кинетической энергии движущегося автомобиля электрическую энергию необходимо эффективно запасать. Традиционные свинцово-кислотные батареи в этом случае практически бесполезны, используются литий-ионные батареи и двойнослойные электрохимические конденсаторы (суперконденсаторы) [26]. Появилась задача эффективного распределения электроэнергии между накопителями разного типа.

Произошла трансформация задачи обеспечения заряженности батареи, так как для эффективной рекуперации необходима степень заряженности менее 100% (как правило, около 80%). Это требует периодического снижения выработки электроэнергии путем ослабления возбуждения или полного отключения генератора (рисунок 3).

<sup>4</sup> Топливная экономичность автомобилей с бензиновыми двигателями / Т. У. Асмус, К. Боргнакке, С. К. Кларк [и др.]; под ред. Д. Хиллиарда, Дж. С. Спрингера; пер. с англ. А. М. Васильева; под ред. А. В. Кострова. М.: Машиностроение, 1988. 504 с.

<sup>5</sup> Влияние электрических потребителей на расход топлива автомобиля / Т. Т. Амрин, А. А. Мелентьев, Б. Т. Нукубаев, А. Н. Чебоксаров // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, приуроченной к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий, Омск, 24 – 25 ноября 2022 г. Омск. 2022. С. 115 – 118. EDNNKBTPN

Целевой функцией стратегии третьего уровня является снижение расхода топлива на привод генератора, для чего необходимо снизить вырабатываемую им мощность. Это можно реализовать двумя способами: периодически отключать ток возбуждения с целью снижения выходного напряжения генератора или снизить нагрузку путем отключения части потребителей. В качестве ограничения этой стратегии управления выступает степень заряженности батареи, которая не должна быть меньше критической.

$$g_e \rightarrow \min; g_e = g_0 + k_p \cdot P_{\Gamma}^i; \\ P_{\Gamma}^i = I_{\Gamma}^i \cdot (U_{\Gamma}^{\text{НОМ}} - I_{\Gamma}^i \cdot r_{\Gamma}); U_{\Gamma}^{\text{min}} = \alpha \cdot U_{\Gamma}^{\text{НОМ}}; \quad (7) \\ U_{\Gamma}^{\text{min}} = SOC_{\text{крит}} \cdot (U_{\text{max}} - U_{\text{min}}) + U_{\text{min}},$$

где  $g_e$  – расход топлива, л/100 км;  $g_0$  – часть расхода топлива, не зависящая от работы (деактивации) генератора, л/100 км;  $k_p$  – коэффициент, учитывающий влияние мощности потребителей на расход топлива на привод генератора, л/(100 км·Вт);  $P_{\Gamma}^i$  – текущая мощность генератора, Вт;  $I_{\Gamma}^i$  – текущее значение силы тока генератора, А;  $\alpha$  – коэффициент заполнения импульса тока возбуждения генератора ( $\alpha = 0 \dots 100\%$ ).

Особенностью рассмотренных выше стратегий является отсутствие практического решения ещё одной актуальной задачи, связанной с изменением технического состояния агрегатов системы электроснабжения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Следующая стратегия развивает предыдущую и логически из нее вытекает. Помимо затрат на топливо в процессе эксплуатации системы электроснабжения возникают и другие затраты. Следовательно, снижение затрат на эксплуатацию системы электроснабжения на всех этапах жизненного цикла – стратегия управления следующего иерархического уровня (рисунок 4).

На современном этапе развития вычислительной техники возможен контроль эффективности работы системы электроснабжения, численно равной отношению мощности источников электроэнергии к мощности ДВС, расходуемой на привод автомобильного генератора [25].

$$E = \frac{P_2}{P_1}, \quad (8)$$

где  $P_1$  – потребляемая мощность (затраты на привод генератора), кВт;  $P_2$  – мощности источников электроэнергии, кВт.

$$P_2 = P_{\Gamma} \pm P_{\text{АКБ}}, \quad (9)$$

где  $P_{\text{АКБ}}$  – зарядная или разрядная мощность батареи, кВт.

Снижение энергоэффективности системы электроснабжения в процессе эксплуатации обусловлено возникновением неисправностей и естественным износом (старением) основных агрегатов. При этом изменяется как полезная, так и потребляемая мощность.

Прогнозирование изменения технического состояния с вычислением остаточного ресурса агрегатов возможно на основе учета внутреннего омического сопротивления. При этом необходима информация о напряжениях и силе тока в ключевых точках бортовой сети и устройство для её обработки. Возможно добавление соответствующего программного обеспечения в блок управления генератором или оснащение системы электроснабжения дополнительным бортовым устройством.

Затраты на эксплуатацию системы электроснабжения включают в себя помимо затрат на этапе нормальной эксплуатации также затраты на техническое обслуживание, диагностирование, ремонт (замену) и утилизацию.

$$C_{\text{экспл}} = C_{\text{ТОР}} \pm C_{\text{топл}}, \quad (10)$$

где  $C_{\text{экспл}}$  – затраты на эксплуатацию системы электроснабжения, р.;  $C_{\text{топл}}$  – экономия (перерасход) топлива в процессе эксплуатации системы электроснабжения, р.;  $C_{\text{ТОР}}$  – затраты на техническое обслуживание, диагностирование, ремонт (замену) и утилизацию агрегатов системы электроснабжения, р.

$$C_{\text{топл}} = \frac{N \cdot L_{\text{год}}}{100} \cdot \Delta g_e \cdot C_{\text{топл}}, \quad (11)$$

где  $\Delta g_e$  – экономия (перерасход) топлива при работе системы электроснабжения относительно нормативного, л/100 км;  $C_{\text{топл}}$  – стоимость одного литра топлива, р.

$$C_{\text{ТОР}} = C_{\text{ТО}} + \sum_{i=1}^m C_{\text{д}} + \sum_{j=1}^k C_{\text{р}} + C_{\text{ут}}. \quad (12)$$

Техническое обслуживание системы электроснабжения включает в себя оценку технического состояния аккумуляторной батареи, долив или замену электролита, а также профилактическую зарядку. Техническое обслуживание генератора, как правило, не проводится. Периодичность таких мероприятий прописана в регламенте процедур технического обслуживания автомобилей. В случае коммерческой эксплуатации автомобилей или эксплуатации в тяжелых условиях периодичность техниче-

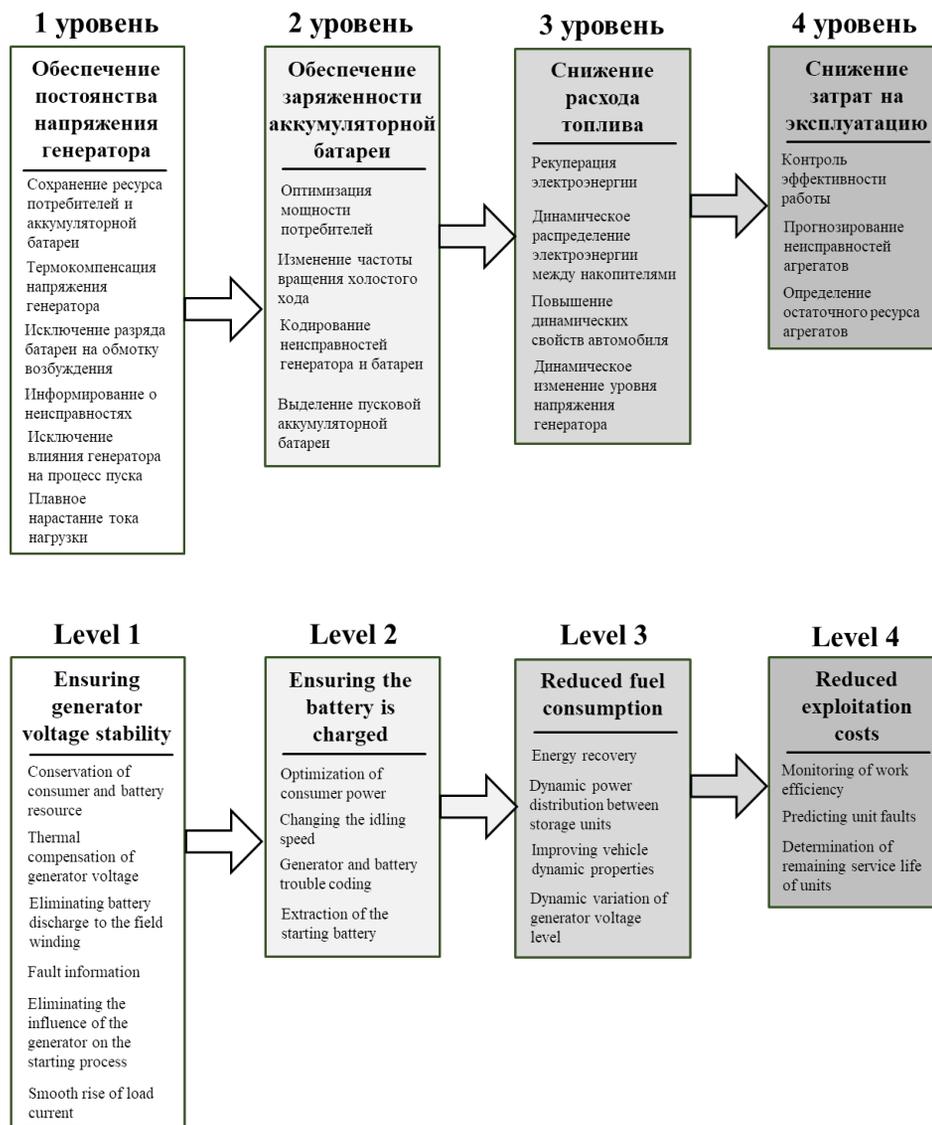


Рисунок 4 – Стратегии и задачи управления системой электроснабжения автомобилей  
 Источник: составлено автором.

Figure 4 – Strategies and challenges of managing the vehicle power supply system  
 Source: compiled by the author.

ского обслуживания аккумуляторных батарей должна быть снижена для предотвращения внезапного выхода из строя.

$$C_{ТО} = N \cdot \left( \frac{L_{год}}{L_{ТО}} \cdot C_{ТО} + 2 \cdot C_{СО} \right), \quad (13)$$

где  $C_{ТО}$  – затраты на техническое обслуживание, р.;  $N$  – количество лет эксплуатации;  $L_{год}$  – годовой пробег автомобиля, тыс. км;  $L_{ТО}$  – периодичность технического обслуживания, тыс. км;  $C_{ТО}$  – стоимость технического обслуживания, р.;  $C_{СО}$  – стоимость сезонного обслуживания, р.

Затраты на диагностирование

$$\sum_{i=1}^m C_D = N \cdot \frac{L_{год}}{L_D^i} \cdot C_D^i, \quad (14)$$

где  $\sum C_D$  – суммарные затраты на диагностирование, р.;  $L_D^i$  – периодичность диагностирования  $i$ -го агрегата, тыс. км;  $C_D^i$  – стоимость диагностирования  $i$ -го агрегата, р.;  $m$  – число диагностируемых агрегатов.

Затраты на ремонт (замену)

$$\sum_{j=1}^k C_P = \frac{p_P(L) \cdot N \cdot L_{год}}{RS_{арп}^j} \cdot (C_P^j + C_{арп}^j), \quad (15)$$

где  $\Sigma C_p$  – суммарные затраты на ремонт (замену) агрегатов, р.;  $p_p(L)$  – вероятность ремонта агрегатов от пробега;  $RS_{арг}^j$  – ресурс работы  $j$ -го агрегата до ремонта (замены), тыс. км;  $\Pi_p^j$  – стоимость ремонта (замены)  $j$ -го агрегата, р.;  $\Pi_{арг}^j$  – стоимость нового агрегата, р.

Затраты на утилизацию

$$C_{ут} = \frac{n \cdot N \cdot L_{год}}{RS_B} \cdot (\Pi_B + \Pi_{ут}), \quad (16)$$

где  $C_{ут}$  – затраты на утилизацию аккумуляторных батарей, р.;  $RS_B$  – ресурс работы аккумуляторных батарей, тыс. км;  $n$  – количество установленных аккумуляторных батарей;  $\Pi_{ут}$  – стоимость услуг по утилизации аккумуляторной батареи, р.;  $\Pi_B$  – стоимость новой аккумуляторной батареи, р.

Целевой функцией стратегии четвертого уровня является максимизация отношения энергоэффективности к затратам на эксплуатацию

$$\begin{aligned} \text{ЦФ} = \frac{E}{C} \rightarrow \max; E = \frac{P_2}{P_1} \rightarrow \max; \\ C_{\text{экспл}} = C_{\text{ТОР}} \pm C_{\text{топл}} \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (17)$$

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Повышение мощности потребителей электроэнергии, ужесточение требований к экологическим показателям автомобилей приводят к появлению новых задач и принципов управления системой электроснабжения. Анализ опубликованных работ показал, что в основном они посвящены интеллектуальному управлению генераторами, обеспечению зарядного баланса, оптимизации мощности потребителей, рекуперации электроэнергии и главной целью имеют снижение расхода топлива. В тоже время не выполнен комплексный анализ актуальных и ранее применявших стратегий управления с целью разработки перспективных стратегий, объединяющих в себе достоинства предыдущих.

2. Стратегии управления можно разделить на три иерархических уровня, причем каждый следующий включает в себя задачи, решенные на предыдущем этапе. Отличительной особенностью стратегии первого уровня, как правило, является отсутствие дополнительных датчиков в системе электроснабжения. Их появление привело к возникновению стратегии второго уровня. Стратегия второго уровня направлена на обеспечение заряженности стартерной батареи и достигается оснащением автомобиля дополнительными датчиками

и организацией взаимодействия ЭБУ двигателя с генератором. Стратегия третьего уровня часто пересекается с предыдущей, однако на первое место выходит снижение расхода топлива автомобиля. Рассмотрены целевые функции перечисленных стратегий управления.

3. Предложена стратегия управления четвертого уровня, целью которой является снижение затрат на эксплуатацию системы электроснабжения на всех этапах жизненного цикла. Рассмотрена структура затрат на эксплуатацию системы электроснабжения, в которые входят затраты на перерасход топлива, вызванный неисправностями в работе агрегатов, а также затраты на техническое обслуживание, диагностирование, ремонт (замену) и утилизацию.

4. Практическое применение предложенной стратегии позволит учесть все виды затрат и минимизировать расходы на эксплуатацию системы электроснабжения как автомобилей с двигателями внутреннего сгорания, так и гибридных автомобилей и электромобилей, в которых электроэнергия имеет еще большую значимость.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зуев С. М., Малеев Р. А., Чернов А. Е. Энергетическая эффективность систем электрооборудования автономных объектов: монография. М.: ИНФРА – М. 2022. 170 с.
2. Чернов А. Е., Акимов А. В. Повышение энергетической эффективности системы электрооборудования автотранспортных средств // Известия МГТУ МАМИ. 2019. № 1 (39). С.67 – 76.
3. Cho, G.-J., Wi, H.-S., Lee, J., Park, J.-II and Park, K.-S. (2009). Effect of Alternator Control on Vehicle Fuel Economy. Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers. Vol. 17, No. 2, pp. 20 – 25.
4. Li, B., Yang, D., Kong, W. and Lian, X. (2013). Research of Intelligent Automotive Alternator Control System to Reduce the Fuel Consumption. Applied Mechanics and Materials. Vol. 321-324. pp. 1578 – 1582. 10.4028/www.scientific.net/AMM.321-324.1578.
5. Sales, L., Pacheco, E., Monteiro, L., Souza, L. and Mota, M. (2017). Evaluation of the Influence of an Alternator with Mechanical Decoupling on Energy Consumption and CO<sub>2</sub> Emission in a Flex Fuel Vehicle. SAE Technical Paper 2017-36-0116.
6. Wang, Y., Hu, H., Zhang, L., Zhang, N. and Sun, X. (2016). Real-Time Vehicle Energy Management System Based on Optimized Distribution of Electrical Load Power. Applied Sciences vol. 6, no. 10: pp. 285. <https://doi.org/10.3390/app6100285>
7. Wang, Y., Zhang, N., Wu, Y., Liu, B. and Wu, Y. (2018). A strategy of electrical energy management for internal combustion engine vehicle based on driving cycle recognition and electrical load perception. Ad-

vances in Mechanical Engineering. vol. 10(11). <https://doi.org/10.1177/1687814018809236>

8. Shin, J., Kim, H., Baek, S., Sunwoo, M., and Han, M. (2019) Rule-Based Alternator Control Using Predicted Velocity for Energy Management Strategy. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 141(12): 121005. <https://doi.org/10.1115/1.4044616>

9. Zhong, Q. & Qin, H. & Xu, R. (2018) Study on the Start-Stop System Control Strategy under Different Driving Cycle, 2018 IEEE 14th International Conference on Control and Automation (ICCA), pp. 223 – 228. DOI: 10.1109/ICCA.2018.8444176.

10. Kessels, J.T.B.A., Koot, M., de Jager, B., van den Bosch, P.P.J., Aneke, N.P.I. and Kok, D.B. (2007) Energy Management for the Electric Powertrain in Vehicles With a Conventional Drivetrain, in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 15, no. 3, pp. 494 – 505, doi: 10.1109/TCST.2007.894646.

11. Tan, Ö., Jerouschek, D., Kennel, R., Taskiran, A. (2022) Energy Management Strategy in 12-Volt Electrical System Based on Deep Reinforcement Learning. *Vehicles*, 4, pp. 621-638. <https://doi.org/10.3390/vehicles4020036>

12. Lakshminarasimhan, V., & Athani, G. (2013). An Intelligent Alternator Control Mechanism for Energy Recuperation and Fuel Efficiency Improvement. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*. 2. pp. 217 – 225. 10.4271/2013-01-1750.

13. Sayahan, A. and Asaei, B. (2013). An intelligent alternator control approach for fuel consumption reduction. 13th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), pp. 296 – 300, <https://doi.org/10.1109/EEEIC-2.2013.6737925>.

14. Dziubiński M, Drozd A, Adamiec M, Siemonek E. (2016) Energy balance in motor vehicles. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 148. DOI: 012035. 10.1088/1757-899X/148/1/012035.

15. Lee, W. & Choi, D. & Sunwoo, M. (2002) Modelling and simulation of vehicle electric power system. *Journal of Power Sources*. Vol. 109. pp. 58-66. DOI: 10.1016/S0378-7753(02)00033-2.

16. Debelov, V. & Dzhodzhuva, O. & Sednev, K. & Endachev, D. (2020) Charging balance management system modeling and implementation in intelligent vehicle with combined power system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 819. DOI: 012037. 10.1088/1757-899X/819/1/012037.

17. Capano, G. & Mozzone, M. & Kar, N.C. (2013) Study of the electric power balance in a vehicle for the choice of the battery, 2013 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), pp. 1-6. DOI: 10.1109/ITEC.2013.6573476.

18. Colin W., Sabarish G., Lisa F., Marcello C. (2015) A model-based supervisory energy management strategy for a 12V vehicle electrical system, *Control Engineering Practice*, Vol. 44, pp. 20-30, <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2015.05.011>.

19. Puzakov A. (2021) Estimation of efficiency of electric power balance in automobiles. *Transport Problems*. Vol. 16. no. 2. pp. 113 – 120.

20. Пузаков А. В. Оценка эффективности работы системы электроснабжения автотранспорт-

ных средств. *Транспорт Урала*. 2022. № 4 (75). С. 62 – 67.

21. Козловский В. Н. Математическая имитационная модель оценки зарядного баланса автомобиля / В. Н. Козловский, У. В. Брачунова, А. В. Крицкий, А. С. Саксонов // *Грузовик*. 2021. № 7. С. 17 – 26.

22. Дрючин Д. А., Булатов С. В., Загидуллин Р. Р. Методика корректировки нормативной периодичности технического обслуживания автотранспортных средств на основе данных о фактическом расходе топлива // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. 2022. № 1. С. 93 – 101.

23. Тарасик В. П., Пузанова О. В. Влияние режима движения автомобиля на его топливную экономичность // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2020. № 1 (66). С. 76 – 85. [https://doi.org/10.53078/20778481\\_2020\\_1\\_76](https://doi.org/10.53078/20778481_2020_1_76). - EDN MSQGQR

24. Теренченко А. С., Аникеев С. А. Современные международные требования по ограничению выбросов диоксида углерода и расхода топлива транспортными средствами // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2022. №1 (85). С. 60 – 65.

25. Пузаков А. В. Оценка влияния автомобильного генератора на расход топлива автомобиля // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. 2023. № 4. С. 83 – 93, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-4-83>.

26. Вышков Ю. Д., Томилин М. М. Применение суперконденсаторов в бортовых электротехнических комплексах: монография. М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2020. 160 с.

## REFERENCES

1. Zuev S. M., Maleev R. A., Chernov A. E. *Energeticheskaya effektivnost sistem elektrooborudovaniya avtonomnih obektov* [Energy efficiency of electrical equipment systems of autonomous objects] monograph Moscow: INFRA-M, 2022:170. (In Russ.)

2. Chernov A. E., Akimov A. V. *Povisheniye energeticheskoi effektivnosti sistemi elektrooborudovaniya avtotransportnih sredstv* [Increasing the energy efficiency of the electrical equipment system of motor vehicles] *Izvestiya MSTU MAMI*. 2019; 1 (39): 67 – 76. (In Russ.)

3. Cho, G.-J., Wi, H.-S., Lee, J., Park, J.-II and Park, K.-S. (2009). Effect of Alternator Control on Vehicle Fuel Economy. *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*. 2009; Vol. 17, No. 2: 20 – 25.

4. Li, B., Yang, D., Kong, W. and Lian, X. (2013). Research of Intelligent Automotive Alternator Control System to Reduce the Fuel Consumption. *Applied Mechanics and Materials*. 2013; Vol. 321-324: 1578-1582. 10.4028/www.scientific.net/AMM.321-324.1578.

5. Sales, L., Pacheco, E., Monteiro, L., Souza, L. and Mota, M. (2017). Evaluation of the Influence of an Alternator with Mechanical Decoupling on Energy Consumption and CO2 Emission in a Flex Fuel Vehicle. *SAE Technical Paper* 2017-36-0116.

