

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



научный рецензируемый журнал

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

**СИБАДИ** •

“Vestnik SibADI”

Том 20, № 6. 2023  
Vol.20, No. 6. 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: 10.26518/2071-7296-2023-20-6

ТОМ 20, № 6. 2023

VOL. 20, No. 6. 2023

Сквозной номер выпуска – 94

Continuous issue – 94



**Учредитель и издатель:**

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

644050, г. Омск, проспект Мира, 5  
Тел. +7 (3812) 65-03-23;

**АДРЕС РЕДАКЦИИ**

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

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

**Founder and Publisher:**

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

644050, Omsk, 5, Mira Ave.  
Phone: +7 (3812) 65-03-23

**EDITORIAL POSTAL ADDRESS**

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

Published since 2004  
by 6 issues per year

Subscription index is 66000  
in the Ural-Press catalog

[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 взыскательной экспертной оценки, а также проверку статей на плагиат.

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

**Журнал индексируется и архивируется:**

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

**Журнал является членом:**

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), CrossRef

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Подписано в печать 20.12.2023. Дата выхода в свет 26.12.2023. 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 20.12.2023. Publication date is 26.12.2023. 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-ЮГРБ», г. Сургут, Россия  
**Scopus Author ID** 10040194400, **Researcher ID** AAM-4262-2021,  
**ORCID ID** 0000-0001-7843-7278

**Гумаров Гали Сагингаиевич**, 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.Н. Поликарпова ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева» г. Орел, Россия  
**Scopus Author ID** 57077906200, **Researcher ID** B-9082-2016,  
**ORCID** ID 0000-0001-5496-4997

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**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

*М.И. Зенин, С.В. Иванов*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ВИНТОВОГО БУРА МЕРЗЛЫМ ГРУНТОМ..... 696**

*И.С. Тюремнов*

**АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ  
УДАРНО-ВИБРАЦИОННЫХ ГРУНТОУПЛОТНЯЮЩИХ МАШИН ..... 706**

## РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

*Д.А. Дрючин*

**ОПТИМИЗАЦИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ ГОРОДСКОГО НАЗЕМНОГО ПАССАЖИРСКОГО  
ТРАНСПОРТА ..... 718**

*С.В. Пашукевич*

**АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МОТОРНОГО МАСЛА  
ВСЛЕДСТВИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДОЙ И ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ ..... 728**

*Л.С. Трофимова, Н.В. Ловыгина, П.В. Кочубей*

**ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА  
В МЕЖДУНАРОДНОМ СООБЩЕНИИ С УЧЕТОМ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ  
К ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕВОЗКИ ГРУЗОВ..... 738**

*Н. Н. Якунин, Н. В. Якунина, И. И. Любимов*

**РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПАССАЖИРСКИЕ АВТОТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ:  
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ..... 748**

*И. Н. Пугачев, А. В. Казарбин*

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ СТРАНЫ  
И ЕЕ РЕГИОНОВ ПОСРЕДСТВОМ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ  
ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ..... 762**

## РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

*Т.В. Боброва, Е.А. Покалюхина*

**УРОВНИ ПРОРАБОТКИ МОДЕЛИ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНА  
СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ НА СТАДИЯХ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ..... 774**

*Г.Ю. Гончарова, В.В. Сиротюк, О.В. Якименко, П.В. Орлов, Р.Е. Долгодворов*

**ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЛЕДОВЫХ  
АВТОЗИМНИКОВ С ПОМОЩЬЮ АРМИРОВАНИЯ И МОДИФИКАЦИИ ЛЬДА... 786**

*О.Н. Ильина*

**РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД С ПРИМЕНЕНИЕМ  
ЦЕОЛИТА ТАТАРСКО-ШАТРАШАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ..... 798**

*Е. В. Кравчук, И. Ю. Белуцкий, В. А. Кравчук*

**ВИБРАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ СТАЛЬНЫХ БАЛОК,  
ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ВЫТЯЖКОЙ СТЕНКИ ..... 808**

## PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

*Maksim I. Zenin, Sergei V. Ivanov*

**EXPERIMENTAL STUDIES OF SCREW DRILL  
WITH FROZEN SOIL INTERACTION ..... 697**

*Ivan S. Tyuremnov*

**TECHNICAL PARAMETERS ANALYSES OF DIFFERENT TYPES  
OF IMPACT-VIBRATION SOIL COMPACTING MACHINES..... 707**

## PART II. TRANSPORT

*Dmitry A. Dryuchin*

**OPTIMIZATION OF FUEL AND ENERGY INFRASTRUCTURE  
FOR URBAN GROUND PASSENGER TRANSPORT SYSTEM ..... 719**

*Sofia V. Pashukevich*

**MOTOR OIL PERFORMANCE ANALYSIS DUE TO WATER  
AND COOLANT CONTAMINATION ..... 729**

*Ludmila S. Trofimova, Nadeshda V. Lovygina, Polina V. Kochubei*

**PLANNING ROLLING STOCK OPERATION IN INTERNATIONAL  
COMMUNICATIONS WITH MODERN REQUIREMENTS  
TO CARGO TRANSPORTATION TECHNOLOGY ..... 739**

*Nikolai N. Yakunin, Natalia V. Yakunina, Igor I. Lyubimov*

**REGIONAL PASSENGER MOTOR TRANSPORT SYSTEMS:  
PROBLEM STATEMENT, FIRST ESTIMATION RESULTS ..... 749**

*Igor N. Pugachev, Aleksei V. Kazarbin*

**IMPROVEMENT COUNTRY'S TRANSPORT SYSTEM  
AND ITS REGIONS THROUGH DIGITAL TRANSFORMATION  
OF THE RUSSIAN TRANSPORT INDUSTRY ..... 763**

## PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

*Tatiana V. Bobrova, Elena A. Pokalyukhina*

**DEVELOPMENT LEVELS FOR TIME PLANNING MODEL  
OF ROAD CONSTRUCTION AT DESIGN STAGE..... 775**

*Galina Y. Goncharova, Viktor V. Sirotiuk, Olga V. Yakimenko, Pavel V. Orlov, Roman E. Dolgodvorov*

**LOAD-BEARING CAPACITY AND SAFETY FOR WINTER ROADS  
IMPROVEMENT USING REINFORCEMENT AND ICE MODIFICATION ..... 787**

*Olga N. Ilina*

**DEVELOPMENT OF ROAD PAVEMENT STRUCTURES USING ZEOLITE  
OF THE TATARSKO-SHATRASHANSKOE DEPOSIT ..... 799**

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

**VIBRATION RELIABILITY OF STEEL BEAMS PRESTRESSED BY DRAWING ..... 809**



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



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

Научная статья  
УДК 624.139  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-696-705>  
EDN: CQICCH



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИНТОВОГО БУРА МЕРЗЛЫМ ГРУНТОМ

**М.И. Зенин\*, С.В. Иванов**

ФГБОУ ВО «СГТУ имени Ю.А. Гагарина»,  
г. Саратов, Россия

[zenin-1995@mail.ru](mailto:zenin-1995@mail.ru), <http://orcid.org/0000-0001-5296-6841>

[serezha\\_ivanov\\_vik@mail.ru](mailto:serezha_ivanov_vik@mail.ru), <http://orcid.org/0009-0007-5110-6349>

\*ответственный автор

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Процесс образования скважин в мерзлых грунтах является одним из сложных процессов производства земляных работ. Буровой инструмент новой геометрической формы образует скважину хрупким разрушением породы. Целью проведенных экспериментальных исследований являлось определить влияние на энергоемкость процесса бурения и на коэффициент диаметра скважины угла поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит его приращение на разрушающей части и угла наклона образующей верхней поверхности винтовой лопасти к оси вращения.

**Материалы и методы.** В статье описана методика проведения лабораторных экспериментов изучения процесса взаимодействия бурового инструмента новой геометрической формы с мерзлыми грунтами. Определены диапазоны значений исследуемых факторов. Построена матрица полного факторного эксперимента.

**Результаты.** В результате лабораторных экспериментов было определено влияние геометрических параметров бурового инструмента на энергоемкость процесса бурения и на коэффициент диаметра скважины. Установлены зависимости крутящего момента и коэффициент диаметра скважины от угла поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит его приращение на разрушающей части угла наклона образующей верхней поверхности винтовой лопасти к оси вращения и угла подъема средней винтовой линии винтовой лопасти.