6. Wang, Y., Hu, H., Zhang, L., Zhang, N. and Sun, X. (2016). Real-Time Vehicle Energy Manage-

ment System Based on Optimized Distribution of Electrical Load Power. *Applied Sciences*. 2016; vol. 6, no. 10: 285. <https://doi.org/10.3390/app6100285>

7. Wang, Y., Zhang, N., Wu, Y., Liu, B. and Wu, Y. (2018). A strategy of electrical energy management for internal combustion engine vehicle based on driving cycle recognition and electrical load perception. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018; vol. 10 (11). <https://doi.org/10.1177/1687814018809236>

8. Shin, J., Kim, H., Baek, S., Sunwoo, M., and Han, M. (2019) Rule-Based Alternator Control Using Predicted Velocity for Energy Management Strategy. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2019; 141(12): 121005. <https://doi.org/10.1115/1.4044616>

9. Zhong, Q. & Qin, H. & Xu, R. (2018) Study on the Start-Stop System Control Strategy under Different Driving Cycle, 2018 IEEE 14th International Conference on Control and Automation (ICCA). 2018: 223-228. DOI: 10.1109/ICCA.2018.8444176.

10. Kessels, J. T. B. A., Koot, M., de Jager, B., van den Bosch, P. P. J., Aneke, N. P. I. and Kok, D. B. (2007) Energy Management for the Electric Powertrain in Vehicles With a Conventional Drivetrain, in IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2007; vol. 15, no. 3: 494 – 505, doi: 10.1109/TCST.2007.894646.

11. Tan, Ö., Jerouschek, D., Kennel, R., Taskiran, A. (2022) Energy Management Strategy in 12-Volt Electrical System Based on Deep Reinforcement Learning. *Vehicles*. 2022; 4: 621 – 638. <https://doi.org/10.3390/vehicles4020036>

12. Lakshminarasimhan, V., & Athani, G. (2013). An Intelligent Alternator Control Mechanism for Energy Recuperation and Fuel Efficiency Improvement. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*. 2013; 2: 217-225. 10.4271/2013-01-1750.

13. Sayahan, A. and Asaei, B. (2013). An intelligent alternator control approach for fuel consumption reduction. *13th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. 2013: 296-300, <https://doi.org/10.1109/EEEIC-2.2013.6737925>.

14. Dziubiński M, Drozd A, Adamiec M, Siemionek E. (2016) Energy balance in motor vehicles. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2016: 148. DOI: 012035. 10.1088/1757-899X/148/1/012035.

15. Lee, W. & Choi, D. & Sunwoo, M. (2002) Modelling and simulation of vehicle electric power system. *Journal of Power Sources*. 2002; Vol. 109: 58 – 66. DOI: 10.1016/S0378-7753(02)00033-2.

16. Debelov, V. & Dzhodzhuva, O. & Sednev, K. & Endachev, D. (2020) Charging balance management system modeling and implementation in intelligent vehicle with combined power system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 819. DOI: 012037. 10.1088/1757-899X/819/1/012037.

17. Capano, G. & Mozzone, M. & Kar, N.C. (2013) Study of the electric power balance in a vehicle for the choice of the battery, 2013 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). 2013:1 – 6. DOI: 10.1109/ITEC.2013.6573476.

18. Colin W., Sabarish G., Lisa F., Marcello C. (2015) A model-based supervisory energy management strategy for a 12V vehicle electrical system, *Control Engineering Practice*. 2015; Vol. 44: 20 – 30, <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2015.05.011>.

19. Puzakov A. Estimation of efficiency of electric power balance in automobiles. *Transport Problems*. 2021; 16. no. 2: 113 – 120.

20. Author. Ocenka effektivnosti raboti sistemi elektrosnabjeniya avtotransportnih sredstv [Estimation of the efficiency of the electric power supply system of motor vehicles]. *Transport of the Ural*s. 2022. no. 4 (75). pp. 62 – 67.

21. Kozlovskiy V.N., Brachunova U.V., Kritskiy A.V., Saxonov A. S. Matematicheskaya imitacionnaya model ocenki zaryadnogo balansa avtomobilya [Mathematical simulation model of the vehicle charge balance estimation] *Gruzovik*. 2021;7: 17 – 26. (In Russ.)

22. Druchin D. A., Bulatov S. V., Zagidullin R. R. Metodika korektirovki normativnoi periodichnosti tehnikeskogo obslujivaniya avtotransportnih sredstv na osnove dannih o fakticheskom rashode topliva [Methodology of correction of the normative periodicity of the motor vehicles maintenance on the basis of the data on the actual fuel consumption]. *Intellect. Innovations. Investments*. 2022; 1: 93 – 101. (In Russ.)

23. Tarasik V. P., Puzanova O. V. Vliyanie rejima dvijeniya avtomobilya na ego toplivnuyu ekonomichnost [Influence of the car driving mode on its fuel efficiency]. *Bulletin of the Belarusian-Russian University*. 2020; 1 (66): 76 – 85. [https://doi.org/10.53078/20778481\\_2020\\_1\\_76](https://doi.org/10.53078/20778481_2020_1_76). (In Russ.)

24. Terenchenko A. S., Anikeev S. A. Sovremenie mejdunarodnie trebovaniya po ogranicheniyu vibrosov dioksida ugleroda i rashoda topliva transportnimi sredstvami [Modern international requirements for limiting carbon dioxide emissions and fuel consumption by vehicles]. *Transportation on alternative fuel*. 2022; 1 (85): 60 – 65. (In Russ.)

25. Puzakov A. V. Ocenka vliyaniya avtomobilnogo generatora na rashod topliva avtomobilya [Estimation of the influence of the automobile generator on the car fuel consumption]. *Intellect. Innovations. Investments*. 2023; 4: 83-93, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-4-83>. (In Russ.)

26. Vyshkov Y. D., Tomilin M. M. Primenenie superkondensatorov v bortovih elektrotehnicheskikh kompleksah [Application of supercapacitors in onboard electrical complexes] monograph. Moscow Aviation Institute (National Research University), 2020: 160. (In Russ.)

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Пузаков Андрей Владимирович – доц. кафедры технической эксплуатации и ремонта автомобилей. SPIN-код: 7860-0660.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

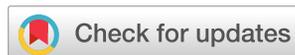
Andrei V. Puzakov – Associate Professor of the Technical Operation and Repair of Cars Department. SPIN-код: 7860-0660.

**РАЗДЕЛ III.  
СТРОИТЕЛЬСТВО  
И АРХИТЕКТУРА**



**PART III.  
CONSTRUCTION  
AND ARCHITECTURE**

Научная статья  
УДК 624.072.14  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-488-499>  
EDN: MTVTNT



## ХЛАДОСТОЙКОСТЬ СТАЛЬНОЙ БАЛКИ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ ВЫТЯЖКОЙ СТЕНКИ

Е. В. Кравчук<sup>1</sup>, И. Ю. Белуцкий<sup>2</sup>, В. А. Кравчук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС),  
г. Хабаровск, Россия

<sup>2</sup>Тихоокеанский государственный университет (ТОГУ),  
г. Хабаровск, Россия

004938@pnu.edu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5419-1365>

000177@pnu.edu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3881-2050>

000415@pnu.edu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4101-1334>

\*ответственный автор

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В данной статье представлен обобщенный анализ хладостойкости конструктивных элементов существующих стальных строительных конструкций и применение его к оценке хладостойкости стальной балки, предварительно напряженной вытяжкой тонкой стенки. Предмет исследования – стальные строительные конструкции. Объектом исследования является стальная биметаллическая балка, предварительно напряженная без затяжек.

**Материалы и методы.** Исследование базируется на механике твердых деформируемых тел, изучении механических свойств стали, работе стали в условиях низких температур с учетом влияния концентраторов напряжений и вероятности хрупких разрушений в элементах балки.

**Результаты.** Проведен анализ ударной вязкости сталей С440 и С245, применяемых в поясных листах и стенке предварительно напряженной балки. Установлено, что хладостойкость элементов балки обеспечивается при эксплуатации конструкции в диапазоне отрицательных температур от  $-45^{\circ}\text{C}$  до  $-55^{\circ}\text{C}$ . Доказано, что фактические нормальные напряжения в крайних волокнах сечения стенки предварительно напряженной балки ниже допустимых при пластическом деформировании материала стенки, а согласно теории М. Губера, Р. Мизеса и Г. Генки вероятность появления хрупких разрушений в зоне концентраторов напряжений мала. Установлено, что отсутствие ребер жесткости по стенке балки уменьшает пластические деформации, вызванные сваркой, снижает многоэлементность конструкции и повышает хладостойкость ее материала.

**Выводы.** Высокая степень устойчивости стенки предварительно напряженной балки позволяет проектировать ее достаточно тонкой, при этом повышая ее хладостойкость. Напряженное состояние конструкции, снижение ее массы, уменьшение толщины стенки, отсутствие концентраторов сварочных напряжений, а также снижение многоэлементности свидетельствуют о хладостойкости материала балки, предварительно напряженной вытяжкой стенки.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** предварительное напряжение, хрупкость, устойчивость, концентратор напряжений, многоэлементность, хладостойкость

**БЛАГОДАРНОСТИ:** благодарность рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 14.06.2023; одобрена после рецензирования 18.07.2023; принята к публикации 30.08.2023.

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: Кравчук Е. В., Белуцкий И. Ю., Кравчук В. А. Хладостойкость стальной балки, предварительно напряженной вытяжкой стенки // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 4 (92). С. 488-499. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-488-499>

© Кравчук Е. В., Белуцкий И. Ю., Кравчук В. А., 2023



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-488-499>  
EDN: MTVTNT

## COLD RESISTANCE OF STEEL BEAM PRESTRESSED BY WALL DRAWING

Evgenii V. Kravchuk<sup>1</sup>, Igor Yu. Belutskii<sup>2</sup>, Valerii A. Kravchuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Far Eastern State Transport University,  
Khabarovsk, Russia

<sup>2</sup>Pacific State University,  
Khabarovsk, Russia

004938@pnu.edu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5419-1365>

000177@pnu.edu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3881-2050>

000415@pnu.edu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4101-1334>

\*corresponding author

### ABSTRACT

**Introduction.** The purpose of the article is a generalized analysis of existing methods for determining of structural steel elements behaviour in extreme conditions of subzero temperatures and their use to assess the cold resistance of steel beams prestressed by drawing of a thin wall. Subject of study is structural steel. Object of study is bimetallic steel beam prestressed without rods.

**Materials and methods.** The study is based on the mechanics of deformable solid bodies, studies of the mechanical characteristics of steel and its behaviour at considerable subzero temperatures, taking into account stress concentrators and the probability of brittle cracks in the beam elements.

**Results.** The impact strength analysis of steels C440 and C245 used in the flange plates and wall of prestressed beam was carried out. It is found that during the structure operation in the temperature range from minus 45°C to minus 55°C, cold resistance of the beam elements is ensured. It is proved that actual normal stresses in the extreme fibers of the prestressed beam web section are lower than the allowable stresses during plastic deformation of the wall material and, according to the theory of M. Huber, R. Mises and H. Hencky, the probability of brittle cracks in stress concentrators zone is low. It is found that the absence of stiffeners along the beam wall reduces plastic deformations caused by welding, reduces the number of extra elements in the structure and increases the material's cold resistance.

**Conclusions.** The high stability of prestressed beam wall enables designing it quite thin and increasing its cold resistance. The stressed state of the structure, reduction of its weight, thinning of wall, absence of welding stress concentrators, and reduction of the number of extra elements in the beam testify to the cold resistance of the material of the beam pre-stressed by wall drawing.

**KEYWORDS:** prestressing, embrittlement, stability, stress concentrator, extra elements, cold resistance

**ACKNOWLEDGEMENTS:** We are grateful to the reviewers of the article.

The article was submitted 14.06.2023; approved after reviewing 18.07.2023; accepted for publication 30.08.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Evgeniy V. Kravchuk, Igor Yu. Belutsky, Valerii A. Kravchuk Cold resistance of steel beam prestressed by wall drawing. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (4): 488-499. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-488-499>

© Kravchuk E. V., Belutsky I. Yu., Kravchuk V. A., 2023



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

## ВВЕДЕНИЕ

Известно<sup>1</sup>, что более 60% площади России относится к районам Крайнего Севера и приравненным к ним территориям. Низкие температуры в некоторых регионах России (Саха Якутия) доходят до  $-50^{\circ}\text{C}$  (СП 20.13330.2017 «Нагрузки и воздействия»). Эксплуатация существующих и проектирование вновь строящихся зданий и сооружений на основе металлических каркасов, выполненных из стали, требуют внимательного изучения поведения данных конструкций, испытывающих различные нагрузки, которые возможны в районах со значительными низкими температурами, поэтому закономерно, что научно-исследовательские и проектные институты России и зарубежных стран занимаются разработкой нормативной литературы, регламентирующей применение стали в разнообразных конструкциях для различных климатических зон. Социальный заказ на требуемую сталь полностью обеспечивается российской металлургической промышленностью. Российским институтом стандартизации разработан действующий в настоящее время ГОСТ 27772–2021 «Прокат для строительных стальных конструкций», в котором определяется область применения строительной стали в различных климатических зонах России.

Министерством черной металлургии разработан ГОСТ 9454–78 «Методы испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах».

Министерством строительства и коммунального хозяйства РФ был разработан свод правил СП 16.13330–2017 «Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП П – 23–81\*», устанавливающих требования, распространяющиеся на проектирование и расчет стальных строительных конструкций

зданий и сооружений различного назначения, работающих при температуре не выше  $100^{\circ}\text{C}$  и не ниже  $-60^{\circ}\text{C}$ .

ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова в 1989 г. разработал «Руководство по расчету стальных конструкций на хрупкую прочность», в котором изложил особенности эксплуатации стальных конструкций при хрупких разрушениях.

ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко в 1989 г. подготовил «Пособие по проектированию металлических конструкций», являющееся дополнением к СНиП П – 23–81\*, в котором изложены новые на тот момент теоретические разработки в области расчета и проектирования стальных конструкций.

Большой вклад в исследования работы различных материалов, работающих в упругой и упругопластической областях и при отрицательных температурах с учетом наличия концентраторов напряжений, вносят творческие коллективы проектных и научно-исследовательских институтов и учебных заведений России.

Исследование хладостойкости стали при плоском напряженном состоянии и начальных напряжениях изучено в работе [1]. Склонность строительной стали к хладоломкости и их классификация по этому признаку изложены в работе<sup>2</sup>. Хладостойкость стальных конструкций детально изучена в монографии<sup>3</sup>. Повышение надежности стальных конструкций, эксплуатируемых при низких температурах, рассмотрено в работе<sup>4</sup>, влияние конструктивной формы на хладостойкость стальных конструкций рассмотрено в статье [2]. Прочность элементов стальных конструкций в температурном интервале их квазихрупкого разрушения изложена в работе [3]. Вопросы строительства на Севере отражены в монографии<sup>5</sup>, в которой<sup>6</sup> рассмотрены проблемы, касающиеся деформацион-

<sup>1</sup> Постановление Правительства Российской Федерации от 16.11.2021 № 1946 «Об утверждении перечня районов Крайнего Севера и местностей, приравненных к районам Крайнего Севера, в целях предоставления государственных гарантий и компенсаций для лиц, работающих и проживающих в этих районах и местностях, признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации и признании не действующими на территории Российской Федерации некоторых актов Совета Министров СССР» // Собрание законодательства РФ. 22.11.2021. № 47. Ст. 7853.; Крайний Север. [Электронный ресурс]. URL: <http://ru.wikipedia.org> Крайний Север (дата обращения: 08.06.2023).

<sup>2</sup> Балдин В.А. и др. О склонности к хладоломкости строительных сталей и классификация сталей по этому признаку. Проектирование сварных конструкций. Киев: Наукова думка. 1965. 383 с.

<sup>3</sup> Бирюлев В.В., Кошин И. И., Крылов И. И., Сильвестров А. В. Проектирование металлических конструкций. Специальный курс. Ленинград: Стройиздат. 1990. 432 с.

<sup>4</sup> Сильвестров А. В. Повышение надежности стальных конструкций, эксплуатирующихся при низких температурах. Новосибирск: НИСИ. 1977. 72 с.

<sup>5</sup> Солодарь М.Б., Плишкин Ю.С., Кузнецова М.Н. Металлические конструкции для строительства на Севере. Ленинград: Стройиздат. 1981. 206 с.

<sup>6</sup> Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.

ных критериев разрушения и расчета элементов конструкций на прочность.

Серьезное влияние на хладостойкость стальных конструкций оказывают сварные соединения. Данной проблеме посвящены многочисленные работы российских и зарубежных ученых. В монографии<sup>7</sup> описаны хрупкие разрушения сварных конструкций, анализ концентрации напряжений<sup>8</sup>. Влияние низких температур на работу комбинированных сварных соединений с лобовыми и фланговыми швами рассмотрено в работе [4].

Активную исследовательскую работу по изучению хладостойкости стальных конструкций ведут ученые из Китая. Обзор низкотемпературной хрупкости и механизм разрушения конструкционной стали выполнены в работе [5], работа [6] посвящена испытанию элементов конструкций из сталей высокой прочности, эксплуатируемых в условиях низких температур, исследование влияния низких температур на работу конструкций железных дорог Китая отражено в статье [7]. Анализ факторов, влияющих на вязкость металлов при низких температурах, проведен в работе [8]. Инженерные просчеты и меры по предотвращению хрупкого разрушения стальных конструкций описаны в статье [9].

В настоящее время ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко ведет активную работу по расширению сортамента для строительных металлических конструкций, делая упор на исследование хладостойкости, огнестойкости и коррозионной стойкости толстолистового металла [10,11]. Влияние циклического нагружения на микроструктуру и хладоломкость металла ЗТВ стали 10Г2ФБ исследовано в работе [12]. Оценка ресурсных показателей автодорожных мостов на основе анализа структурных изменений и накопления повреждений в конструктивных элементах изложена в работе [13]. Влияние низких температур на состояние мостовых конструкций описано в публикации [14]. В статье [15] представлен подробный анализ новых решений в металлургии высокопрочных хладостойких конструкционных сталей, рекомендуемых для применения в машиностроении и строительстве. Развитие Севера России инициировало разработку новых сортов сталей «северного» исполнения. Новые стали для строительства в экстремальных

условиях Севера предложены в работах [16, 17, 18, 19]. В работе [20] рассмотрено влияние химического состава и структурных факторов (перлит, включения различного состава) на коэффициент анизотропии ударной вязкости. Исследована связь значения этого коэффициента с появлением зависимости ударной вязкости поперек проката. В статье [21] выполнен анализ существующих взглядов на природу замедленного хрупкого разрушения стали. Влияние содержания углерода, циркония и ванадия на характеристики сопротивления хрупкому разрушению атмосферостойкой стали 14ХГНДЦ исследовано в работе [22].

Однако к настоящему моменту работы, связанные с изучением хладостойкости материала предварительно напряженных стальных конструкций не представлены должным образом, именно поэтому в данной статье мы попытаемся частично восполнить этот пробел.

Работа посвящена изучению влияния конструктивного решения стальной биметаллической балки, предварительно напряженной вытяжкой стенки, на хладостойкость конструкции.

## МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

Балка представляет собой биметаллическую конструкцию, ее оптимальное проектирование предполагает, что верхний и нижний поясные листы следует изготовить из высокопрочной стали, расчетное сопротивление которой должно быть в два раза выше расчетного сопротивления стенки, выполненной из малоуглеродистой стали. Для поясов принята сталь С440 с расчетным сопротивлением  $R_y = 43 \text{ kH} / \text{cm}^2$ , а для стенки – С245 ( $R_y = 24 \text{ kH} / \text{cm}^2$ ). Решая вопрос о хладостойкости предварительно напряженной балки, следует говорить о работе высокопрочных и малоуглеродистых сталей при отрицательных температурах.

Несомненное достоинство стали как строительного материала заключается в ее пластичности – способности испытывать значительные остаточные напряжения перед разрушением, а также вязкости – свойстве поглощать механическую энергию без снижения прочности.

<sup>7</sup> Хрупкие разрушения сварных конструкций: пер. с англ. У. Дж. Холл, Х. Кихара, В. Зут, А. А. Уэллс. (ред. засл. деят. науки и техники РСФСР, д-р техн. наук, проф. И. В. Кудрявцев и канд. техн. наук Д. М. Шур). М.: Машиностроение, 1974. 320 с.

<sup>8</sup> Нейбер Г. Концентрация напряжений: пер. с нем. Н. Н. Лебедева; под. ред. проф. А. И. Лурье. М.; Ленинград: Гостехиздат. 1947 (Ленинград: тип.им. Евг. Соколовой). 204 с.

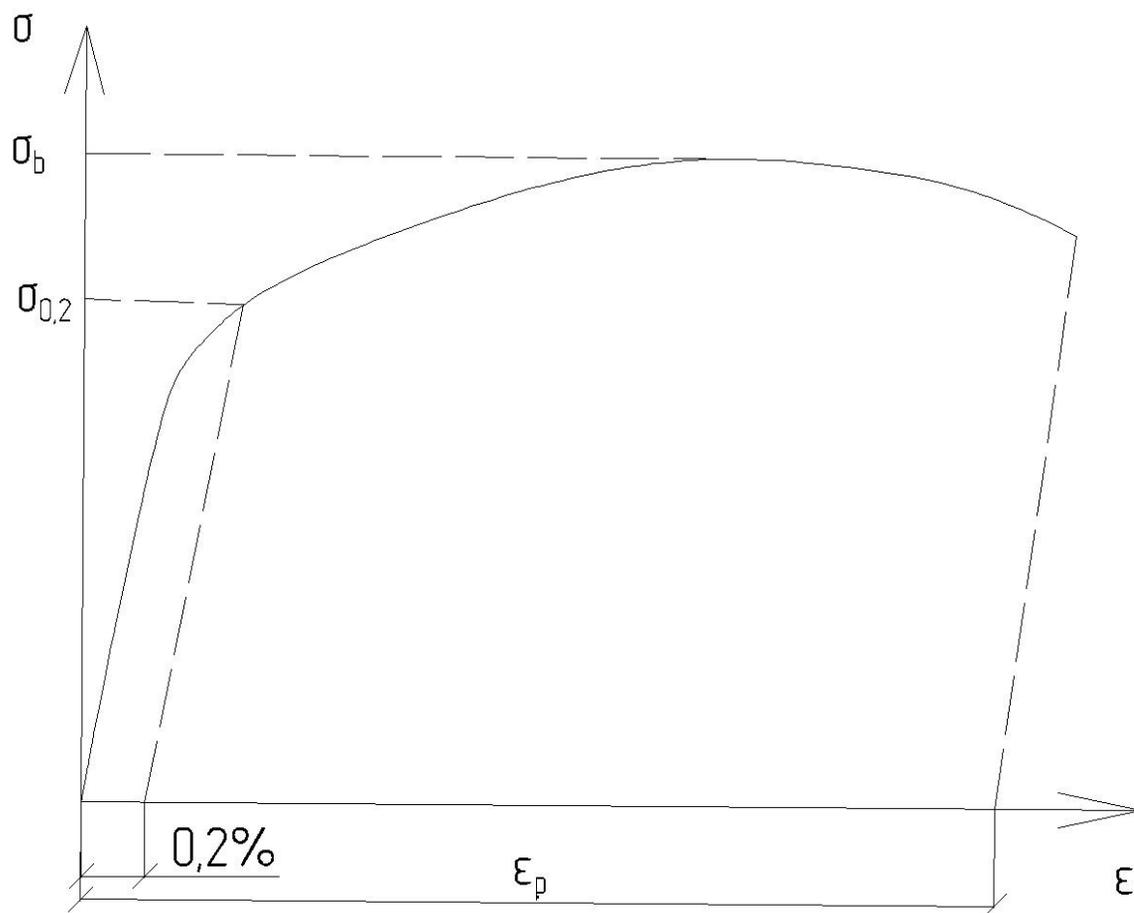


Рисунок 1 – Диаграмма одноосного растяжения низколегированной стали  
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Diagram of uniaxial stretching of low-alloy steel  
 Source: compiled by the authors.