**Заключение.** Установлено, что буровой инструмент осуществляет образование скважины за счет ее хрупкого разрушения, что позволяет достигать более эффективного бурения. А также определены зависимости рациональных значений исследуемых геометрических параметров бурового инструмента новой геометрической формы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** винтовой рабочий орган, мерзлый грунт, бурение мерзлого грунта, винтовая лопасть, откол грунта, внедрение лопасти, разрушающая часть, буровой инструмент

Статья поступила в редакцию 13.10.2023; одобрена после рецензирования 16.11.2023; принята к публикации 20.12.2023.

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: Зенин М.И., Иванов С.В. Экспериментальные исследования взаимодействия винтового бура с мерзлым грунтом // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6 (94). С. 696-705. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-696-705>

© Зенин М.И., Иванов С.В., 2023



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-696-705>  
EDN: CQICCH

## EXPERIMENTAL STUDIES OF SCREW DRILL WITH FROZEN SOIL INTERACTION

**Maksim I. Zenin\***, **Sergei V. Ivanov**

*Yu. A. Gagarin Saratov State Technical University,  
Saratov, Russia*

*zenin-1995@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5296-6841>  
serezha\_ivanov\_vik@mail.ru, <http://orcid.org/>  
\*corresponding author*

### ABSTRACT

**Introduction.** The process of formation of wells in frozen soils is one of the complex processes of excavation. A drilling tool of a new geometric shape forms a well by brittle destruction of the rock. The purpose of the conducted experimental studies was to determine the effect on the energy intensity of the drilling process and on the well diameter coefficient of the angle of rotation of the radius of the screw blade, at which its increment occurs on the destructive part and the angle of inclination of the forming upper surface of the screw blade to the axis of rotation.

**Materials and methods.** The article describes a methodology for conducting laboratory experiments to study the interaction of a drilling tool of a new geometric shape with frozen soils. The ranges of values of the studied factors are determined. The matrix of the complete factorial experiment is constructed.

**Results.** As a result of laboratory experiments, the influence of the geometric parameters of the drilling tool on the energy intensity of the drilling process and on the well diameter coefficient was determined. The dependencies of the torque and the well diameter coefficient on the angle of rotation of the radius of the helical blade, at which its increment occurs on the destructive part, the angle of inclination of the forming upper surface of the helical blade to the axis of rotation and the angle of elevation of the middle helical line of the helical blade are established.

**Discussions and conclusion.** It is established that the drilling tool carries out the formation of a well due to the brittle destruction of the well, which makes it possible to achieve more efficient drilling. And also the dependences of the rational values of the investigated geometric parameters of the drilling tool of a new geometric shape are determined.

**KEYWORDS:** screw working body, frozen ground, frozen ground drilling, screw blade, ground break, blade insertion, breaking part, drilling tool

**The article was submitted 13.10.2023; approved after reviewing 16.11.2023; accepted for publication 20.12.2023.**

**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: Zenin M.I., Ivanov S.V. Experimental studies of screw drill with frozen soil interaction. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2023; 20 (6): 696-705. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-696-705>*

© Zenin M. I., Ivanov S. V., 2023



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

## ВВЕДЕНИЕ

На большей части территории России распространено сезонное промерзание грунтов, а более 60% занимают многолетнемерзлые породы. В связи с активным освоением этих территорий возникают трудности при бурении грунтов. Причиной этого является достаточно сложная структура мерзлых грунтов, которые характеризуются особенностью физико-механических свойств, высокой прочностью и абразивностью. В большинстве случаев при механическом вращательном бурении применяются два способа разрушения: резание и дробящее действие. Такие характеры деформации являются энергоемкими [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Производство таких работ требует, как правило, применения машин повышенной мощности и, соответственно, повышенных энергетических затрат. Несмотря на имеющееся огромное разнообразие средств механизации, методов и совершенствования технологий, вопрос механизации зимних земляных работ остается до конца не решенным [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26].

Бурение мерзлого грунта предлагаемым буровым инструментом новой геометрической формы осуществляется деформацией отрыва грунта. Такой процесс обеспечивает образование скважины при меньших энергозатратах по сравнению с другими буровыми инструментами. Предлагаемый буровой инструмент условно состоит из заходной и разрушающей частей. Заходная часть обеспечивает тяговое усилие, необходимое для его работы. Разрушающая часть содержит винтовую лопасть с переменными геометрическими параметрами. На разрушающей части лопасть имеет постоянный шаг и переменный радиус, изменяющийся при повороте радиуса на определенный угол ( $\psi$ ), при этом изменяется наклон верхней образующей поверхности винтовой лопасти к оси вращения – от острого до прямого угла [27, 28].