Снижение пластичности и вязкости сталей может быть вызвано большим количеством конструктивно-технологических несовершенств, которые могут спровоцировать возникновение различных концентраторов напряжений. Структура поля напряжений, где концентрируются напряжения, превышающие расчетное сопротивление материала, имеет несколько другую кристаллическую решетку, снижающую пластичность и вязкость стали. Сталь теряет свои пластические свойства, но становится более упругой. Известно, что при отрицательной температуре во всех сортах стали повышается модуль упругости  $E$ , вре-

менное сопротивление разрыву  $R_{un}$  и предел текучести  $R_{ym}$ .

Снижение пластичности стали негативно сказывается при ее работе в климатической зоне, характеризующейся значительными отрицательными температурами. При этом надежность стальной конструкции снижается и возникает вероятность хрупкого разрушения стали. Пластические свойства стали и ее вязкость рассчитываются методами сопротивления материалов. Относительная деформация малоуглеродистой стали  $\epsilon_p = \Delta l_p / l_0$  ( $\Delta l_p$  – абсолютное удлинение образца с расчетной длиной  $l_0$ ). Вязкость стали  $a_p \approx 0,67 \cdot R_{ym} \epsilon_p \cdot (R_y -$

расчетное сопротивление материала стенки балки). В легированных сталях условный предел текучести устанавливается по остаточному удлинению, равному 0,2% (рисунок 1).

Нельзя не отметить, что на пластичность сталей оказывают большое влияние остаточные сварочные напряжения, изменение структуры при термическом воздействии при сварке и газовой резке, различие в масштабах между стандартными образцами и элементами конструкций. По этой причине в инженерной практике существуют специальные методы оценки пластичности и вязкости сталей. Одним из них является проверка склонности металла к сопротивлению хрупкому разрушению и чувствительности к концентраторам напряжений при ударных воздействиях на металл, т.е. проверка ударной вязкости. Температура, при которой происходит спад ударной вязкости, либо температура, когда ударная вязкость опускается ниже 0,34 МДж / м<sup>2</sup> принимается за порог хладоломкости.

Заметим, что на основании СП16.13330.2016 (таблица В.3) ударная вязкость малоуглеродистой стали с пределом текучести  $R_{yn} = 24,5 \text{ kH} / \text{cm}^2$ , примененной для стенки предварительно напряженной балки, а также высокопрочной стали с пределом текучести  $R_{yn} = 44 \text{ kH} / \text{cm}^2$ , использованной для поясных листов балки, равняется 34 Дж / см<sup>2</sup> в случае эксплуатации конструкции во всех температурных зонах Российской Федерации. Это дает основание для утверждения о том, что сталь, отобранная для изготовления предварительно напряженной балки, обладает высокой хладостойкостью. Порог хладоломкости для малоуглеродистой стали, по заключению А. В. Сильвестрова [2, 3, 4], может быть определен по зависимости

$$T_{hl} = (-10 + 18 C - 37 Mn - 149 Si - 285 Al)^\circ C, \quad (1)$$

где  $C, Mn, Si, Al$  процентное содержание углерода, марганца, кремния и алюминия.

В соответствии с ГОСТ 27772-88 в стали С245 содержится углерода  $C = 0,22\%$ , марганца  $Mn \leq 0,65\%$ , кремния  $Si = 0,05 - 0,14\%$ . Косвенно оценивая порог хладоломкости малоуглеродистой стали по таблице В.3 СП

16.13330.2016 и учитывая ударную вязкость 0,34 МДж / м<sup>2</sup>, можно предположить, что порог хладоломкости малоуглеродистой стали  $T_{hl} \approx -45^\circ C$ , а у высокопрочной стали С440 он равен  $T_{hl} \approx -50^\circ C$ .

Как следует из работы В.А. Кравчука «Стальные стержни, предварительно напряженные без затяжек» (М., АСВ, 2015), в балках оптимального сечения максимальные нормальные напряжения в поясных листах равны расчетному сопротивлению высокопрочной стали С440:

$$\sigma_{fv}^s = \sigma_{fn}^s = R_{yv} = 43 \text{ kH} / \text{cm}^2, \quad (2)$$

в зоне стенки, примыкающей к верхнему поясу, суммарные напряжения равны расчетному сопротивлению малоуглеродистой стали С245:

$$\sigma_{wv}^s = R_y = 24 \text{ kH} / \text{cm}^2, \quad (3)$$

а в нижней зоне стенки суммарные напряжения превышают расчетное сопротивление материала стенки:

$$\begin{aligned} \sigma_{wn}^s &= R_y \frac{3K + 2}{2K + 1} = \\ &= 24 \frac{3 \cdot 1,1754 + 2}{2 \cdot 1,1754 + 1} = 39,56 \text{ kH} / \text{cm}^2, \end{aligned} \quad (4)$$

т.е. в указанной области допускается развитие пластических деформаций.

В выражении (4)  $K$  коэффициент асимметрии сечения предварительно напряженной балки,  $K = 1,1754$ . График суммарных нормальных напряжений показан на рисунке 2.

Поскольку при работе предварительно напряженной балки в предельном состоянии нижняя область стенки в зоне максимального изгибающего момента находится в пластическом состоянии, уместно определить вероятность возникновения хрупкого разрушения материала стенки.

Согласно четвертой энергетической теории прочности Губера, Мизеса и Генки, пластичная сталь начнет разрушаться тогда, когда приведенное напряжение  $\sigma_i$  достигнет значений, определяемых выражением (5):

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = R. \quad (5)$$

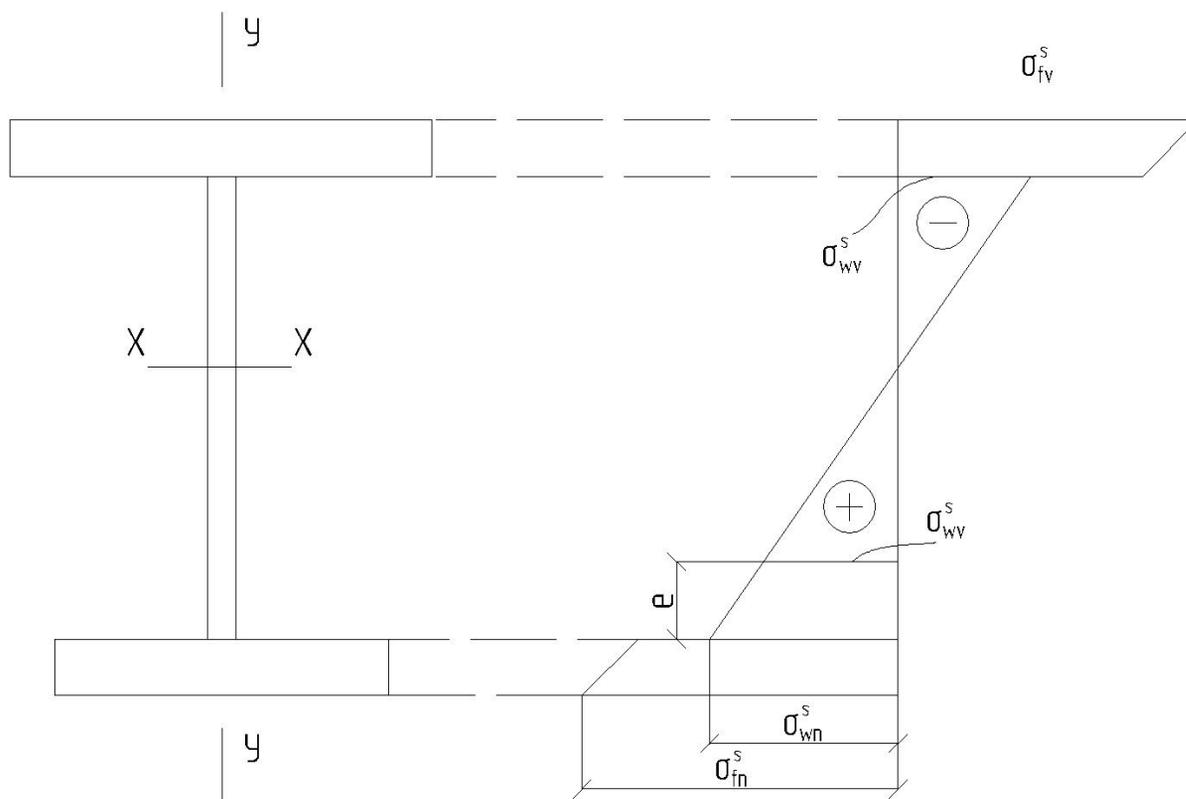


Рисунок 2 – Нормальные напряжения в балке, предварительно напряженной вытяжкой стенки  
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Normal stresses in the beam, prestressed by wall drawing  
 Source: compiled by the authors.

Здесь  $R$  предельное напряжение. В выражении (5)  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения.

Очевидно, что пояса и стенка балки будут работать при плоском напряженном состоянии. В таком случае выражение(5) трансформируется в виде

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2)} = R \quad (6)$$

Как известно, траектория главных напряжений в зоне максимального изгибающего

момента такова, что вектор нормальных напряжений в балке будет совпадать с вектором главных напряжений. Следовательно, нормальные напряжения в указанной зоне равны главным напряжениям. Будем считать, что главные напряжения в нижней зоне стенки равны напряжениям по зависимости (4). Учитывая физический смысл коэффициента Пуассона, можно записать, что  $\sigma_2 = 0,25\sigma_1$ . В таком случае приведенное напряжение

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2]} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2[\sigma_{wn}^{s2} + (0,25 \cdot \sigma_{wn}^s)^2 - \sigma_{wn}^s \cdot 0,25 \cdot \sigma_{wn}^s]} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2[39,56^2 + (0,25 \cdot 39,56)^2 - 0,25 \cdot 39,56^2]} = 36,9 \text{ kH/cm}^2 < R_u = 57,5,0 \text{ kH/cm}^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Поскольку фактические приведенные напряжения  $\sigma_i$  меньше временного сопротивления стали  $R_u$ , хрупкие трещины в нижней зоне стенки предварительно напряженной балки будут отсутствовать.

Что же касается вероятности хрупкого разрушения стали без концентраторов напряжений, то она ничтожно мала. А. Н. Сильвестров в своей работе «Повышение надежности стальных конструкций, эксплуатирующихся при низких температурах» (Новосибирск. НИСИ. 1977. 72 с.), а также статье [3] отмечает: «...хрупкое разрушение стали как разрушение поликристаллического материала без предшествующих пластических деформаций теоретически возможно лишь в гипотетическом случае всестороннего однородного растяжения при главных напряжениях  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 > 0$ ». Это означает, что поясным листам и стенке хрупкое разрушение не угрожает.

Изучение природы хрупких разрушений стали [5, 6, 7] показало, что при отсутствии концентраторов напряжений в отдельных элементах балки уровень разрушающих напряжений может превышать временное сопротивление стали. При наличии же концентраторов напряжений разрушение материала возможно при условии:

– хрупкое разрушение

$$\sigma_1 = R_0 \text{ и } \tau_{\max} < R_s; \quad (8)$$

– вязкое разрушение

$$\sigma_1 < R_0 \text{ и } \tau_{\max} = R_s, \quad (9)$$

где  $R_0$  и  $R_s$  сопротивление соответственно отрыву и сдвигу.

Условие перехода от вязкого разрушения к хрупкому можно представить зависимостью

$$\frac{\tau_{\max}}{\sigma_1} = \frac{R_s}{R_0}. \quad (10)$$

Так как условие оптимального напряженного состояния предварительно напряженных балок предполагает обеспечение напряженного состояния в верхнем и нижнем поясных листах (см. рисунок 2)

$$\sigma_{fv}^s = \sigma_{fn}^s \leq R_{yv}, \quad (11)$$

$R_{yv}$  – расчетное сопротивление высокопрочной стали С440,  $R_{yv} = 43 \text{ кН/см}^2$ , а в крайней верхней зоне стенки

$$\sigma_1 = K_i \sigma_T = 0,277 \cdot R_{yv} = 0,277 \cdot 24,5 = 6,795 \text{ кН/см}^2 \ll R_{yv} = 24,5 \text{ кН/см}^2. \quad (17)$$

$$\sigma_{wv}^s \leq R_y, \quad (12)$$

не превышающего расчетных сопротивлений материала стенки, то хрупкое и вязкое разрушение материала балки в зоне упругих деформаций стали исключены.

Считаем уместным еще раз вернуться к вопросу влияния пластических деформаций, образующихся в крайней нижней зоне стенки, на возможные хрупкие разрушения стали. Так как стенка балки присоединяется к поясному листу из высокопрочной стали, в соответствии с принципом неразрывности деформации, деформации стенки будут находиться в стесненном состоянии. Налицо реализуется не сама пластическая деформация материала стенки балки, а лишь готовность материала к такой деформации. По утверждению [5, 6] величина локального предела текучести может превышать значение предела текучести при одноосном напряженном состоянии конструкции в 2...3 раза.

Значение локального предела текучести может быть определено зависимостью

$$\sigma_l = K_i \sigma_T. \quad (13)$$

Здесь  $K_i$  коэффициент жесткости напряженного состояния

$$K_i = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{(1-\alpha)^2 + (\alpha-\beta)^2 + (\beta-1)^2}}, \quad (14)$$

где  $\alpha = \sigma_1 / \sigma_2$  и  $\beta = \sigma_3 / \sigma_1$ ;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения по осям  $X, Y, Z$ ;

$\sigma_T$  – предел текучести при одноосном напряжении.

Учитывая, что стенка и поясные листы предварительно напряженной балки находятся в состоянии плоского деформирования, при котором главное напряжение  $\sigma_3 = 0$ , выражение жесткости напряженного состояния  $K_i$  преобразится к виду

$$K_i = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{(1-\alpha)^2 + \alpha^2 + 1}}. \quad (15)$$

$$\text{С учетом } \alpha = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{\sigma_{wv}^s}{0,25\sigma_{wv}^s} = 4,0$$

$$K_i = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{(1-4)^2 + 4^2 + 1}} = 0,277. \quad (16)$$

Следовательно, локальный предел текучести на основании зависимости (13):

Полученный результат подтверждает вывод об ограниченных пластических деформациях стенки в зоне максимального момента от внешних нагрузок и малой вероятности хрупких разрушений в этой области, снижающих хладостойкость применяемых сталей.

Весьма важным условием при расчете ресурса конструкции по критерию хладостойкости является выяснение факторов, в наибольшей степени способствующих развитию хрупких трещин в зонах возможных концентраторов напряжений. Исследования ЦНИИПСК им. Н. П. Мельникова, ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, Института электросварки АН Украины, Института проблем Севера АН РФ и высших учебных заведений показали, что наиболее весомым доводом в проблематике хрупкого разрушения является чувствительность стали к надразам (20,6%). Остаточные сварочные напряжения (13,5 %), старение и наклеп стали (11,1%) также являются источниками хрупкости стали. Только 6,9% отказов относятся к конструкциям из легированных сталей. Рассматриваемая совокупность отказов свидетельствует о том, что 34% из них составляют отказы листовых сварных конструкций (резервуары, газгольдеры и т.п.), 48% – решетчатые изгибаемые фермы и только лишь 19% сплошностенчатые балки. Это лишний раз подтверждает тезис о том, что для строительства зданий и сооружений в экстремальных районах Сибири и Дальнего Востока предпочтительными являются балки.

Свод правил СП 16.13330.2016 (таблица 37) выделяет характерные зоны и конструктивные решения сварных соединений, в пределах которых существует наибольшая вероятность появления хрупких разрушений. Заметим, что из многообразия конструктивных решений ребра жесткости балок являются одними из самых значимых источников появления остаточных сварочных напряжений, где возможно возникновение хрупких разрушений стали.

Способ предварительного напряжения стальных балок основан на вытяжке стенки с последующим присоединением ее к анкерному верхнему поясу. Предельное напряженное состояние балок не допускает появления в верхней зоне стенки сжимающих нормальных напряжений, превышающих расчетное сопротивление материала стенки (см. рисунок 2). Следовательно, местная устойчивость стенки будет всегда обеспечена. Именно это обстоятельство позволяет не ставить ребра жесткости в зоне максимальных нормальных напряжений и зоне их совместного действия

с касательными напряжениями. Отсутствие ребер жесткости в предварительно напряженных балках исключает вероятность появления в стенке остаточных сварочных напряжений и хрупких разрушений в материале стенки балки.

В упомянутой выше работе В.А. Кравчука «Стальные стержни предварительно напряженные без затяжек» установлено, что местная устойчивость стенки предварительно напряженной балки по сравнению со стенкой обычных балок повышается в 5 раз.

Значительное повышение местной устойчивости стенки предварительно напряженной балки позволяет проектировать ее из тонколистового металла. Тонкость стенки балки является еще одним фактором снижения вероятности появления в ней хрупких трещин, поскольку сводит к минимуму масштабный (объемный) фактор напряженного состояния.

В.А. Балдин и другие в работе «О склонности к хладоломкости строительных сталей и классификация сталей по этому признаку // Проектирование сварных конструкций». Киев: Наукова думка, 1965. 383 с.), а также еще ранее Н.Н. Давиденков [1] считают, что многоэлементность конструкции является еще одним фактором, влияющим на развитие хрупких разрушений в металле. Каждый элемент может быть источником появления концентраторов напряжений, и чем больше их, тем интегрально больше вероятность возникновения трещин. Безотказность многоэлементной конструкции может быть выражена зависимостью

$$P_c = P_1 P_2 P_3 \dots P_n \quad (18)$$

Здесь  $P_i$  вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента. Нетрудно заметить, что чем больше элементов с вероятностью безотказной работы, например 0,95, тем быстрее уменьшается суммарная вероятность безотказной работы конструкции. Выше указано, что предварительное напряжение балки посредством вытяжки стенки позволяет исключить из конструкции промежуточные ребра жесткости. Следуя требованиям СП 16.13330.2016 (п. 8.5), касающимся расстановки ребер жесткости по длине балки, в зависимости от условной гибкости стенки  $\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}}$  ( $h_w, t_w$  – высота и толщина стенки балки), исключается не менее 8 – 10 парных ребер жесткости. Учитывая, что в любой балке применяется всего 10 – 12 ребер (включая опорные), то можно утверждать, что очаги пластических дефор-

маций от остаточных сварочных напряжений в предварительно напряженной балке снижаются до 85 %.

Сравнивая конструктивные решения изгибаемых элементов, применяемых для строительства зданий и сооружений, особенно в северных районах страны, предпочтение следует отдавать предварительно напряженным балкам как более хладостойким конструкциям.

## ВЫВОДЫ

Стальная биметаллическая балка, предварительно напряженная вытяжкой стенки, обладает повышенной хладостойкостью и может применяться в каркасах промышленных зданий и сооружений, эксплуатирующихся при отрицательных температурах в диапазоне от  $-45^{\circ}\text{C}$  до  $-55^{\circ}\text{C}$ .

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Давиденков Н. Н., Витман Ф. Ф. Исследование хладостойкости стали при плоском напряженном состоянии и начальных напряжениях // Журнал технической физики. 1946. Т.16. Вып. 11. С. 1217 – 1222 с.
2. Сильвестров А. В., Горбачев В. М., Беспалов В. М. Влияние конструктивной формы на хладостойкость стальных конструкций // Промышленное строительство. № 7. С.30–32.
3. Сильвестров А. В. [и др.] Расчетная оценка прочности элементов стальных конструкций в температурном интервале квазихрупкого их разрушения // Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура. 1983. № 6. С.14 – 19.
4. Сильвестров А. В., Шахмардинов Р. М. Влияние низких температур на работу комбинированных сварных соединений с лобовыми и фланговыми швами // Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура. 1972. № 9. С. 6 – 13.
5. Wang Ziyu. Overview of low temperature cold brittleness and fracture mechanism of structural steel [J]. Science and Technology Information. 2010. 18:166.
6. Su Renquan, Wang Wanzhen. High-strength steel notched plate fracture test at low temperature [J]. Cryogenic Engineering. 2011. 5:23-26.
7. Zhang Yuling, Pan Jiyan. A review of the research on the effect of low temperature on the properties of steel and its components [J]. China Railway Science. 2003. 24(2): 89-96.
8. Ye Weijiand, Zhang Youyu. Analysis of factors affecting low temperature toughness of metals [J]. Natural Gas and Petroleum, 1997. 1:32 – 36.
9. Liu Qu, Liu Zhongming, Liu Yingxue. Engineering hazards and prevention of brittle fracture of steel structure [J]. Low Temperature Construction Technology. 1999. 1:74 – 75.
10. Ведяков И. И., Одесский П. Д. Современные отечественные стандарты и вопросы расширения применения металлических конструкций в строительстве // Вестник НИЦ «Строительство». 2019. № 3 (21). С. 42 – 53.

11. Одесский П. Д. Современные стали для строительства металлических конструкций и вопросы экономической эффективности // Сталь. 2018. № 12. С. 56 – 60.

12. Поздняков В. Д., Маркашова Л.И., Максименко А.А. [и др.] Влияние циклического нагружения на микроструктуру и хладостойкость металла 3ТВ стали 10Г2ФБ // Автоматическая сварка. 2014. № 5/10. С. 3 – 11.

13. Майстренко И. Ю., Зиннуров Т. А., Егорова И. Ю. [и др.] Оценка ресурсных показателей автодорожных мостов на основе анализа структурных изменений и накопления повреждений в конструктивных элементах // Известия КГАСУ. 2019. № 4 (50). С. 444 – 454.

14. Кочкин И. В. Влияние низких температур на геометрические параметры конструкции моста и его элементов. Эксплуатация и ремонт машин и оборудования // Механика XXI века. 2008. № 7. С. 247 – 252.

15. Хлусова Е. И., Сыч О. В., Орлов В. В. Хладостойкие стали, структура, свойства, технологии // Физика металлов и металловедение. 2021. Т. 6, № 6. С. 621 – 657.

16. Таланов О. П., Нстич С. Ю., Никитин В. Н., Денисов С. В., Ширяев О. П., Кудряков Е. А., Богач Д. И., Траино А. И., Кураш В. С. Освоение производства высокопрочной износостойкой свариваемой стали с пределом текучести более 950 Н/мм<sup>2</sup> для несущих металлоконструкций // Металлург. 2013. № 1. С. 62 – 66.

17. Сыч О. В. Научно-технологические основы создания хладостойких сталей с гарантированным пределом текучести 315-750 Мпа для Арктики. Часть 1. Принципы легирования и требования к структуре листового проката // Вопросы материаловедения. 2018. № 3 (95). С. 22 – 47.

18. Сыч О. В., Хлусова Е. И. Стали для Арктики // Neftgaz. RU. 2020. № 5. С. 50 – 55.

19. Сыч О. В., Хлусова Е. И., Пазилова У. А., Яшина Е. А. Структура и свойства зоны термического влияния низколегированных хладостойких сталей для арктического применения // Вопросы материаловедения. 2018. № 2 (49). С. 30 – 51.

20. Горицкий В. М., Шнейдеров Г. Р. О необходимости учета анизотропии ударной вязкости в инженерной практике // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 10. С. 39 – 47.

21. Желкашиев С. А. Влияние примесей на прочность стали // Наука. Техника. Технологии (Политехнический вестник). 2022. № 4. С. 102 – 104.

22. Горицкий В. М., Шнейдеров Г. Р. Характеристики сопротивления хрупкому разрушению атмосферостойкой стали 14ХГНДЦ // Деформация и разрушение материалов. 2020. № 9. С. 35 – 38.

## REFERENCES

1. Davidenkov N. N., Vitman F. F. Issledovaniye khladostoykosti stali pri ploskom ostrom sostoyanii i nachal'nykh napryazheniyakh [Investigation of the cold resistance of steel under plane stress and initial stresses]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 1946; T.16. Vyp. 11:1217 – 1222 s chert. (in Russ.)

2. Sil'vestrov A.V., Gorbachev V. M., Bespalov V. M. Izmeneniye konstruktivnoy formy na khladostoykost' stal'nykh konstruksiy [Influence of the constructive form on the cold resistance of steel structures]. *Promyshlennoye stroitel'stvo*. 1975;7: 30 – 32. (in Russ.)
3. Sil'vestrov A.V., i dr. Raschetnaya otsenka prochnosti elementov stal'nykh konstruksiy v temperaturnom intervale kvazirazrushayushchego ikh razrusheniya [Calculation assessment of the strength of steel structure elements in the temperature range of their quasi-brittle fracture]. *Izv.vuzov. ser. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 1983; 6: 14 – 19. (in Russ.)
4. Sil'vestrov A. V., Shakhmardinov R. M. Vliyaniye temperatury na rabotu kombinirovannykh svarnykh soyedineniy s lobovymi i flangovymi shvami [Influence of low temperatures on the operation of combined welded joints with frontal and flank seams]. *Izv. vuzov. ser. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 1972; 9: 6 – 13. (in Russ.)
5. Wang Ziyu. Overview of low temperature cold brittleness and fracture mechanism of structural steel [J]. *Science and Technology Information*. 2010, 18:166.
6. Su Renquan, Wang Wanzhen. High-strength steel notched plate fracture test at low temperature [J]. *Cryogenic Engineering*. 2011; 5:23 – 26.
7. Zhang Yuling, Pan Jiyan. A review of the research on the effect of low temperature on the properties of steel and its components [J]. *China Railway Science*. 2003; 24(2): 89 – 96.
8. Ye Weijiand, Zhang Youyu. Analysis of factors affecting low temperature toughness of metals [J]. *Natural Gas and Petroleum*. 1997, 1:32 – 36.
9. Liu Qu, Liu Zhongming, Liu Yingxue. Engineering hazards and prevention of brittle fracture of steel structure [J]. *Low Temperature Construction Technology*. 1999; 1:74 – 75.
10. Vedyakov I. I., Odesskiy P. D. Sovremennyye otechestvennyye standarty i voprosy primeneniya metallicheskih konstruksiy v stroitel'stve [Modern domestic standards and issues of expanding the use of metal structures in construction]. *Vestnik NITS «Stroitel'stvo»*. 2019;3(21): 42 – 53. (in Russ.)
11. Odesskiy P. D. Sovremennyye dlya stroitel'stva metallicheskih konstruksiy i voprosy ekonomicheskoy effektivnosti [Modern steels for the construction of metal structures and issues of economic efficiency]. *Stal'*. 2018;12: 56 – 60. (in Russ.)
12. Pozdnyakov V. D., Markashova L. I., Maksimenko A. A. i dr. Primneniye tsiklicheskogo nagruzheniya na mikrostrukturu i khladostoykost' metalla ZTV stali 10G2FB [Influence of cyclic loading on the microstructure and cold resistance of the HAZ metal of steel 10G2FB]. *Avtomaticheskaya svarka*. 2014; 5/10: 3 – 11. (in Russ.)
13. Maystrenko I. YU., Zinnurov T. A., Yegorova I. YU., i dr. Otsenka resursnykh pokazateley avtodorozhnykh mostov na osnove analiza strukturnykh izmeneniy i nakopleniya povrezhdeniy v konstruktivnykh elementakh [Assessment of resource indicators of road bridges based on the analysis of structural changes and damage accumulation in structural elements]. *Izvestiya KGASU*. 2019; 4 (50): 444 – 454 (in Russ.)
14. Kochkin I.V. V zavisimosti ot temperatury i geometricheskikh parametrov konstruksii mosta i yego elementov. Ekspluatatsiya i remont mashin i oborudovaniya [Influence of low temperatures on the geometric parameters of the construction of the bridge and its elements. Operation and repair of machines and equipment]. *Mekhaniki XXI veku*. 2008; 7: 247 – 252. (in Russ.)
15. Maystrenko I. YU., Zinnurov T.A., Yegorova I.YU., i dr. Otsenka resursnykh pokazateley avtodorozhnykh mostov na osnove analiza strukturnykh izmeneniy i nakopleniya povrezhdeniy v konstruktivnykh elementakh [Estimation of resource indicators of road bridges based on the analysis of structural changes and damage accumulation in structural elements]. *Izvestiya KGASU*. 2019; 4 (50): 444 – 454. (in Russ.)
16. Talanov O. P., Nastich S. YU., Nikitin V. N., Denisov S. V., Shiryayev O. P., Kudryakov Ye. A., Bogach D. I., Trayno A. I., Kurash V. S. Osvoeniye proizvodstva vysokoprochnoy iznosostoykoy svarivayemoy stali s predelom tekuchesti boleye 950 N/mm<sup>2</sup> dlya nesushchikh metallokonstruksiy [Mastering the production of high-strength wear-resistant welded steel with a yield strength of more than 950 N/mm<sup>2</sup> for load-bearing metal structures]. *Metallurg*. 2013; 1: 62 – 66. (in Russ.)
17. Sych O. V. Nauchno-tehnologicheskkiye osnovy sozdaniya khladostoykikh staley s garantirovannym predelom tekuchesti 315-750 Mpa dlya Arktiki. Chast' 1. Printsipy legirovaniya i trebuvaniya k osobomu listovomu prokatu [Scientific and technological foundations for the creation of cold-resistant steels with a guaranteed yield strength of 315-750 MPa for the Arctic. Part 1. Principles of alloying and requirements for the structure of rolled products]. *Vopr. materialovedeniya*. 2018; 3 (95): 22 – 47. (in Russ.)
18. Sych O. V., Khlusova Ye. I. Stali dlya Arktiki [Steel for the Arctic]. *Neftegaz. RU*. 2020; 5: 50 – 55. (in Russ.)
19. Sych O. V., Khlusova Ye. I., Pazilova U. A., Yashina Ye. A. Struktura i svoystva zony termicheskogo issledovaniya nizkolegirovannykh khladostoykikh staley dlya arkticheskikh [Structure and properties of the heat-affected zone of low-alloy cold-resistant steels for arctic applications]. *Vopr. materialovedeniya*. 2018; 2 (49) 30 – 51. (in Russ.)
20. Goritsky V. M. Shneiderov G. R. O neobkhodimosti ucheta anizotropii udarnoy vyazkosti v inzhenernoy praktike [On the need to take into account the impact strength anisotropy in engineering practice]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2020; 10: 39 – 47. (in Russ.)
21. Zhelkashiev S. A. Vliyaniye primesey na prochnost' stali [Influence of impurities on the strength of steel]. *Nauka. Tehnika. Tehnologii (Politehnicheskij vestnik)*. 2022; No. 4: 102 – 104. (in Russ.)
22. Goritsky V. M. Shneiderov G. R. Kharakteristiki soprotivleniya khрупkosti atmosferostoykoy stali 14KHNDTS [Characteristics of resistance to brittle fracture of weather-resistant steel 14KhGNDTS]. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2020; No. 9: 35 – 38. (in Russ.)

### ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Кравчук Е. В. Руководство темой исследования. Формирование целей и задач исследования. Анализ состояния вопроса. Подготовка материала для статьи.*

*Белуцкий И. Ю. Консультирование по вопросам применения стальной балки, предварительно напряженной вытяжкой стенки, в экстремальных условиях мостостроения. Анализ состояния вопроса. Подготовка материала для статьи.*

*Кравчук В. А. Сбор библиографической информации. Оформление статьи.*

### COAUTHORS' CONTRIBUTIONS

*Evgenii V. Kravchuk. Management of the research topic. Formation of study goals and objectives. Analysis of the issue. Preparation of the material for the article.*

*Igor. Yu. Belutskii Advising on the use of a steel beam, prestressed by wall drawing, in extreme conditions of bridge construction. Analysis of the issue. Preparation of the material for the article.*

*Valerii A. Kravchuk. Accumulating of bibliographic information. Article layout.*

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Кравчук Евгений Валерьевич – ст. преподаватель кафедры «Строительство»; ст. преподаватель кафедры «Промышленное и гражданское строительство», SPIN-код: 2325-0177.*

*Белуцкий Игорь Юрьевич – доц., проф. кафедры «Автомобильные дороги», SPIN-код: 4125-7182.*

*Кравчук Валерий Андреевич – проф., проф. кафедры «Промышленное и гражданское строительство», SPIN-код: 3004-5213.*

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Evgeny V. Kravchuk – Senior Lecturer, Construction Department ; Senior Lecturer, Industrial and Civil Engineering Department, SPIN: 2325-0177.*

*Igor Yu. Belutskii – Associate Professor, Professor of the Roads Department , SPIN-code: 4125-7182*

*Valery A. Kravchuk – Professor, Professor of the Industrial and Civil Engineering Department, SPIN-code: 3004-5213.*

Научная статья  
УДК 691.33  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-500-513>  
EDN: OALHEO



## ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИЕ ГАЗОБЕТОНЫ НА ОСНОВЕ ЗОЛЫ-УНОСА КИТАЯ

Сяо Вэньсюй

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова,  
г. Белгород, Россия  
[xiao@yandex.ru](mailto:xiao@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2581-1876>

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Разработка газобетонов с повышенным содержанием открытых пор, с применением полиминеральных вяжущих со сниженной цементоемкостью и значительной утилизацией местных техногенных ресурсов (в частности обогащенных отходов предприятий теплоэнергетики) актуальна для современной строительной индустрии. Для систематизации современных методов изучения характеристик звукоизоляции и звукозащиты зданий необходимо учитывать многообразие международных строительных норм. Целью работы является освоение научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение эффективных газобетонов на основе золы-уноса Китая с улучшенными звукопоглощающими характеристиками.

**Материалы и методы.** В данной работе использована методологическая основа, которая предусматривает всестороннее использование фундаментальных подходов в строительном материаловедении. Для разработки композиционных материалов заданного качества на нано-, микро- и макроуровнях было применено комплексное проектирование. Физико-механические свойства сырья и требуемые характеристики разработанных материалов изучались с использованием физико-химических методов анализа, включая лазерную гранулометрию, рентгенофазовый анализ, электронную сканирующую микроскопию, термические методы и т.д. Экспериментальные исследования проведены в лабораториях БГТУ им. В.Г. Шухова, а также китайских университетах.

**Заключение.** В данной работе были сформулированы научные подходы для проектирования и синтеза газобетонов с улучшенными акустическими характеристиками в различных регионах страны, с учетом местного сырья. Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение ассортимента легких материалов для ограждающих конструкций с целью обеспечения безопасной среды обитания человека. Это может быть достигнуто путем синтеза многокомпонентных композиционных вяжущих, которые влияют на формирование нано-, микро- и макроструктуры материалов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** строительство, материаловедение, сооружение, изоляция, шум, композит, уровень звука, человек, газобетон, ячеистый бетон

Статья поступила в редакцию 28.06.2023; одобрена после рецензирования 28.08.2023; принята к публикации 30.08.2023.

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: Сяо Вэньсюй. Звукопоглощающие газобетоны на основе золы-уноса Китая // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 4 (92). С. 500-513. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-500-513>

© Вэньсюй С., 2023



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-500-513>  
EDN: OALHEO

## SOUND-ABSORBING AERATED CONCRETE BASED ON CHINA FLY ASH

**Xiao Wenxu**

V. G. Shukhov Belgorod State Technological Universit,  
Russia, Belgorod  
[xiao@yandex.ru](mailto:xiao@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2581-1876>

### ABSTRACT

**Introduction.** The development of aerated concrete with a high content of open pores, using polymineral binders with reduced cement content and significant utilization of local technogenic resources (in particular, enriched waste from thermal power plants) is relevant for the modern construction industry. To systematize modern methods for studying the characteristics of sound insulation and sound protection of buildings, it is necessary to take into account the diversity of international building codes. The aim of the work is to develop a scientifically based technological solution that provides effective aerated concrete based on fly ash from China with improved sound-absorbing characteristics.

**Main part.** In this paper, a methodological basis, which provides for the comprehensive use of fundamental approaches in building materials science, was used. Integrated design to develop composite materials of a given quality at the nano-, micro- and macrolevels was used. The physical and mechanical properties of raw materials and the required characteristics of the developed materials using physicochemical methods of analysis, including laser granulometry, X-ray phase analysis, scanning electron microscopy, thermal methods, etc were studied. The experimental studies in the laboratories of V.G. Shukhov BSTU, as well as Chinese universities were carried out.

**Conclusions.** In this work, scientific approaches for the design and synthesis of aerated concrete with improved acoustic characteristics in various regions of the country, taking into account local raw materials were formulated. Further research can be aimed at expanding the range of lightweight materials for building envelopes in order to ensure a safe human environment. This can be achieved by synthesizing multicomponent composite binders that affect the formation of nano-, micro- and macrostructures of materials.

**KEYWORDS:** construction, materials science, structure, insulation, noise, composite, sound level, man, aerated concrete, cellular concrete

**The article was submitted 28.06.2023; approved after reviewing 28.08.2023; accepted for publication 30.08.2023.**

**The authors have read and approved the final manuscript.**

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

*For citation.* Xiao Wenxu Sound-absorbing aerated concrete based on China fly ash. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2023; 20 (4): 500-513. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-500-513>

© Wenxu X., 2023



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

## ВВЕДЕНИЕ

В результате проведенного теоретического обзора было выявлено, что на людей влияет комплекс акустических воздействий различных спектров [1, 2, 3, 4, 5]. Из этого следует, что актуальной задачей является проектирование композитов с заданной пористой структурой, способных эффективно поглощать акустическую энергию в различных диапазонах [6, 7, 8, 9, 10]. Для достижения этой цели необходимо контролировать формирование макро-, микро- и наноструктуры строительных материалов [11, 12, 13, 14, 15]. Важной особенностью звукопоглощающих материалов являются открытые поры, в которых звуковая энергия преобразуется в тепловую [16, 17, 18, 19, 20]. Однако материалы с открытой пористостью имеют высокую степень насыщения водой, что может негативно сказываться на эксплуатационных характеристиках их морозостойкости и долговечности. В связи с этим необходимо разработать высокопористые материалы, которые бы обладали нормативной прочностью и долговечностью [21, 22, 23, 24, 25]. Одним из таких материалов могут быть ячеистые бетоны, которые при экономии цемента могут использоваться для строительства несущих и ограждающих конструкций с тепло- и звукоизоляционными свойствами. Особенно перспективными являются малоэнергоемкие газобетоны, которые могут быть произведены как в автоклавных, так и в неавтоклавных условиях. Исходя из этого в статье выдвинута гипотеза о возможности разработки звукопоглощающих газобетонов путем контролируемого формирования макро-, микро- и наноструктуры с использованием полиминеральных систем и достижения значений открытой пористости более 40%.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве компонентов композиционного вяжущего (КВ) применялись доступные материалы Китая: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (завод Хэбэй) и зола-уноса Хэбэйской ТЭЦ. В качестве заполнителей звукопоглощающих бетонов использовался пористый вспученный перлит и кварцевый песок с модулем крупности 1,7.

Математическое планирование экспериментов и определение порядка рандомизации проводилось с использованием статистического программного обеспечения Design-Expert с применением методологии Тагучи. Оценка адекватности моделей была рассмотрена с помощью дисперсионного анализа (ANOVA). Качество выполнения работы подтверждается

использованием соответствующей нормативной документации на применяемые сырьевые ресурсы и методы исследований, а также учетом необходимого количества исследуемых образцов и повторных испытаний.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА

Применялась упрощенная модель пористой среды, предложенная Д. Маа [11], которая представляет собой многослойную перфорированную панель с воздушными прослойками между слоями. Эта модель была выбрана для моделирования звукопоглощения разработанного бетона из-за своей простоты, а также предположения однородной формы и диаметра воздушных полостей. С использованием электроакустической аналогии сопротивлений на основе этой модели можно вычислить коэффициент звукопоглощения  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{4R/\rho_0 c_0}{(1+R/\rho_0 c_0)^2 + (M/\rho_0 c_0)^2}, \quad (1)$$

здесь  $R$  и  $M$  выполняют роль действительных и мнимых элементов уравнения соответственно,  $\rho_0$  – плотность воздуха, а  $c_0$  – скорость звука в воздушной среде.

В теоретической модели указывается, что коэффициент звукопоглощения зависит от различных параметров, таких как радиус межпоровых промежутков, параметр формы заполнителей и целевая открытая пористость. Однако эта модель не учитывает влияние пористого заполнителя, который добавляется в состав бетона для поглощения звуковых волн, на коэффициент звукопоглощения. Поэтому одной из задач является усовершенствование расчетной формулы звукопоглощения ячеистых бетонов с учетом пористого заполнителя на основе экспериментальных результатов.

С учётом вышеизложенного разработана широкая номенклатура составов композиционных вяжущих, полученных совместным помолом портландцемента и золы-уноса в разных пропорциях в вихревой мельнице. Определено оптимальное содержание золы-уноса в составах композиционных вяжущих – 30–40%, и оптимальная удельная поверхность композиционных вяжущих – 500 м<sup>2</sup>/кг (таблица 1). Такая удельная поверхность достигается при пропуске композиционного вяжущего через вихревую установку один раз. Это позволяет минимизировать энергоёмкость производства КВ с достижением максимальной эффективности.

Таблица 1  
Запроектированные газобетонные смеси  
Источник: составлено автором.

Table 1  
Designed aerated concrete mixes  
Source: compiled by the authors.

Компоненты, кг/м <sup>3</sup>	Номер состава												
	Изоляционные композиты				Конструкционно- изоляционные композиты				Конструкционные композиты				Контр.
	1Н	2А	3Н	4А	5Н	6А	7Н	8А	9Н	10А	11Н	12А	
Портландцемент	175	175	150	150	224	224	192	192	280	280	240	240	175
Зола-уноса	75	75	100	100	96	96	128	128	120	120	160	160	-
Вода	100	100	112,5	112,5	128	128	144	144	150	150	180	180	98
Алюминиевая пудра	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Каустическая сода	0,4	0,4	0,34	0,34	0,52	0,52	0,44	0,44	0,65	0,65	0,57	0,57	0,4
Суперпластификатор	1,1	1,1	1,1	1,1	1,5	1,5	1,5	1,5	2	2	2	2	-
Гидрофобизатор	0,25	0,25	0,25	0,25	0,32	0,32	0,32	0,32	0,4	0,4	0,4	0,4	-
Вспученный перлит	35	35	35	35	20	20	20	20	-	-	-	-	-
Кварцевый песок	-	-	-	-	180	180	180	180	335	335	335	335	120
Полипропиленовая фибра	-	-	12	12	-	-	12	12	-	-	12	12	-
В/Т	0,4	0,4	0,45	0,45	0,4	0,4	0,45	0,45	0,4	0,4	0,45	0,45	0,56

Помимо того что все составы были рассчитаны с сохранением условий равноподвижности, также исследованы реологические свойства, доказывающие, что все запроектированные составы характеризуются набором свойств, дающих возможность обеспечивать удовлетворительную транспортировку газобетонной смеси к месту формирования.

Данные таблицы 2 показывают обратное соотношение между прочностью на сжатие и процентом общей пористости затвердевших газобетонных образцов.

Установлен характер влияния составов на плотность и пористость материалов. Лучший показатель по открытой пористости (49,9 и 45,6%) у газобетонных неавтоклавных композитов 1Н и 3Н (с соответствующей плотностью 314 кг/м<sup>3</sup> и 329 кг/м<sup>3</sup>), у которых композиционное вяжущее включает в себя цемент и

золу-уноса. Неавтоклавные конструкционно-изоляционные композиты также показывают высокую открытую пористость (37,8 и 39,8%) относительно других образцов при плотностях в пределах 600 кг/м<sup>3</sup>. Конструкционные композиты имеют относительно высокую плотность, но при этом также обладают высокой открытой пористостью. Например, газобетонный образец 11Н имеет открытую пористость в размере 36,9%, несмотря на его высокую плотность (более 800 кг/м<sup>3</sup>). Добавление полипропиленовой фибры в бетон является эффективным способом повышения прочностных характеристик с незначительным влиянием на пористость. Однако замена перлита на кварцевый песок может увеличить прочность на сжатие, но при этом также снизить открытую пористость из-за лучшей упаковки частиц. Это может негативно сказываться на звукопоглощении.

Таблица 2  
Зависимость между физико-механическими свойствами  
и пористостью газобетонов на 28 сут  
Источник: составлено автором.

Table 2  
Dependence between physical and mechanical properties and porosity of aerated concrete for 28 days  
Source: compiled by the authors.

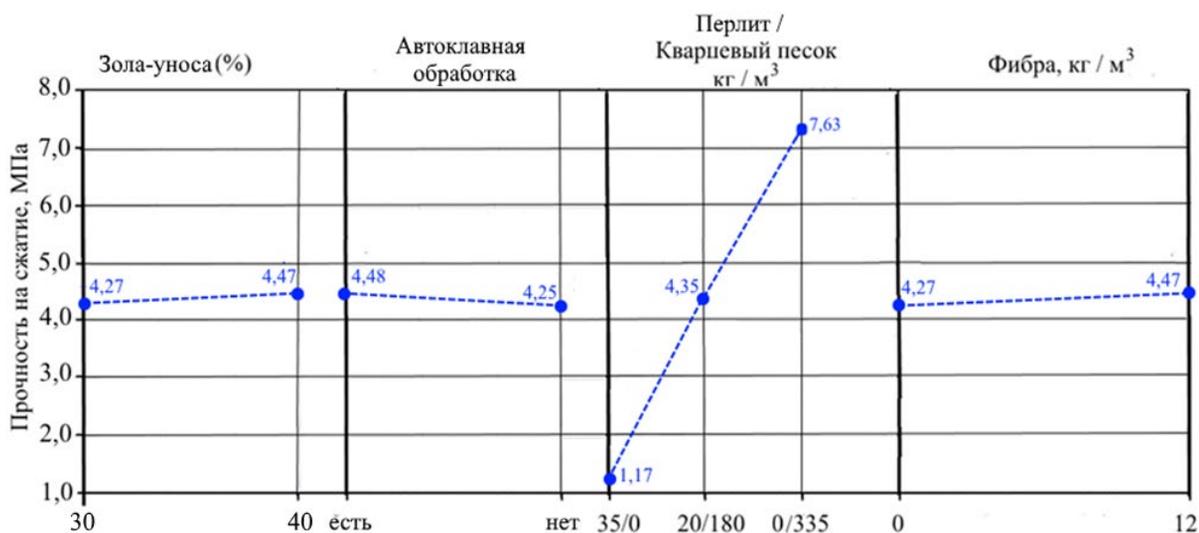
Состав	$R_{сж}$ , МПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Общая пористость, %	Открытая пористость, %	Закрытая пористость, %
1Н	1,0	314	84,2	49,9	34,3
2А	1,5	333	79,1	38,1	41,0
3Н	1,3	329	86,1	45,6	40,5
4А	1,6	340	79,8	39,9	39,9
контр.	1,0	319	59,8	30,7	29,1
5Н	3,9	579	69,8	39,8	30,0
6А	5,0	601	70,0	31,4	38,6
7Н	5,1	599	69,7	37,8	31,9
8А	5,9	622	70,7	34,6	36,1
9Н	7,5	814	63,6	34,1	29,5
10А	8,6	831	63,9	27,7	36,2
11Н	7,7	835	65,4	36,9	28,5
12А	9,1	852	63,3	29,2	34,1

Методология Тагучи показала, что параметр «соотношение заполнителя» имеет наибольшее влияние на прочность на сжатие и открытую пористость композита (рисунок 1). Увеличение содержания вспученного перлита приводит к увеличению открытой пористости, в то время как повышение содержания кварцевого песка способствует упрочнению ячеистого бетона.

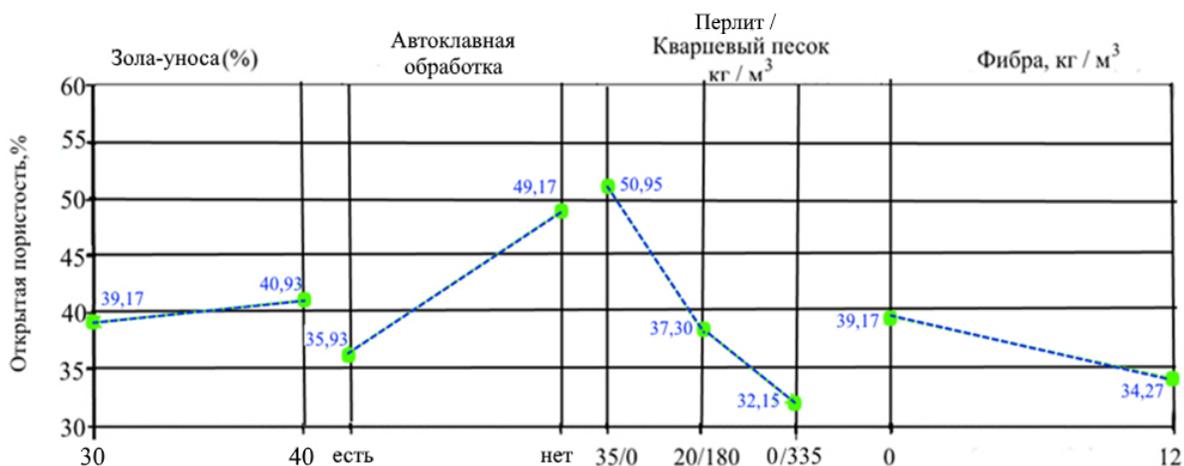
Увеличение количества золошлаковой смеси оказывает незначительное влияние на оба

исследуемых параметра. Присутствие фибры повышает прочность на сжатие в среднем на 0,2 МПа, но снижает открытую пористость почти на 5%.

Микроструктурный анализ газобетонов показал, что пористость образцов представлена двумя типоразмерами пор. Первый тип – это воздушные ячейки с размерами около 1 мм. Второй тип – это первичные газовые поры (размер 0,1–0,4 мм) (рисунок 2).



а



б

Рисунок 1 – Влияние компонентов на прочность на сжатие (а) и характеристики пористости (б)  
 Источник: составлено автором.

Figure 1 – Dynamics of development of compressive strength (a) and open porosity (b), based on the influence of composition parameters  
 Source: compiled by the authors.

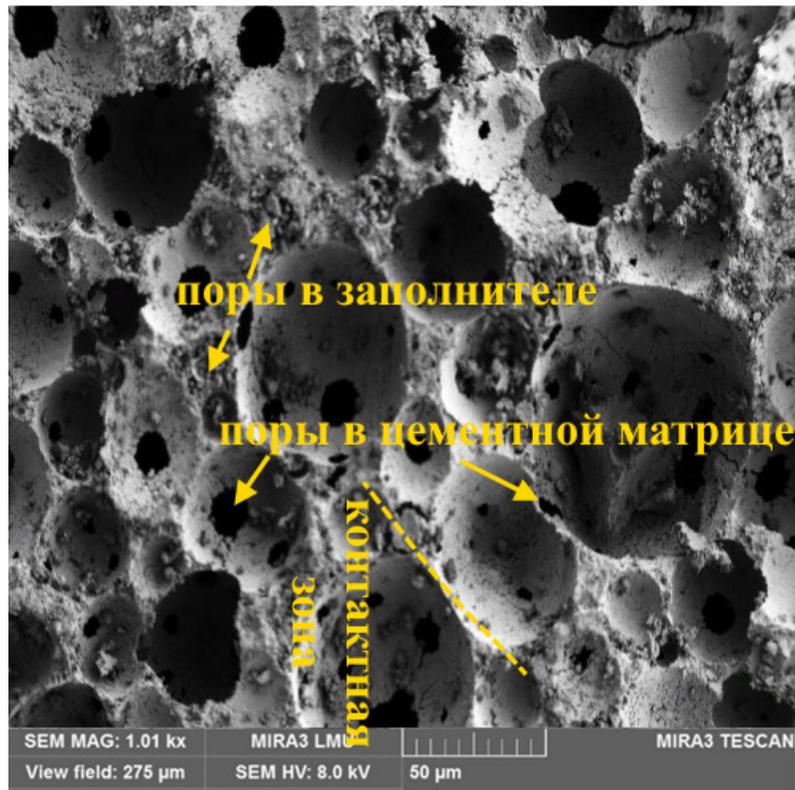


Рисунок 2 – Микроструктура новообразований в газобетонах (28 сут)  
 Источник: составлено автором

Figure 2 – Microstructure of new growths in aerated concrete (28 days)  
 Source: compiled by the authors.

Упрочнение цементного композита подтверждается результатами дифференциально-термического анализа образца газобетона (рис. 3).

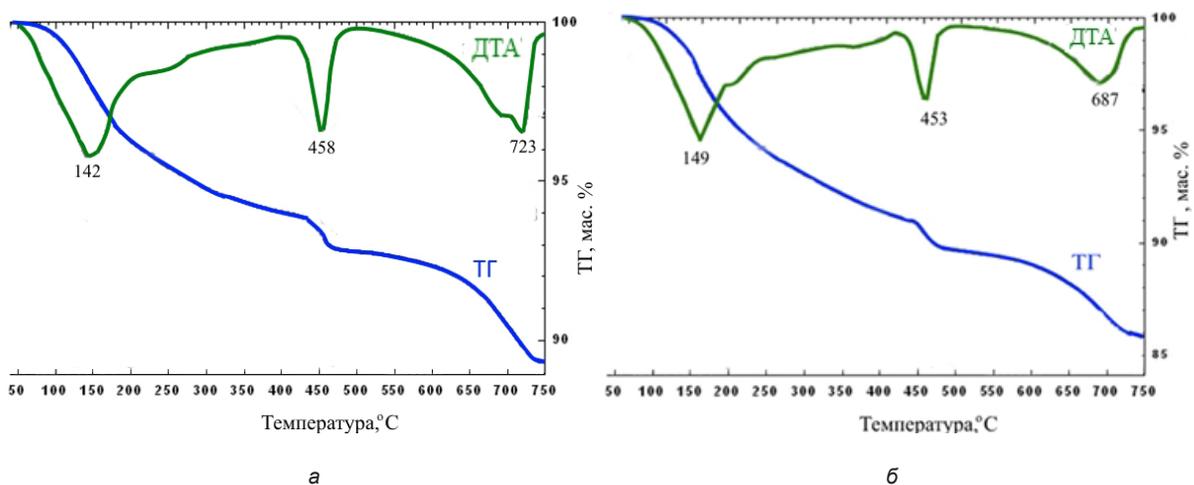


Рисунок 3 – ДТА и ТГ для газобетона в возрасте 3 (а) и 28 (б) сут  
 Источник: составлено автором.

Figure 3 – DTA and TG results for aerated concrete sample on days 3 (a) and 28 (b)  
 Source: compiled by the authors.

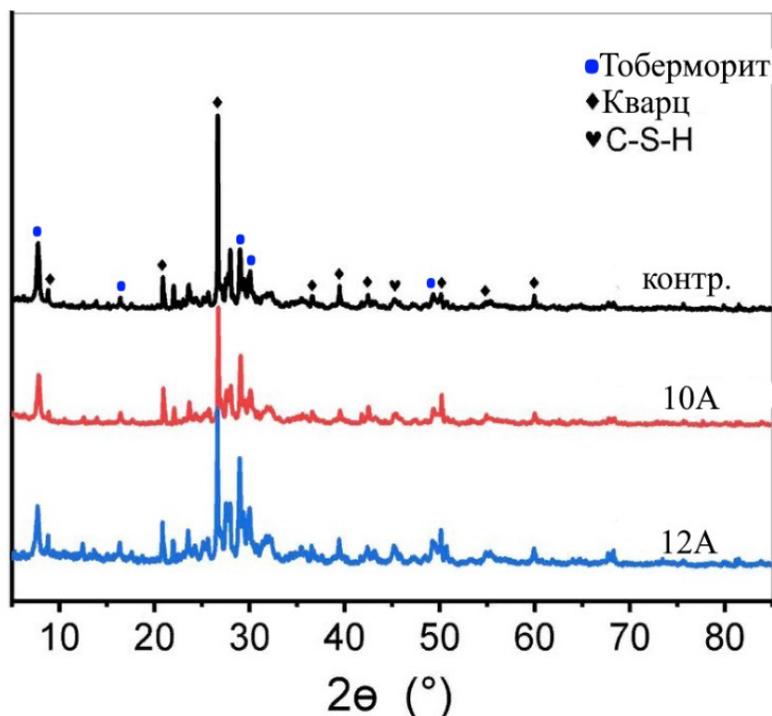


Рисунок 4 – Результаты РФА автоклавных и неавтоклавных образцов  
Источник: составлено автором.

Figure 4 – RFA results for autoclaved and non-autoclaved samples  
Source: compiled by the authors.

Из представленного описания можно сделать следующие выводы:

- При исследовании 28-суточного образца ячеистого бетона также наблюдается потеря воды на всех этапах с наибольшей интенсивностью при температурах от 70 до 190°C. После 200°C тоже происходит снижение количества удаленной воды.

- Наблюдается слабый эндотермический пик при температурах 320–410°C, который связан с дегидратацией слабо кристаллизованного бемита  $AlO(OH)$  или других продуктов декомпозиции гидратов, таких как  $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$ .

- Несмотря на увеличенную пористость (выше 86%) осуществляется управляемое структурообразование жесткой матрицы, что ведет к упрочнению композита.

Эти результаты указывают на возможность улучшения механических свойств ячеистых бетонов даже при высокой пористости, путем контролируемого формирования структуры матрицы.

Рентгенограммы (рисунок 4) подтверждают следующие факты:

- Наличие диффузной полосы в спектре исходных материалов в диапазоне 22–38° свидетельствует о присутствии алюмосиликатных частиц с стеклообразной природой.

- Появление полосы в диапазоне 17–38° указывает на образование гелей C-S-H (гидратов кальция-кремниевых гидросиликатов).

- Наблюдаемое исчезновение алита и гипса, а также появление гелей C-S-H, связано с реакцией гидратации клинкерных минералов в присутствии золы-уноса.

Эти результаты свидетельствуют о процессе гидратации и образования структуры композита с участием гелей C-S-H, что подтверждает управляемое структурообразование жесткой матрицы и упрочнение ячеистого бетона.

Проведенный комплекс исследований позволил выявить оптимальный состав ячеистого бетона, который образует структуру с открытой пористостью выше 40%. Это значительно способствует увеличению звукопоглощения материала. Благодаря такой структуре ячеистый бетон может эффективно поглощать звуковые волны и снижать уровень шума в помещениях, где он используется.

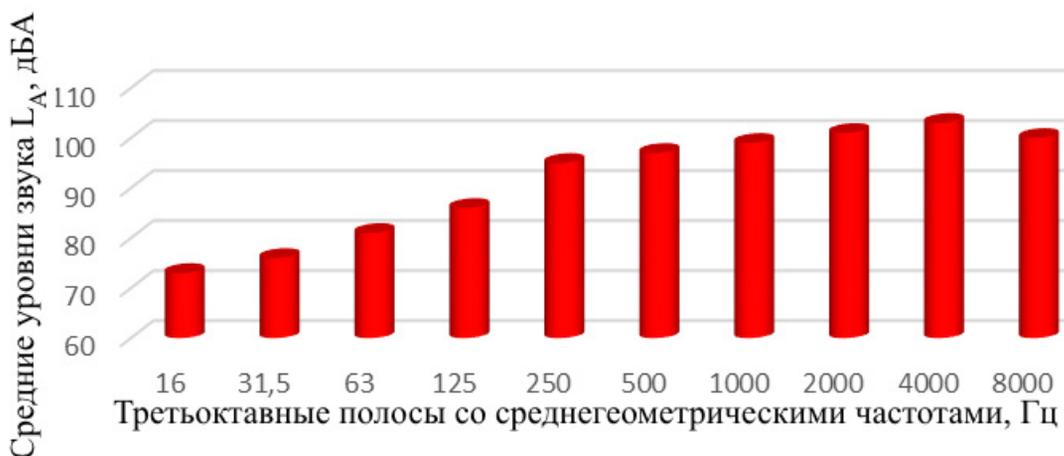


Рисунок 5 – Влияние звуковых частот на средние уровни звука в камере без звукопоглощающего образца  $L_A$   
 Источник: составлено автором.

Figure 5 – Impact of average sound levels on frequencies in the chamber without sound-absorbing sample  $L_A$   
 Source: compiled by the authors.

Таблица 3  
**Влияние звуковых частот на средние уровни звука в камере со звукопоглощающим образцом  $L_{3и}$**   
 Источник: составлено автором.

Table 3  
**Impact of average sound levels on frequencies in a chamber with a sound-absorbing sample  $L_{3и}$**   
 Source: compiled by the authors.

Состав	$L_{3и}$ , дБА, в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									
	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1Н	71	76	75	75	71	24	45	35	31	35
2А	71	73	75	75	75	28	79	39	35	39
3Н	71	72	74	72	68	21	42	32	38	32
4А	71	73	75	73	69	22	43	33	29	33
контр.	71	72	73	71	67	40	61	53	53	53
5Н	66	66	68	70	66	40	62	52	54	52
6А	64	65	66	68	64	36	57	46	47	46
7Н	65	65	67	69	65	36	58	48	49	48
8А	64	64	66	67	63	54	66	56	64	56
9Н	63	63	66	66	62	53	65	55	57	55
10А	62	62	64	64	60	51	63	53	62	53
11Н	63	63	65	65	61	52	64	54	61	54
12А	71	72	73	71	67	40	59	51	51	50

**ЗВУКОЗАЩИТНЫЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОБЕТОНОВ**

Измерения средних уровней звука в камере БЖ-2М позволили получить их зависимости от среднегеометрических частот. Эти данные представлены на рисунке 5 и в таблице 3.

На основе данных, представленных на рисунке 5 и в таблице 4, были рассчитаны коэффициенты звукопоглощения  $\alpha$  в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами 16–8000 Гц. Результаты этих расчетов отображены на рисунке 6.

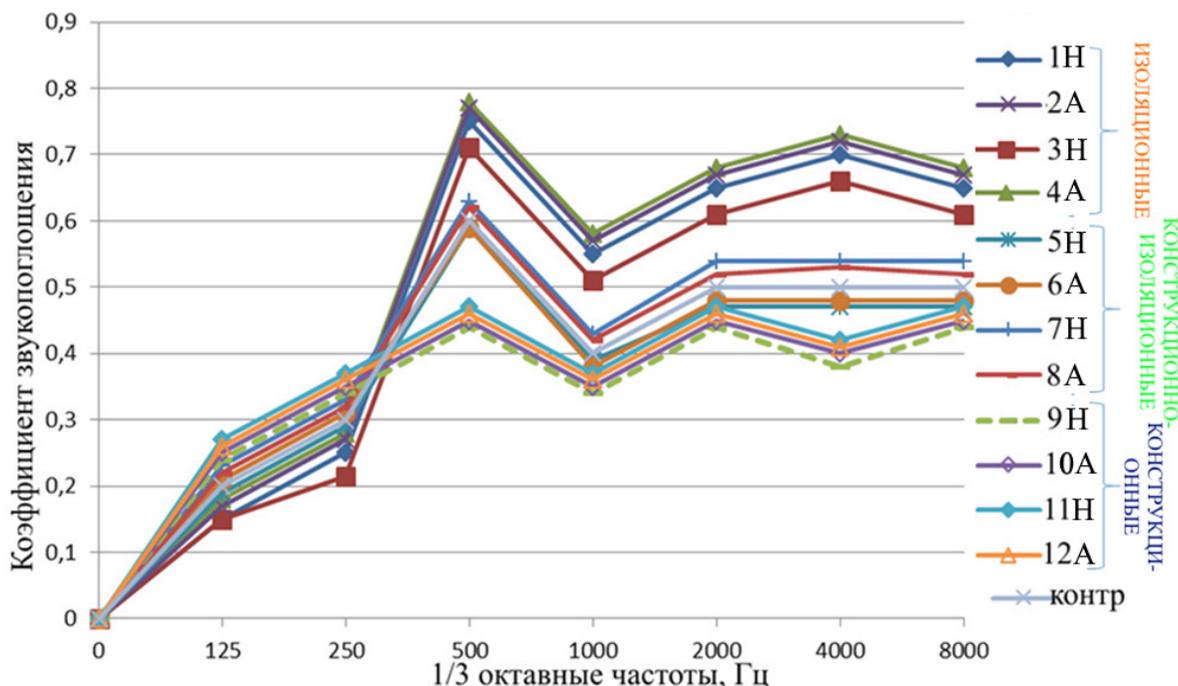


Рисунок 6 – Зависимость коэффициентов звукопоглощения разработанных составов от частот  
Источник: составлено автором.

Figure 6 – Dependence of sound absorption coefficients on frequencies  
Source: compiled by the authors.

На рисунке 6 показаны графики коэффициентов звукопоглощения  $\alpha$  в третьоктавных полосах с различными среднегеометрическими частотами от 16 до 8000 Гц. Графики позволяют оценить эффективность звукопоглощающего материала в разных частотных диапазонах. Эти данные могут быть использованы для выбора и оценки эффективности звукопоглощающего материала в конкретных условиях и для принятия решений по звукоизоляции и созданию комфортных акустических условий в помещении.

Коэффициент снижения уровня шума (NRC) и средний коэффициент звукопоглощения (SAA) – это усредненные показатели, которые используются для одночисловой оценки звукопоглощающих свойств материалов. Они позволяют сравнить различные материалы и определить их эффективность в поглощении звука.

NRC выражается в процентах и представляет собой среднюю величину звукопоглощения для частот диапазона 250 Гц, 500 Гц, 1000

Гц и 2000 Гц. Чем выше значение NRC, тем лучше материал поглощает звук.

SAA также выражается в процентах и представляет собой среднюю величину звукопоглощения для частот диапазона 125 Гц, 250 Гц, 500 Гц, 1000 Гц и 2000 Гц. SAA обычно используется для оценки звукопоглощающих свойств материалов с различной плотностью и толщиной.

Выбор между NRC и SAA зависит от требований и стандартов, принятых в вашей стране или отрасли. Рекомендуется обратиться к соответствующим нормам и стандартам для получения более подробной информации о том, как правильно оценивать и сравнивать звукопоглощающие свойства материалов (рисунок 7).

Действительно, звукопоглощающие характеристики материалов могут быть значительно улучшены путем снижения их плотности и увеличения открытой пористости. Это связано с тем, что звуковые волны имеют тенденцию проникать в поры материала и поглощаться внутри них.

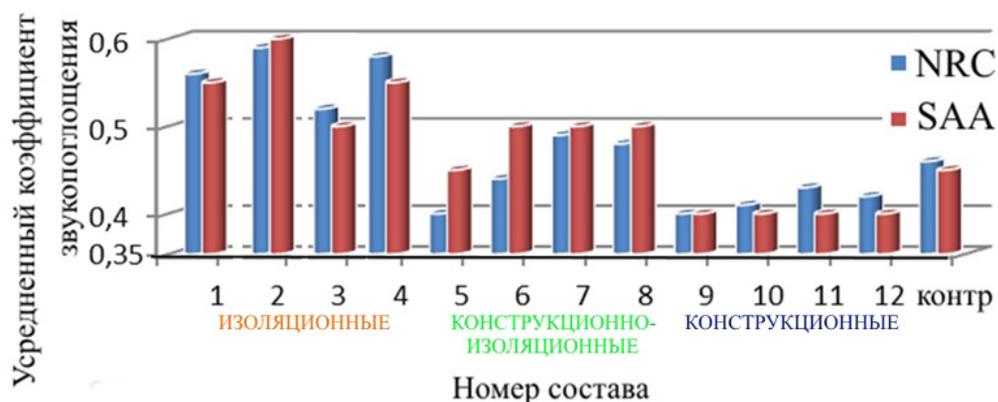


Рисунок 7 – Одночисловые характеристики акустического поглощения разработанных композитов  
Источник: составлено автором.

Figure 7 – One-number acoustic absorption characteristics of the developed composites  
Source: compiled by the authors.

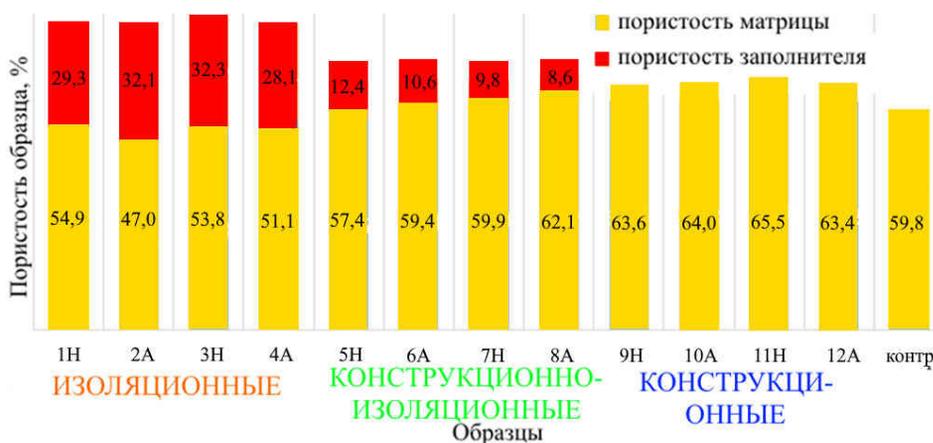


Рисунок 8 – Пористость разработанных образцов  
Источник: составлено автором.

Figure 8 – Porosity of the developed samples  
Source: compiled by the authors.

Структура пор материала играет важную роль в его звукопоглощающих свойствах. Более открытая и связанная структура пор способствует лучшему поглощению звука. При наличии открытых пор звуковые волны могут проникать в них, где они и поглощаются, в то время как плотный материал может отражать звуковые волны обратно в окружающую среду.

Разработка бетонов с оптимальной структурой пор позволяет достичь высоких звукопоглощающих характеристик. Это может быть достигнуто путем использования специальных добавок или изменения состава бетона, чтобы создать более открытые и связанные поры.

Однако следует отметить, что звукопоглощающие свойства материалов также зависят от других факторов, таких как толщина и площадь поверхности материала, акустическая

среда и частота звука. Поэтому при разработке звукопоглощающих материалов необходимо учитывать все эти факторы для достижения оптимальных результатов. Повышение эффективности звукопоглощения достигается в результате управления образованием комплексной пористости на макро- и микроуровне за счет применения в составе композита порообразователя и пористого заполнителя соответственно (рисунок 8).

Исследование инфразвуковых и низких частот для оценки звукопоглощающих характеристик является важным дополнением к исследованию на более высоких частотах. Эти низкие частоты могут иметь особую значимость, например, для звукопоглощения в помещениях, где присутствует низкочастотный шум от технического оборудования или машин.

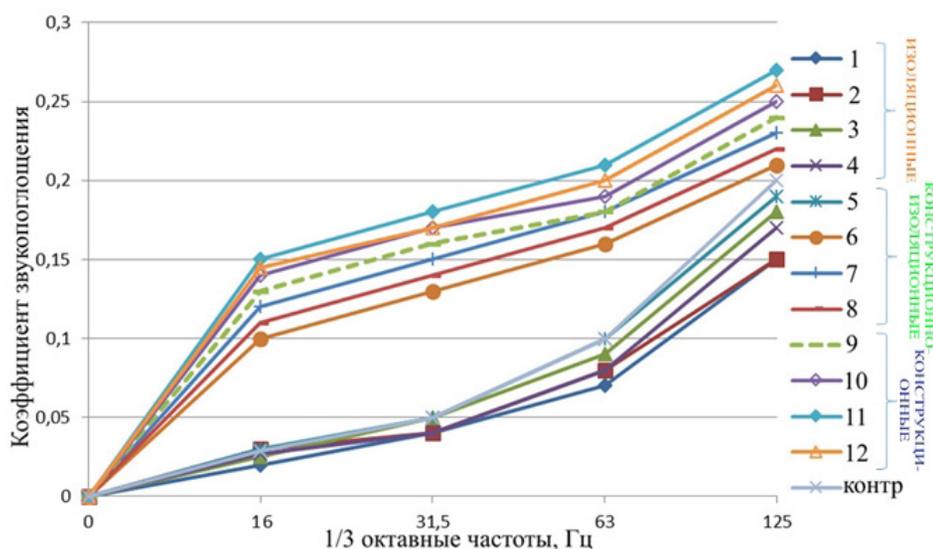


Рисунок 9 – Эффективность звукопоглощения газобетонов в низкочастотном диапазоне  
Источник: составлено автором.

Figure 9 – Efficiency of sound absorption of aerated concrete in the low-frequency range  
Source: compiled by the authors.

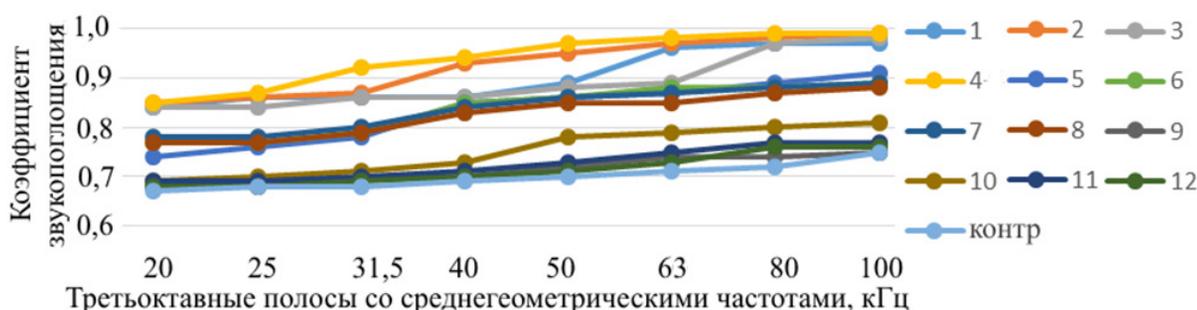


Рисунок 10 – Эффективность звукопоглощения газобетонов в высокочастотном диапазоне  
Источник: составлено автором.

Figure 10 – Efficiency of sound absorption coefficients of the concretes on ultra sound frequencies  
Source: compiled by the authors.

Для проведения исследования использовались методы измерения с помощью измерителя шума и вибрации ВШВ 003 МЗ, а также программы InfraSound. Эти методы позволяют оценить звукопоглощающие характеристики материалов на низких частотах и инфразвуке.

Результаты исследования, представленные на рисунке 9, позволяют оценить эффективность материалов в поглощении звука на низких частотах. Они могут использоваться для определения эффективности материалов в снижении низкочастотного шума и создания комфортной акустической среды.

Важно отметить, что звукопоглощающие характеристики материалов на низких частотах могут отличаться от их характеристик на

более высоких частотах. Поэтому проведение исследования на различных частотах позволяет получить более полную картину о звукопоглощающих свойствах материалов в различных частотных диапазонах.

На рисунке 10 показаны результаты исследования скорости прохождения ультразвука и звукового давления с использованием прибора «Пульсар-1.1» и программы UltraSound Detector. Отмечается, что с повышением плотности образцов коэффициент звукопоглощения увеличивается до 4–5 раз по сравнению с контрольным образцом и малоплотными образцами разработанных автоклавных и неавтоклавных газобетонов в области низких частот.

Таблица 4  
Коэффициенты а и b для предлагаемой расчетной формулы (2)  
Источник: составлено автором.

Table 4  
Coefficients a and b for the proposed calculation formula  
Source: compiled by the authors.

Открытая пористость, %	Вид заполнителя*		
	пористый	пористый+плотный	плотный
20–30	2,14/1,62	1,84/2,14	1,55/0,42
30–40	0,50/1,94	0,16/1,85	1,64/0,22
40–50	1,14/1,57	0,19/1,86	0,16/0,35
50–60	1,49/1,55	0,22/1,58	1,14/2,11

\*в числителе – а, в знаменателе – b.

В результате корректировки эмпирической зависимости вычисления параметра  $\alpha$ с учетом полученных данных, предложены поправочные коэффициенты а и b (таблица 4); тогда формула (1) имеет следующий вид:

$$\alpha = \frac{4aR/\rho_0c_0}{(1 + 4aR/\rho_0c_0)^2 + (2bM/\rho_0c_0)^2} \quad (2)$$

Разработанные автоклавные и неавтоклавные газобетоны обладают высокими звукопоглощающими характеристиками, а именно – коэффициенты звукопоглощения составляют от 0,71 до 0,78, что на четверть выше контрольного состава и до 40% выше, чем у конструкционных газобетонных композитов большей плотности. Это означает, что данные бетоны эффективно поглощают звук и могут использоваться для создания звукоизоляционных конструкций или защиты от шума. Кроме того, эти бетоны обладают высокими эксплуатационными характеристиками, такими как низкий коэффициент теплопроводности (в диапазоне от 0,13 до 0,175 Вт / (м • К)) и марка по морозостойкости, соответствующая от 75 до 100 циклов попеременного замораживания и оттаивания, что делает их подходящими для использования в строительстве.

Разработана широкая номенклатура звукопоглощающих материалов, включая автоклавные и неавтоклавные ячеистые бетоны, с целью обеспечения защиты среды обитания человека от воздействия шума. Нормативно-техническая документация на производство этих материалов была подготовлена и утверждена для их внедрения. Экспериментальное одноэтажное здание, построенное из газобетонных блоков разработанных составов успешно прошло испытания на комплекс за-

щитных характеристик, что подтвердило перспективность этих материалов. Данное здание также является объектом исследований при разработке новых систем защиты от акустического воздействия. Реализация результатов и использование этих материалов позволит создать безопасную среду обитания для людей, что особенно актуально в условиях роста природных и техногенных аномальных процессов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технологическое решение, обеспечивающее получение автоклавных и неавтоклавных газобетонов с улучшенными характеристиками звукопоглощения, было обосновано и экспериментально подтверждено. Достигнуто это за счет использования композиционного вяжущего, содержащего золу-уноса, и вспученного перлита. Установлено, что ячеистые бетоны на таких композиционных вяжущих являются эффективными материалами для звукопоглощения акустических волн различных спектров. Была выявлена взаимосвязь между компонентами композиционного вяжущего, соотношением пористого и плотного заполнителей и процессами структурообразования, что позволяет значительно повысить эксплуатационные характеристики материалов.

Были установлены закономерности синтеза газобетонов и механизм влияния состава бетонной смеси на микроструктуру композита. Оптимизация процессов структурообразования с использованием композиционного цементно-золяного вяжущего, пористого заполнителя и порообразователя позволила достичь желаемой открытой пористости, прочности на сжатие и других характеристик материалов.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Harding J. L., Preston L. A., Hafila E. Modeling the acoustic noise from a wave energy converter farm

- and its impact on marine mammals at the PacWave South site, offshore Newport Oregon. *Renewable Energy*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.014>
2. Savin A., Ermakov V., Egorov M. Acoustic impact on bridges. *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 63, Pp. 618-627
  3. Kim J., Lee S., Kim S., Song H., Ryu J. Quantitative study on the influence of non-acoustic factors on annoyance due to floor impact noise in apartments. *Applied Acoustics*. 2023. Vol. 202, 109144.
  4. Seyyednourani M., Akgun S., Ulus Y., Yildiz M., Sas H.S. Experimental investigation on Compression-After-Impact (CAI) response of aerospace grade thermoset composites under low-temperature conditions assisted with acoustic emission monitoring. *Composite Structures*. 2023. Vol. 321, 117260
  5. Zhong S., Punpongsanon P., Iwai D., Sato K. Estimation of fused-filament-fabrication structural vibro-acoustic performance by modal impact sound. *Computers & Graphics*. 2023. Vol. 115, Pp. 137-147.
  6. Lyu Q., Dai P., Chen A. Sandwich-structured porous concrete manufactured by mortar-extrusion and aggregate-bed 3D printing. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 392, 131909.
  7. Veloso M., Pereira M., Godinho L., Amado-Mendes P., Redondo J. Insertion loss prediction of sonic crystal noise barriers covered by porous concrete using the Method of Fundamental Solutions. *Applied Acoustics*. 2023. Vol. 211, 109543.
  8. Niyomukiza J. B., Eisazadeh A., Tangtermsirikul S. Recent advances in slope stabilization using porous vegetation concrete in landslide-prone regions: A review. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 76, 107129.
  9. Bagaria A., Juneja D. Experimental research on influence of marble powder, silica fume and polypropylene fiber on the porous concrete. *Materialstoday: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.240>
  10. Pal R., Sarkar P.P. Developing a model of porous concrete-filled rigid pavement. *Materialstoday: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.333>
  11. Jin X, Haider M. Z., Cui Y., Jang J. G., Kim Y. J., Fang G., Hu J. W. Development of nanomodified self-healing mortar and a U-Net model based on semantic segmentation for crack detection and evaluation. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 365, 129985.
  12. Haider M. Z., Jin X., Hu J. W. Development of nanomodified-cementitious composite using phase change material for energy saving applications. *Applied Energy*. 2023. Vol. 340, 121067
  13. Sldozian R. J., Tkachev A. G., Burakova I. V., Mikhaleva Z. A. Improve the mechanical properties of lightweight foamed concrete by using nanomodified sand. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 34, 101923.
  14. Moroni F., Palazzetti R., Zucchelli A., Pirondi A. A numerical investigation on the interlaminar strength of nanomodified composite interfaces. *Composites Part B: Engineering*. 2013. Vol. 55, Pp. 635-641.
  15. Konsta-Gdoutos M. S., Batis G., Danoglidis P. A., Zacharopoulou A. K., Zacharopoulou E. K., Falara M. G., Shah S.P. Effect of CNT and CNF loading and count on the corrosion resistance, conductivity and mechanical properties of nanomodified OPC mortars. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 147, Pp. 48-57.
  16. Pan Q., Hu J., Hu C., Yan Y. Repairation and characterization of carbon nanotubes coated on expanded perlite as sound absorption composite materials. *Materials Science and Engineering: B*. 2023. Vol. 296, 116697.
  17. Zhang L., Zhang W., Xin F. Broadband low-frequency sound absorption of honeycomb sandwich panels with rough embedded necks. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Vol. 196, 110311.
  18. Shi K., Hu D., Li D., Jin G. Sound absorption behaviors of composite functionally graded acoustic structure under hydrostatic pressure. *Applied Acoustics*. 2023. Vol. 211, 109474.
  19. Cai L., Tian J., Feng K., Liu Y., Jiang Q. Sound absorption model of foam glass-ceramics based on microstructure. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2023. Vol. 604, 122136.
  20. Zhu J., Gao H., Dai S., Qu Y., Meng G. Multilayer structures for high-intensity sound energy absorption in low-frequency range. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2023. Vol. 247, 108197.
  21. Sun D., Yin F., Deng Y., Liu K., Tang J., Shen C., Sun Y., Wang A., Huang N., Hu C. Utilization of carbide slag in autoclaved aerated concrete (CS-AAC) and optimization: foaming, hydration process, and physic-mechanical properties. *Case Studies in Construction Materials*. 2023, e02354
  22. Gu X., Wang S., Liu J., Wang H., Xu X., Wang Q., Zhu Z. Effect of hydroxypropyl methyl cellulose (HPMC) as foam stabilizer on the workability and pore structure of iron tailings sand autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 376, 130979
  23. Khunt Y., Nathwani V., Patel H., Joshi T., Gandhi D. Investigation on properties of autoclave aerated concrete using different pre-curing and curing techniques. *Materialstoday: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.047>
  24. Bukhari S. A., Patil D., Gogate N. G., Minde P. R. Utilization of waste materials in non-autoclaved aerated concrete blocks: State of art review. *Materialstoday: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.334>
  25. Poongodi K., Murthi P. Effects of using autoclaved aerated concrete block debris as lightweight aggregate on internal curing of concrete. *Materialstoday: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.180>

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

*Сяо Вэньсюй – аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций.*

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

*Xiao Wenxu. Postgraduate student of the Building Materials Science, Products and Structures Department.*

Научная статья  
УДК 69.003  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-514-526>  
EDN: WSDHCB



## ДИАГНОСТИКА ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СТАБИЛЬНОСТЬ РАБОТЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

О. А. Побегайлов\*, Н. О. Сизен, В. М. Дедловский  
Донской государственный технический университет  
г. Ростов-на-Дону, Россия

[opobegaylov@mail.ru](mailto:opobegaylov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2950-7310>,  
[sizen0263@gmail.com](mailto:sizen0263@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0004-0208-8090>.  
[vadimDedlovskii@yandex.ru](mailto:vadimDedlovskii@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0006-5069-4436>.

\*ответственный автор

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Для любой строительной организации (как для подрядчика, так и застройщика) важно иметь представление о степени стабильности своей работы. Однако на сегодняшний день не существует универсального метода выявления таких факторов и определения степени их значимости. Цель исследования заключалась в разработке метода диагностики факторов, влияющих на стабильность работы строительных организаций.

**Материалы и методы.** Методологической основой работы явились общенаучные принципы и методы исследования: как эмпирические методы (эксперимент и экспертная оценка), так и теоретические (анализ и синтез, восхождение от абстрактного к конкретному, систематизация). Отделены факторы риска и неопределённости друг от друга по критерию наличия или отсутствия вероятности у наступления того или иного события. Отсюда следует, что риски можно минимизировать, но неопределённость можно только снять, поскольку нельзя минимизировать то, чья величина неизвестна. Выделены группы рисков, влияющих на стабильность работы строительной организации, а также некоторые группы неопределённостей, которые могут оказывать влияние на строительство. Проведена экспертная оценка факторов риска и неопределённости, влияющих на стабильность работы строительной организации, вследствие чего выполнены диагностика и анализ факторов внутренней и внешней угрозы, влияющих на ход строительства.

**Результаты.** Предложена модель диагностики факторов риска и неопределённости в современном строительстве. Ранжированы риски и неопределённости по уровню их опасности для деятельности строительной организации и в целом для реализации инвестиционного строительного проекта. Полученные результаты ранжирования рисков помогают принять управленческие решения, направленные на минимизацию наиболее опасных рисков. Например, разработать дополнительные меры социального стимулирования работников, проверить сложившиеся логистические цепочки, усилить финансовый менеджмент и т.д. Выведены рекомендации по снятию неопределённостей в ходе работы строительной организации.

**Обсуждение и заключение.** Разработанный метод диагностики факторов неопределённости и риска могут применять как подрядные организации, так и застройщики. Причём крупные застройщики и инвесторы могут использовать его не только в работе своей организации, но и для оценки неопределённости и риска в общей инвестиционно-строительной деятельности. В дальнейшем возможно исследование рискообразующих факторов, учет их взаимовлияния и степень регулируемости, выделение тех факторов, которые требуют особого внимания, а также разработка общей программы управления рисками и неопределённостью инвестиционного проекта.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** факторы рисков, стабильность работы строительной организации, снятие неопределённости, минимизация риска, ранжирование факторов, подрядчик, застройщик, инвестиционный проект, моделирование

**БЛАГОДАРНОСТИ:** авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество. Авторы выражают признательность руководителям строительных организаций, оказавшим помощь в организации экспертной оценки и самим принявшим участие в исследовании, – заслуженному строителю

© Побегайлов О. А., Сизен Н. О., Дедловский В. М., 2023



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

России Анатолию Ивановичу Шевченко, Эльдару Александровичу Власову, Андрею Николаевичу Жданову, Анатолию Анатольевичу Родионову, Алексею Алексеевичу Глазкову.

Статья поступила в редакцию 27.07.2023; одобрена после рецензирования 20.08.2023; принята к публикации 30.08.2023.

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: Побегайлов О. А., Сизен Н. О., Дедловский В. М. Диагностика факторов, влияющих на стабильность работы строительной организации // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 4 (92). С. 514-526. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-514-526>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-514-526>

EDN: WSDHCB

## DIAGNOSTICS OF FACTORS AFFECTING THE STABILITY OF A CONSTRUCTION ORGANIZATION WORK

Oleg A. Pobegaylov\*, Nikolai O. Sizen, Vadim M. Dedlovskii

Don State Technical University

Rostov-on-Don, Russia

[opobegaylov@mail.ru](mailto:opobegaylov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2950-7310>,

[sizen0263@gmail.com](mailto:sizen0263@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0004-0208-8090>.

[vadimDedlovskii@yandex.ru](mailto:vadimDedlovskii@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0006-5069-4436>.

\*corresponding author

### ABSTRACT

**Introduction.** For any construction organization (both for the contractor and the developer), it is important to have an idea of a degree of stability of their work. But for today there is no universal method for identifying such factors and determining the degree of their significance. The purpose of the study was to develop a method for diagnosing factors affecting the stability of the work of construction organizations.

**Materials and methods.** The methodological basis of the work was the general scientific principles and methods of research both empirical methods (experiment and expert evaluation) and theoretical (analysis and synthesis, ascent from the abstract to the concrete, systematization). Risk factors and uncertainties are separated from each other by the criterion of the presence or absence of probability of the occurrence of an event. It follows that risks can be minimized, but uncertainty can only be removed, since it is impossible to minimize something whose magnitude is unknown. The groups of risks affecting the stability of the construction organization, as well as some groups of uncertainties that may affect the construction are identified. An expert assessment of risk factors and uncertainty affecting the stability of the construction organization was carried out, as a result of which diagnostics and analysis of internal and external threat factors affecting the progress of construction were carried out.

**Results.** A model for diagnosing risk factors and uncertainty in modern construction is proposed. Risks and uncertainties are ranked according to the level of their danger for the activities of a construction organization and, in general, for the implementation of an investment construction project. The obtained results of risk ranking help to make management decisions aimed at minimizing the most dangerous risks. For example, to plan the acquisition (leasing) of new equipment, to develop additional measures of social incentives for employees, to check the existing logistics chains, to strengthen financial management, etc. Recommendations are also given for removing uncertainties in the course of the work of a construction organization.

**Discussion and conclusions.** The developed method of diagnosing uncertainty and risk factors can be used by both construction contractors and developers. Moreover, large developers and investors can use it not only in the work of their organization, but also to assess uncertainty and risk in general investment and construction activities. In the future, it is possible to study risk-forming factors, to take into account their mutual influence and the degree of controllability (manageability), to identify those factors that require special attention, as well as to develop a general program for managing risks and uncertainty of an investment project.

**KEYWORDS:** risk factors, stability of the construction organization, removal of uncertainty, risk minimization, ranking of factors, contractor, developer, investment project, modelling

© Pobegaylov O. A., Sizen N. O., Dedlovskii V. M., 2023



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

**ACKNOWLEDGEMENT.** *The authors express their gratitude to the editors and reviewers for their attentive attitude to the article and the above comments, which made it possible to improve its quality. The authors express their gratitude to the heads of construction organizations who assisted in organizing the expert assessment and participated in the study themselves – Anatolii I. Shevchenko, Honored Builder of Russia, Eldar A. Vlasov, Andrei N. Zhdanov, Anatolii A. Rodionov, Aleksei A. Glazkov.*

*The article was submitted 27.07.2023; approved after reviewing 20.08.2023; accepted for publication 30.08.2023.*

*The authors have read and approved the final manuscript.*

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

*For citation.* Pobegaylov Oleg A., Sizen N. O., Dedlovskii V. M. Diagnostics of factors affecting the stability of a construction organization work. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2023; 20 (4): 514-526. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-514-526>

## ВВЕДЕНИЕ

Для любой коммерческой организации, в том числе осуществляющей деятельность в строительной отрасли, важно иметь представление о степени стабильности своей работы. В строительстве это особенно важно для организации, позиционирующей себя на рынке в качестве застройщика, поскольку жизненный цикл реализации его бизнес-проекта имеет весьма длительное время (как правило, несколько лет). Хотя для подрядной строительной организации это также важно, т.к. если будет мало застройщиков, то фронт работы подрядчиков будет сокращаться. А в свою очередь количество заказов, которые могут дать застройщики, зависит от положения в отрасли в целом, а оно зависит от экономической ситуации в стране. Следовательно, проблема диагностики факторов, влияющих на стабильность работы организации, весьма актуальна как для подрядчиков, так и застройщиков. Однако на сегодняшний день не существует универсального метода выявления таких факторов и определения степени их значимости.

Целью проведённого нами исследования является разработка метода диагностики факторов, влияющих на стабильность работы строительных организаций. В силу чего мы поставили перед собой следующие задачи:

- 1) отделить факторы риска и неопределённости друг от друга;
- 2) выявить группы рисков, влияющих на стабильность работы строительной организации;
- 3) создать модель диагностики факторов риска и неопределённости;
- 4) ранжировать риски по уровню их опасности для деятельности строительной органи-

зации и в целом для реализации инвестиционного строительного проекта;

5) выработать рекомендации по снятию неопределённостей в ходе работы строительной организации.

Исследованию факторов, влияющих на процесс строительства, посвящали свои труды ряд авторов. Например, исследование влияния факторов на сроки строительства можно увидеть в работах Е. П. Гудкова, С. А. Болотина, Л. А. Опариной, Чэнь Ифэй и др. [1, 2, 3, 4]. Факторы, влияющие на стоимость строительства, анализировали А. Вивек, В. Гопалдасани, О'Нил К., Рао Х. и др. [5, 6]. Проблемой минимизации рисков инвестиционных проектов занимались Н. К. Борисюк, Е. А. Вахрушева, Л. Н. Доронкина, В. С. Маркин, М. С. Мизя, О. С. Смотрина, О. А. Суйкова и др. [7, 8, 9, 10, 11]. Факторы неопределённости в инвестиционном процессе исследовали Т. В. Боброва, С. Н. Ларин, М. С. Ратанин, З. Ф. Садыкова, Т. Теплова и др. [12, 13, 14, 15].

Моделирование факторов производственного процесса в строительстве и смежных отраслях исследовали Л. Б. Зеленцов, С. Йылмаз, М. С. Ратанин, Г. Б. Сафарян, Е. П. Тимофеева, Г. Е. Францен и др. [13, 16, 17, 18, 19].

Одновременное исследование факторов неопределённости и риска проводили М. В. Бедило, С. Ю. Бутузов, Д. А. Родин, Саидов М.-П.А. и др. [20, 21, 22]. Интересный тезис выдвинул молодой учёный А. М. Баев, что в современной экономике сама неопределённость есть один из главных факторов риска<sup>1</sup>.

Однако в вышеуказанных работах не были решены поставленные нами задачи. Хотя несомненно, что изучение трудов этих учёных

<sup>1</sup> Баев А. М. Неопределённость – важнейший фактор риска развития современной экономики // Конкурентоспособность территорий: материалы XXV Всероссийского экономического форума молодых ученых и студентов, Екатеринбург, 27 – 30 апреля 2022 г. Екатеринбург, 2022. С. 129 – 131. EDN: XSDKQL

помогло нам сформировать метод диагностики факторов, влияющих на стабильность работы строительных организаций, и предложить модель, благодаря которой можно выявить наиболее значимые риски и неопределённости, оказывающие существенное влияние на ход строительства.

### ОСОБЕННОСТИ ФАКТОРОВ РИСКА И НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ

В традиционном понимании риски отличаются от неопределённости тем, что они имеют ту или иную вероятность возникновения. Неопределённость же вероятности своего появления не имеет. Например, невозможно вычислить вероятность подрыва только что построенного здания (сооружения) неизвестным террористом. Нам могут возразить, что от такого события объект можно застраховать, а размер страховой премии тогда можно считать вероятностью возникновения данного события. Но размер страховой премии определяет страховщик, для него в этом случае неопределённость и есть фактор риска, на который указывал А. М. Баев. И если таких случаев в практике страховщика возникнет сразу несколько, то он просто разорится. Поэтому и страховых организаций, берущихся страховать события, вызываемые неопределённостями, весьма мало.

Некоторые источники причисляют к неопределёностям природные процессы [23, 24, 25]. Например, такие как стихийные бедствия (землетрясения, ураганы, наводнения), а также засуха, мороз, гололед. Однако на наш взгляд, природные явления не возникают вдруг по неизвестной причине. Каждое место потенциального строительства принадлежит к определённому сейсмическому району. Поэтому опасность землетрясения можно прогнозировать с определённой долей вероятности. А значит, это не неопределённость, а риск. Тем более это относится к другим, влияющим на строительство стихийным бедствиям и природным процессам, – ураганам, наводнениям, морозу и гололёду. Из природных явлений, способных повлиять на строительство, к неопределёностям можно отнести только крайне редкие события, например, падение астероидов и крупных метеоритов.

К основной группе неопределённостей в инвестиционно-строительной сфере для России и других стран СНГ, по нашему мнению, можно отнести политические факторы. Невоз-

можно оценить вероятность резкого изменения налогового и таможенного законодательства, введения запретов на экспорт (импорт) определённых товаров (работ, услуг), установления ограничений на какие-либо операции или виды деятельности, определения приоритетных программ строительства с выплатами по контрактам в разы выше среднерыночных. Всё перечисленное, безусловно, влияет как на инвестиционный климат в целом, так и на положение отдельных строительных организаций. Причём существенное влияние оказывает не только факт введения того или иного упомянутого решения, но даже ожидание какого-либо кардинального шага со стороны политического руководства. А оно может либо принять, либо не принять такое решение.

Поэтому, пытаясь управлять рисками и неопределённостями, строительная организация должна ставить перед собой задачи *минимизации* рисков, а не *снятия* неопределённости, поскольку нельзя минимизировать то, чья величина неизвестна.

### ФАКТОРЫ НЕСТАБИЛЬНОСТИ РАБОТЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ, ИМЕЮЩИЕ ВЕРОЯТНОСТЬ – РИСКИ

Исходя из анализа практики строительного производства, а также некоторых литературных источников [2, 7, 21, 26], мы выделили следующие группы рисков, влияющих на работу строительной организации:

1. Организационные (нарушение поставок ресурсов, простои, неправильные управленческие решения и др.).
2. Технологические (увеличение производственного брака, пожар из-за нарушения технологии или правил охраны труда, появление случаев сильного производственного травматизма, непредвиденное увеличение расхода ресурсов и др.).
3. Технические (поломка оборудования (машин), пожар из-за неисправности техники, получение материалов (конструкций) ненадлежащего качества и др.).
4. Экономические (задержка оплаты выполненных работ, неустойки за нарушение условий контрактов, инфляция, штрафы по кредитам и др.).
5. Социальные (увеличение текучести кадров, повышение уровня заболеваемости работников, забастовки, изменение демографического или социального состава работников и др.).

6. Природно-климатические (мороз, засуха, природный пожар, землетрясение, ураган, наводнение, подтопление, оледенение, град, крупный снегопад, сход селевого потока и др.).

7. Экологические (увеличение загрязнения воздуха и/или воды, образование свалок мусора, эрозия почвы, повышение уровня радиации и др.).

Кроме того, важно учитывать, что одни группы рисков могут быть следствием возникновения рисков из другой группы. Например, часть экономических рисков (задержка оплаты выполненных работ, неустойки за нарушение условий контрактов и др.) возникают как следствие технических и технологических рисков (поломка оборудования, нарушение технологии производства работ). Значит, при проведении расчётов нужно учитывать, что вероятность экономических рисков будет расти при реализации негативного сценария в технологических и технических составляющих.

Для определения весовых показателей вероятности возникновения указанных факторов мы применили метод экспертных оценок.

### МОДЕЛЬ ДИАГНОСТИКИ ФАКТОРОВ РИСКА И НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ

Для выявления и оценки факторов неопределённости и риска мы предлагаем применить дисперсионный метод, сущность которого состоит в следующем:

- формулируется цель анализа риска и неопределённости (к примеру, оценка финансового ущерба в результате отрицательных последствий реализации инвестиционного проекта);

- устанавливается абсолютный показатель эффективности деятельности строительной организации (к примеру, прибыль);

- экспертным методом выбираются основные внутренние и внешние факторы, которые могут воздействовать на параметры строительного производства.

Предлагаемая нами модель «Факторы риска и неопределённости в современном строительстве» предполагает прогнозирование и ранжирование факторов по степени их влияния на стабильность работы строительной организации:

$$\Phi = (\Phi_{внУ}, \Phi_{вУ}), \quad (1)$$

где  $\Phi_{внУ}$  – совокупность факторов внутренней угрозы;

$\Phi_{вУ}$  – совокупность факторов внешней угрозы.

Факторы неопределённости и риска внутренней и внешней угрозы, анализируемые в заданный период времени, подразделяются на группы по степени регулируемости и управляемости: неуправляемые ( $У1$ ), условно нерегулируемые ( $У2$ ), регулируемые (управляемые) ( $У3$ ).

Степень управляемости факторов обуславливается рассматриваемой нами управленческой задачей, а также заданными параметрами времени и пространства (уровня). Выявленный фактор можно отнести к какой-либо группе в соответствии с уровнем управления (подрядная строительная организация, крупная организация-застройщик или финансово-промышленная группа, отрасль в целом и т. д.), характера и степени их воздействия на процесс строительного производства, а также с длительностью периода реализации принятого решения. Чем уровень управления оказывается выше, тем большее число факторов могут расцениваться как управляемые [6]. А значит, у нас появляется больше возможностей для их корректировки. Например, некоторые факторы на уровне небольшого подрядчика воспринимаются в качестве факторов внешней угрозы (и в лучшем случае условно регулируемые), но на уровне региональных властей или тем более крупных федеральных заказчиков, рассматриваются как управляемые (к примеру, объём налоговой нагрузки). Следует принимать во внимание также продолжительность выполнения принятого управленческого решения. В этом случае наоборот, долгая его реализация говорит о том, что мы имеем дело с фактором  $У1$  или  $У2$ .

Для проведения экспертной оценки факторов мы сформировали экспертную группу из 12 человек, в которую вошли представители пяти разноплановых строительных организаций (по 2-3 эксперта от каждой организации). Организации подбирались разных мощностей и видов деятельности, чтобы мнения их представителей имели бы достаточную релевантность.

Каждый внешний и внутренний фактор риска и неопределённости в определенный временной период оценивается экспертами согласно степени регулируемости (управляемости). К примеру, 0 – фактор не входит в данную группу, 1 – фактор входит в данную группу. По каждой группе регулируемости (управляемости) подсчитывается сумма значений, результаты сводятся в обобщающую таблицу 1.

Таблица 1  
**Экспертная оценка факторов внутренней и внешней угрозы для строительной организации**  
 Источник: составлено авторами.

Table 1  
**Expert assessment of internal and external threat factors for a construction organization**  
 Source: compiled by the authors.

Группа факторов	Степень регулируемости (управляемости)		
	У3	У2	У1
<b>Факторы внутренней угрозы</b>			
ФвнУ 1 – неэффективное управление проектом	0	0	1
ФвнУ 2 – неточность, недостаточность проектной документации	0	0	1
ФвнУ 3 – барьеры межличностной коммуникации	1	0	0
ФвнУ 4 – повышение текучести кадров	0	0	1
ФвнУ 5 – недостаток квалифицированных кадров	0	1	0
ФвнУ к – недостаток средств	0	1	0
Итого по факторам внутренней угрозы	1	2	3
Вероятность (частота) управляемости	0,1667	2/6 = 0,3333	3/6 = 0,5
<b>Факторы внешней угрозы</b>			
ФвУ 1 – технологические ограничения	1	0	0
ФвУ 2 – инфляция	0	1	0
ФвУ 3 –задержка оплаты выполненных работ	1	0	0
ФвУ 4 – поставка материалов (конструкций) не надлежащего качества	0	1	0
ФвУ 5 – нарушение поставок ресурсов	0	1	0
ФвУ к –мороз	1	0	0
Итого по факторам внешней угрозы	3	3	0
Вероятность (доля) управляемости	0,5	3/6 = 0,5	0/5 = 0

Далее подсчитывается вероятность (частота) управления факторами внутренней и внешней угрозы. Предлагаем это осуществлять путем деления суммарного значения баллов в каждом столбце на итоговое количество баллов:

$$P_{уф} = \sum_p B_{рк} / \sum_{кр} \sum_p B_{рк} , \quad (2)$$

где  $B_{рк}$  – оценка управляемости (регулируемости)  $k$ -го фактора по  $p$ -й группе регулируемости [7].

После разделения факторов по степени регулируемости (управляемости) выделяются следующие группы факторов:

ФО – факторы, не подлежащие управлению (сугубо отрицательные факторы).

Для диагностики такого рода факторов необходимо учитывать их иницирующие события и значения, полученные посредством трендового анализа. После регулярных замеров в течение достаточного периода времени

можно выявить среднее изменение нерегулируемого фактора и дать рекомендации по учёту данного фактора.

ФП – факторы, к которым целесообразно применить меры управленческого воздействия.

Для диагностики факторов из группы ФП можно использовать методику, предложенную Л. Н. Доронкиной: выявить воздействующие на эти факторы причины, определить по формуле (2) вероятность возникновения данных причин, а затем рассчитать значение каждого из факторов данной группы в стоимостных единицах [7].

К примеру, строительной организации может быть нанесен финансовый ущерб в результате повышения цен на строительные материалы. В таблице 2 представлен размер ущерба и вероятность возникновения такого ущерба в зависимости от обстоятельств реализации подобного риска.

Таблица 2

Работа с управляемым или регулируемым (УЗ) фактором

Источник: составлено авторами на основе методики, предложенной Л. Н. Доронкиной [7]

Table 2

Work with a controlled or regulated (U3) factor

Source: compiled by the authors on the basis of the methodology proposed by L. N. Doronkina [7]

Причина возникновения фактора ФП	Причина 1	Причина 2	Причина 3	Причина 4
Вероятность возникновения соответствующей причины, P, доли	0,3	0,2	0,1	0,4
Значение фактора ФП в результате проявления соответствующей причины, З тыс. руб.	30	50	40	70

На основании представленных в таблице 2 данных можно рассчитать среднее значение фактора, идентифицированного нами, как регулируемый:

$$Z_{кс} = \sum P_k \cdot Z_k = 0,3 \cdot 30 + 0,2 \cdot 50 + 0,1 \cdot 40 + 0,4 \cdot 70 = 51 \text{ (тыс. руб.)}$$

Отсюда следует, что рост цен на строительные материалы привёл к среднему ущербу порядка 51 тыс. руб.

Затем мы провели оценку ущерба в результате повышения цен на сырье посредством дисперсии:

$$D = ((30-51)^2) \cdot 0,3 + ((50-51)^2) \cdot 0,2 + ((40-51)^2) \cdot 0,1 + ((70-51)^2) \cdot 0,4 = 120 + 0,2 + 12,1 + 144,4 = 277$$

Далее рассчитывается среднеквадратическое отклонение по k-му фактору (квадратный корень, извлеченный из дисперсии):

$$\sigma_k = D^{1/2} = 277^{1/2} = 16,64$$

Учитывая значение среднего ущерба (51 тыс. руб.) и среднеквадратического отклонения, можно получить диапазон ущерба:

$$(51-16,64; 51+16,64), \text{ или } (34,36; 67,64)$$

Для оценки представительности (качества) полученных значений ущерба в результате влияния k-го фактора вычисляется коэффициент вариации:

$$K_{вар} = \sigma / Z_{кс} = 16,64 / 51 = 0,3263$$

С учётом того, что значение  $K_{вар} < 0,33$ , полученные данные не в достаточно объективной мере отражают размеры ущерба и вероятности их реализации.

Если полученное значение  $K_{вар}$  будет  $> 0,33$ , то возникнет необходимость проведения более глубокой диагностики исследуемого фактора.

**РАНЖИРОВАНИЕ РИСКОВ И НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЕЙ ПО УРОВНЮ ИХ ВЛИЯНИЯ НА СТАБИЛЬНОСТЬ ХОДА СТРОИТЕЛЬСТВА**

По окончании расчёта значений каждого фактора, влияющего на ход процесса строительства, можно сформировать таблицу (таблицы) с перечнем факторов, на которые можно оказывать регулирующее (управленческое) воздействие с целью минимизации риска и снятия неопределённости.

После выявления и диагностики факторов риска и неопределённости эксперты осуществили их ранжирование и получили результат, согласно которому первый фактор оказался выше второго, второй и третий равны между собой, четвёртый выше третьего и т. д.:

$$K_{p1} > K_{p2} = K_{p3} > K_{p4} \dots \quad (3)$$

Чем сильнее негативное влияние риска или неопределённости на производственно-экономические показатели функционирования строительной организации, тем выше будет их ранг.

Результаты ранжирования факторов рисков представлены в таблице 3, а неопределённостей – в таблице 4.

Полученные результаты ранжирования рисков помогают принять управленческие решения, направленные на минимизацию наиболее опасных рисков. Например, разработать дополнительные меры социального стимулирования работников, проверить сложившиеся логистические цепочки, усилить финансовый менеджмент и т. д.

Таблица 3  
**Ранжирование факторов риска строительных организаций при возведении объектов**  
 Источник: составлено авторами.

Table 3  
**Ranking of risk factors for construction organizations when building the objects**  
 Source: compiled by the authors.

Наименование группы рисков	Воздействующий фактор	Ранг по организациям, участвовавшим в исследовании			
		ООО «Строй-механизация»	ООО «Пальмира»	ООО «Опт. Решение»	ООО «Мастер»
Технологические	1. Увеличение производственного брака 2. Непредвиденное увеличение расхода ресурсов	0,05	0,07	0,05	0,06
Экологические	1. Увеличение загрязнения воздуха 2. Образование свалок мусора	0,008	0,006	0,009	0,007
Организационные	1. Нарушение поставок ресурсов 2. Простои 3. Неправильные управленческие решения	0,10	0,15	0,16	0,12
Экономические	1. Несвоевременная оплата выполненных работ 2. Штрафы и пени за нарушение договоров 3. Инфляция	0,40	0,35	0,41	0,40
Социальные	1. Повышение уровня заболеваемости 2. Увеличение текучести кадров 3. Забастовки	0,20	0,20	0,20	0,25
Природно-климатические	1. Мороз, оледенение 2. Ураган. 3. Природный пожар 4. Подтопление. 5. Обильный снегопад	0,11	0,13	0,12	0,11
Технические	1. Остановка работы оборудования (поломка) 2. Пожар из-за неисправности техники	0,30	0,33	0,24	0,28

Таблица 4  
**Ранжирование факторов неопределённости строительных организаций при возведении объектов**  
 Источник: составлено авторами.

Table 4  
**Ranking of uncertainty factors for construction organizations when building the objects**  
 Source: compiled by the authors.

Наименование группы неопределённости	Воздействующий фактор	Ранг по организациям, участвовавшим в исследовании			
		ООО «Строй-механизация»	ООО «Пальмира»	ООО «Опт. Решение»	ООО «Мастер»
Техногенные катастрофы	1. Взрыв на объекте строительства 2. Наводнение по причине прорыва плотин	0,002	0,0003	0,0008	0,001
Природные катастрофы	1. Падение астероида или крупного метеорита 2. Геологический разлом	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Политическая неопределённость	1. Сильное повышение (понижение) Банком России ключевой ставки 2. Установление ограничений на какие-либо операции или виды деятельности 3. Определение приоритетных программ строительства с выплатами по контрактам в разы выше среднерыночных	0,19	0,21	0,26	0,29

Результаты из таблицы 4 нельзя интерпретировать так же однозначно, как результаты ранжирования рисков. Как было отмечено выше, неопределённость не имеет вероятности. Следовательно, результаты, полученные по итогам экспертной оценки факторов неопределённостей, отражают лишь некоторые ожидания экспертов, а присвоение экспертами крайне низкого ранга группе «Природные катастрофы» говорит о том, что они никогда не видели таких катастроф и слышали о них что-либо очень отдалённо.

Тем не менее результаты, данные экспертами, помогают дать рекомендации по снятию неопределённостей.

Во-первых, можно постараться найти страховую компанию, занимающуюся страхованием от природных и/или техногенных катастроф. Если же такую найти не удастся, или её услуги окажутся слишком дороги, то тогда можно относиться к вышеуказанным катастрофам как к практически невозможным событиям, и так снять данную неопределённость.

Во-вторых, от политической неопределённости тоже можно застраховаться, найдя страховую компанию, занимающуюся страхованием предпринимательских рисков. Однако таких компаний в России ещё меньше, чем страхующих природные и техногенные катастрофы. Но, по крайней мере, можно будет застраховать свою гражданскую ответственность за нарушение договора перед третьим лицом.

Однако одним страхованием политическую неопределённость снять невозможно. Для её «полного снятия» нужно быть готовыми к частичному сворачиванию деятельности, к переносу деятельности в другой регион, к диверсификации. А для этого нужно иметь в резерве денежные и/или иные материальные средства, которые помогли бы осуществить необходимые мероприятия при возникновении деструктивного фактора неопределённости.

Следует обратить внимание на такой фактор, как «Определение федеральными или региональными властями приоритетных программ строительства с выплатами по контрактам в разы выше среднерыночных». Появление данных контрактов может вызвать переход подрядчика к другому заказчику-застройщику, который может уплатить за выполненные работы значительно более существенную сумму. Особенно это относится к небольшим подрядным организациям, работающим на субподряде. Они легко отказываются от выполнения

начатой работы, невзирая на штрафные санкции, и переходят на другой объект. Для снятия этой неопределённости следует более тщательно подходить к выбору субподрядчиков, изучая их предыдущую деятельность.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе проведённого исследования мы осуществили следующее:

1. Отделили факторы риска и неопределённости друг от друга по критерию наличия или отсутствия вероятности у наступления того или иного события. Этот результат нашего исследования будет способствовать чёткой идентификации на практике факторов риска и неопределённости. У строительной организации не будет возникать вопроса, к риску или к неопределённости относится возникший фактор.

2. Выделили группы рисков, влияющих на стабильность работы строительной организации, а также некоторые группы неопределённостей, которые могут оказывать влияние на строительство.

3. Предложили модель «Факторы риска и неопределённости в современном строительстве». С её помощью можно прогнозировать и ранжировать возникающие факторы по степени их влияния на стабильность работы строительной организации.

4. Сформированная нами экспертная группа провела экспертную оценку факторов риска и неопределённости, влияющих на стабильность работы строительной организации. В результате мы выявили регулируемые (управляемые) и нерегулируемые факторы.

5. Предложили метод диагностики и регулирования факторов внутренней и внешней угрозы, влияющих на ход строительства.

6. Ранжировали риски и неопределённости по уровню их опасности для деятельности строительной организации и в целом для реализации инвестиционного строительного проекта.

7. Сформулировали рекомендации по минимизации рисков и снятию неопределённостей в ходе работы строительной организации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование позволило предложить своеобразную методику диагностики факторов, влияющих на стабильность работы строительных организаций.

Научная ценность нашего исследования заключается, прежде всего, в том, что одновременно исследуя факторы риска и неопределённости, мы отделили категории риска и неопределённости друг от друга, обозначили критерий, по которому следует идентифицировать факторы рисков и факторы неопределённости. Новизна состоит также в том, что была сформирована модель «Факторы риска и неопределённости в современном строительстве», которая позволяет выделить регулируемые и нерегулируемые факторы как внутренней, так и внешней угрозы. Кроме того, впервые были проведены расчёты по оценке влияния регулируемых факторов риска в строительстве.

Основная практическая значимость результатов нашей работы состоит в даче рекомендаций по минимизации рисков и снятии неопределённости в строительстве.

Разработанный метод диагностики факторов неопределённости и риска могут применять как подрядные строительные организации, так и застройщики. Причём крупные застройщики и инвесторы могут использовать его не только в работе своей организации, но и для оценки неопределённости и риска в общей инвестиционно-строительной деятельности.

Предложенная нами методика диагностики факторов, влияющих на стабильность работы строительной организации, способствует проведению комплексных исследований определения взаимодействия различных рискообразующих факторов, учету их взаимовлияния и степени регулируемости (управляемости), выделению тех факторов, которые требуют особого внимания, а также разработке общей программы управления рисками и неопределённостью инвестиционного проекта.

В дальнейшем, развивая исследование в обозначенном русле, следовало бы создать две базы данных факторов, влияющих на стабильность работы строительных организаций: одну базу данных с факторами рисков, другую – с факторами неопределённости. В каждой базе можно было бы создать группы факторов внутренней угрозы и внешней угрозы; поделить их на регулируемые и нерегулируемые. Базы должны будут содержать средние ранги и/или диапазон рангов всех включённых факторов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Болотин С. А., Мальсагов А. Р. К вопросу формирования пессимистических графиков строительства // *Недвижимость: экономика, управление*. 2020. № 2. С. 49–54. DOI: 10.22227/2073-8412.2020.2.49 – 54. EDN: JNHKLP
2. Гудков Е. П. Применение сетевых моделей дорожно-строительного производства в условиях рисков // *Вестник МГСУ*. 2010. № 2. С. 267 – 271. EDN: MUXQOT
3. Chen Yi., Zhu D., Tian Z., Guo Q. (2023) Factors influencing construction time performance of prefabricated house building: A multi-case study. *Habitat International*. Vol. 131, <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2022.102731>.
4. Oparina L. A. Application of information modelling technologies for construction time management // *Smart Composite in Construction*. 2021. Vol. 2. № 2. Pp. 48 – 55. DOI: 10.52957/27821919\_2021\_2\_48. EDN: KNJPXR.
5. O'Neill C., Gopaladasani V., Coman R. (2022) Factors that influence the effective use of safe work method statements for high-risk construction work in Australia – A literature review. *Safety Science*. Vol. 147, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105628>.
6. Vivek A., Rao H. (2022) Identification and analysing of risk factors affecting cost of construction projects. *International Conference on Latest Developments in Materials & Manufacturing*. Vol. 60, Part 3, Pp. 1696 – 1701, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.228>.
7. Доронкина Л. Н. О совершенствовании методов анализа и управления риском инвестиционно-строительного комплекса // *Экономика строительства*. 2014. № 2 (26). С. 53 – 55. EDN: RXFBWB
8. Борисюк Н. К., Смотрина О. С. К вопросу функционирования предприятия в нестабильной внешней среде // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. 2022. № 2. С. 24 – 30, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-2-24>. EDN: XLJDGS
9. Вахрушева Е. А. Семь раз отмерь... Методические основы анализа, оценки и управления инвестиционных рисков и гарантии возврата инвестиций // *Креативная экономика*. 2009. № 3 (27). С. 155 – 159. EDN: JZBKIB
10. Маркин В. С., Мизя М. С. Управленческие методы минимизации рисков инвестиционно-строительных проектов в условиях неопределённости // *Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий*. 2020. № 4 (36). С. 52 – 57. DOI: 10.24411/2225-8264-2020-10067. EDN: KWGSSG
11. Суйкова О. А., Кудряшова Е. В. Управление рисками инновационного проекта // *Инновационное развитие профессионального образования*. 2020. № 1 (25). С. 96 – 101. EDN: XDCWPC
12. Садыкова З. Ф., Абаев В. А. Оценка инвестиционной стратегии организации в условиях неопределённости // *Управление рисками в АПК*. 2019. № 1 (29). С. 6 – 15. EDN: UNTCOP

13. Боброва Т. В., Ратанин М. С., Тимофеева Е. П. Информационное моделирование организации строительства мостовых переходов при стохастической неопределенности временных параметров // Вестник СибАДИ. 2018. № 3 (61). С. 422 – 433. EDN: ХТВРPUT

14. Теплова Т. Управление инвестиционным процессом компании в условиях неопределенности // Проблемы теории и практики управления. 2006. № 7. С. 93 – 104. EDN: KWFQDD

15. Larin S. N. Using of the mechanism of the procedure of the dynamic systemic analysis for the uncertainty management in the housing and public utility sector // *Economy and Business: Theory and Practice*. 2019. № 10 – 2 (56). Pp. 21-26. DOI: 0.24411/2411-0450-2019-11247. EDN: XFSMEG (In Eng.)

16. Зеленцов Л. Б. Реализация строительных проектов изменяемого функционального назначения // Строительное производство. 2021. № 2. С. 26–32. DOI: 10.54950/26585340\_2021\_2\_26. EDN: BZKXLZ

17. Францен Г. Е., Мозговая Я. Г. Организационная модель реализации инвестиционного проекта в строительстве // Ползуновский альманах. 2016. № 1. С. 207 – 211. EDN: XQSXZJ

18. Сафарян Г. Б. Критический анализ обобщенной модели строительной системы // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11, № 4. С. 41 – 47. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.4.4. EDN: PFGTCK

19. Yilmaz S., Irmak M.A., Qaid A. (2022) Assessing the effects of different urban landscapes and built environment patterns on thermal comfort and air pollution in Erzurum city, Turkey. *Building and Environment*. Vol. 219. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109210.

20. Бедило М. В., Бердашев Б. Ж., Бутузов С. Ю. Модель адаптивного управления подразделениями в чрезвычайных ситуациях // Технологии техноферной безопасности. 2013. № 4 (50). 14 с. EDN: SCCPPH

21. Родин Д. А. Учет факторов неопределенности и риска при оценке инвестиционных проектов // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2022. № 3 – 4. С. 19 – 25. EDN: TJRDTU

22. Саидов М.-П. А. Оценка возникновения рисков при управлении инвестиционными проектами в условиях неопределенности // Транспортное дело России. 2010. № 3. С. 55 – 56. EDN: QAVDNB

23. Caron G. M., Savéant P., Schoenauer M. (2013) Multiobjective tactical planning under uncertainty for air traffic flow and capacity management. *IEEE Congress on Evolutionary Computation [Submitted on 16 Sep 2013]*. Pp. 1548-1555, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1309.4085>.

24. Zhang X., Mahadevan S. (2017) Aircraft re-routing optimization and performance assessment under uncertainty. *Decision Support Systems*. Vol. 96. Pp. 20-26, <https://doi.org/10.1016/j.dss.2017.02.005>

25. Díaz-López C., Serrano-Jiménez A., Verichev K., Barrios-Padura A. (2022) Passive cooling

strategies to optimise sustainability and environmental ergonomics in Mediterranean schools based on a critical review. *Building and Environment*. Vol. 221. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109297.

26. Meskhi B. C., Evtushenko A. I., Sidelnikova O. P. (2020) Radiation and environmental studies of the air of industrial premises of construction industry plants in the cities of Volgograd and Rostov regions. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. DOI: 10.1088/1757-899X/1001/1/012108.

## REFERENCES

1. Bolotin S. A., Mal'sagov A. R. K voprosu formirovaniya pessimisticheskikh grafikov stroitel'stva [On the issue of the formation of pessimistic building schedules]. *Nedvizhimost': ekonomika, upravlenie*. *Nedvizhimost': jekonomika, upravlenie*. 2020; No. 2: 49 – 54. (In Russ.)

2. Gudkov E. P. Primenenie setevykh modelej dorozhno-stroitel'nogo proizvodstva v usloviyah riskov [Application of network models of road building production in conditions of risks]. *Vestnik MGSU*. 2010; 2: 267 – 271. EDN: MUXQOT. (In Russ.)

3. Chen, Yi., Zhu, D., Tian, Z., Guo, Q. Factors influencing construction time performance of prefabricated house building: A multi-case study. *Habitat International*. 2023; Vol. 131, <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2022.102731>

4. Oparina, L.A. Application of information modelling technologies for construction time management. *Smart Composite in Construction*. 2021; Vol. 2. № 2: 48-55. DOI: 10.52957/27821919\_2021\_2\_48. EDN: KNJPXR

5. O'Neill, C., Gopaldasani, V., Coman, R. Factors that influence the effective use of safe work method statements for high-risk construction work in Australia – A literature review *Safety Science*. 2022; Vol. 147, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105628>

6. Vivek, A., Rao, H. Identification and analysing of risk factors affecting cost of construction projects. *International Conference on Latest Developments in Materials & Manufacturing*. 2022; Vol. 60, Part 3: 1696-1701, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.228>

7. Doronkina L. N. O sovershenstvovanii metodov analiza i upravleniya riskom investicionno-stroitel'nogo kompleksa [On improving the methods of analysis and risk management of the investment and building complex]. *Jekonomika stroitel'stva*. 2014; 2 (26): 53 – 55. EDN: RXFBWB (In Russ.)

8. Borisjuk N. K., Smotrina O. S. K voprosu funkcionirovaniya predpriyatija v nestabil'noj vneshnej srede [On the issue of the functioning of the enterprise in an unstable external environment]. *Intellekt. Innovacii. Investicii*. 2022; 2: 24-30, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-2-24>. EDN: XLJDGS. (In Russ.)

9. Vahrusheva E. A. Sem' raz otmer'... Metodicheskie osnovy analiza, ocenki i upravleniya investicionnyh riskov i garantii vozvrata investicij [Seven times measure... Methodological foundations of analysis, assessment and management of investment risks and guarantees of return on investment]. *Kreativnaja*

*jeconomika*. 2009; 3 (27): 155 – 159. EDN: JZBKIB. (In Russ.)

10. Markin V. S., Mizja M. S. Upravljencheskie metody minimizacii riskov investicionno-stroitel'nyh proektov v uslovijah neopredelennosti [Management methods of minimizing the risks of investment and construction projects in conditions of uncertainty]. *Vestnik Sibirskogo instituta biznesa i informacionnyh tehnologij*. 2020; 4 (36): 52 – 57. DOI: 10.24411/2225-8264-2020-10067. EDN: KWGSSG. (In Russ.)

11. Sujkova O. A., Kudrjashova E. V. Upravlenie riskami innovacionnogo proekta [Risk management of an innovative project]. *Innovacionnoe razvitie professional'nogo obrazovanija*. 2020; 1 (25): 96 – 101. EDN: XDCWPC. (In Russ.)

12. Sadykova Z. F., Abaev V. A. Ocenka investicionnoj strategii organizacii v uslovijah neopredelennosti [Assessment of an organization's investment strategy under conditions of uncertainty]. *Upravlenie riskami v APK*. 2019; 1 (29): 6 – 15. EDN: UNTCOP. (In Russ.)

13. Bobrova T.V., Ratanin M.S., Timofeeva E.P. Information modeling of organization of bridges' construction under stochastic uncertainty of time parameters. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018;15 (3): 422 – 433. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-3-422-433>

14. Teplova T. Upravlenie investicionnym procesom kompanii v uslovijah neopredelennosti [Managing the company's investment process under conditions of uncertainty]. *Problemy teorii i praktiki upravlenija*. 2006; 7: 93 – 104. EDN: KWFQDD. (In Russ.)

15. Larin S.N. Using of the mechanism of the procedure of the dynamic systemic analysis for the uncertainty management in the housing and public utility sector. *Economy and Business: Theory and Practice*. 2019; № 10-2 (56): 21 – 26. DOI: 0.24411/2411-0450-2019-11247. EDN: XFSMEG.

16. Zelencov L. B. Realizacija stroitel'nyh proektov izmenjaemogo funkcional'nogo naznacheniya [Implementation of building projects of variable functional purpose]. *Stroitel'noe proizvodstvo*. 2021; 2: 26 – 32. DOI: 10.54950/26585340\_2021\_2\_26. EDN: BZKXLZ. (In Russ.)

17. Francen G. E., Mozgovaja Ja. G. Organizacionnaja model' realizacii investicionnogo proekta v stroitel'stve [Organizational model for the implementation of an investment project in building]. *Polzunovskij al'manah*. 2016; 1: 207 – 211. EDN: XQSXZJ. (In Russ.)

18. Safarjan G. B. Kriticheskij analiz obobshhennoj modeli stroitel'noj sistemy [Critical analysis of the generalized model of the building system]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie*. 2021; T. 11. № 4: 41 – 47. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.4.4. EDN: PFGTCK. (In Russ.)

19. Yilmaz, S., Irmak, M.A., Qaid, A. Assessing the effects of different urban landscapes and built environment patterns on thermal comfort and air pollution in Erzurum city, Turkey. *Building and Environment*. 2022; Vol. 219. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109210.

20. Bedilo M. V., Berdashev B. Zh., Butuzov S. Ju. Model' adaptivnogo upravlenija podrazdelenijami v chrezvychajnyh situacijah [Model of adaptive management of departments in emergency situations]. *Tehnologii tehnosfernoj bezopasnosti*. 2013; 4 (50): 14. EDN: SCCPPH. (In Russ.)

21. Rodin D. A. Uchet faktorov neopredelennosti i riska pri ocenke investicionnyh proektov [Consideration of uncertainty and risk factors in the evaluation of investment projects]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy poligrafii i izdatel'skogo dela*. 2022; 3-4: 19 – 25. EDN: TJRDTU. (In Russ.)

22. Saidov M.-P. A. Ocenka voznikovenija riskov pri upravlenii investicionnymi proektami v uslovijah neopredelennosti [Assessment of the occurrence of risks in the management of investment projects under conditions of uncertainty]. *Transportnoe delo Rossii*. 2010; 3: 55 – 56. EDN: QAVDNB. (In Russ.)

23. Caron, G. M., Savéant, P., Schoenauer M. Multiobjective tactical planning under uncertainty for air traffic flow and capacity management. *IEEE Congress on Evolutionary Computation [Submitted on 16 Sep 2013]*. 2013: 1548-1555, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1309.4085>.

24. Zhang, X., Mahadevan, S. Aircraft re-routing optimization and performance assessment under uncertainty. *Decision Support Systems*. 2017; Vol. 96:20-26, <https://doi.org/10.1016/j.dss.2017.02.005>.

25. Díaz-López, C., Serrano-Jiménez, A., Verichev, K., Barrios-Padura, A. Passive cooling strategies to optimise sustainability and environmental ergonomics in Mediterranean schools based on a critical review. *Building and Environment*. 2022; Vol. 221. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109297.

26. Meskhi, B. C., Evtushenko, A. I., Sidelnikova, O. P. Radiation and environmental studies of the air of industrial premises of construction industry plants in the cities of Volgograd and Rostov regions. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/1001/1/012108.

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Сизен Н. О. Моделирование диагностики факторов риска и неопределённости в современном строительстве.*

*Дедловский В. М. Ранжирование рисков по уровню их влияния на стабильность хода строительства.*

*Побегайлов О. А. Написание остальных разделов статьи, общее редактирование.*

## COAUTHORS' CONTRIBUTION

*Nikolai O. Sizen. Modelling of risk factors and uncertainty diagnostics in modern construction.*

*Vadim M. Dedlovskii. Risk ranking according to the influence level on the stability of the construction process.*

*O. A. Pobegailov. Writing the remaining sections of the article, general editing.*

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Побегайлов Олег Анатольевич – канд. экон. наук, доц., доц. кафедры «Организация строительства», SPIN-код: 6802-2206.*

*Сизен Николай Олегович – студент.*

*Дедловский Вадим Михайлович – магистрант.*

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Oleg A. Pobegailov. Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor of the "Organization of Construction Department, SPIN-код: 6802-2206.*

*Nikolai O. Sizen. Student.*

*Vadim M. Dedlovskii. Master's student.*

## 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 <http://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](http://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](http://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](http://vestnik.sibadi.org).

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, организационных или структурных диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. Если было получено много похожих зависимостей, представляемых в виде графиков, то приведите только один типичный график, а данные об имеющихся количественных отличиях между ними, представьте в таблице.

Способы представления результатов представлено на сайте журнала [vestnik.sibadi.org](http://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](http://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 упоминании 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 подрисовочной 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 – подрисовочные подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть яркими и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы предоставляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

**Общий порядок опубликования**

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятыми редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

- с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;
- согласие на обработку персональных данных в научном периодическом издании;

При регистрации присваивается дата поступления и регистрационный номер статьи. Статьи регистрируются через электронную редакцию. Регистрация осуществляется бесплатно.

**Первичная экспертиза на соответствие требованиям и профилю журнала (модерация).** Зарегистрированные рукописи статей проходят первичную экспертизу на соответствие требованиям и профилю журнала. Началом для экспертизы рукописи статьи редакцией является дата регистрации статьи. Редакция журнала оставляет за собой право отбора присылаемых материалов. Только прошедшие первичную экспертизу рукописи статей, полностью соответствующие требованиям редакции журнала, соответствующие профилю журнала, получают статус «Принята к рассмотрению». Для них отдельно регистрируется дата приема рукописи статьи к рассмотрению.

**Рецензирование.** Принятые к рассмотрению рукописи статей направляются на слепое рецензирование для оценки их научного содержания нескольким специалистам соответствующего профиля, членам редакционной коллегии и/или редакционного совета. Экспертиза и рецензирование осуществляются бесплатно.

Решение о принятии к публикации основывается на поступивших рекомендациях рецензентов журнала. Если принято решение «рекомендовать с учетом исправления отмеченных недостатков», то автору направляются рекомендации и вопросы для исправления. Рукопись статьи, скорректированная автором, повторно направляется на рецензирование. Рукописи статей, не рекомендованные к публикации, повторно не рассматриваются. Автору рукописи направляется мотивированный отказ в публикации.

**Редакционная подготовка.** Рукописи статей, принятые к публикации, проходят редакционную подготовку к публикации – литературное редактирование и сверку данных, корректуру, форматирование, макетирование. Общий срок редакционной подготовки статьи, успешно прошедшей рецензирование, составляет 2 месяца в соответствии с периодичностью и графиком публикации выпусков. Корректурная статья 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.