На данный момент процесс взаимодействия бурового инструмента новой геометрической формы с мерзлым грунтом для образования скважины не изучен и требует дальнейших исследований.

При изучении процесса разрушения мерзлого грунта винтовым буром основными задачами экспериментальных исследований являлось:

– определить влияние на крутящий момент бурового инструмента и на коэффициент диаметра скважины угла поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит его приращение на разрушающей части  $\psi$  и угла наклона образующей верхней поверхности винтовой лопасти к оси вращения  $\alpha$ ;

– определение рациональных значений угла поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит его приращение на разрушающей части  $\psi$  и угла наклона образующей верхней поверхности винтовой лопасти к оси вращения  $\alpha$ .

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Лабораторные экспериментальные исследования проводились на лабораторном стенде (рисунок 1), который был оснащен оборудованием и приспособлениями, позволяющими производить и изучать процесс бурения моделями винтовых буров в форме с мерзлым грунтом.

Лабораторный стенд был оснащен комплексом контрольно-измерительной аппаратуры: тензометрический прибор с цифровым дисплеем для регистрации сигнала от датчика усилия сжатия, цифровой лазерный счетчик оборотов вращения модели винтового бура. Перед началом опыта и после его окончания производилась тарировка датчиков.

Экспериментальные исследования осуществлялись на искусственно приготовленных образцах мерзлого грунта. В качестве мерзлых грунтов в экспериментах использовались мерзлый песок, мерзлый суглинок и мерзлая супесь. Наибольший интерес представлял мерзлый песок. Выбор этого грунта для изучения физического процесса взаимодействия бурового инструмента определялся тем, что мерзлый песок представляет собой материал с хрупкими свойствами. Для достижения массивной криогенной текстуры грунт в форме замораживался в холодильной камере при температуре и выдерживался не менее 48 ч при заданной температуре. Температура грунта в большинстве опытов была от до . Влажность при этом составляла в среднем: для песка – 15%, для супеси – 18%, для суглинка – 20%. Показатель прочности подготовленных образцов грунта по числу ударов плотномера ДорНИИ составлял от 420 до 550 ударов.

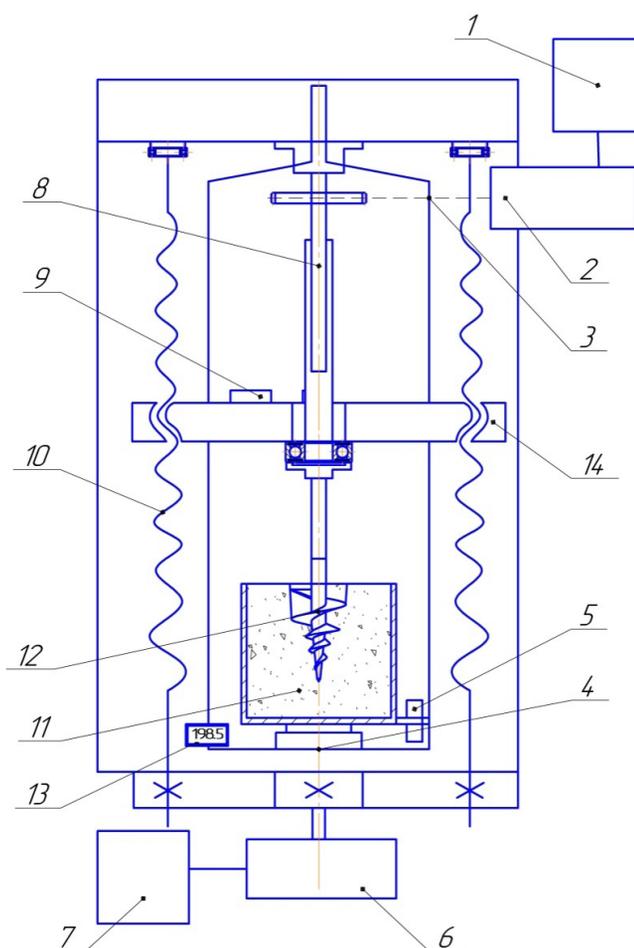


Рисунок 1 – Лабораторный стенд для экспериментальных исследований процесса бурения:  
 1 – двигатель вращения бура; 2 – редуктор конический; 3 – цепная передача;  
 4 – поворотная площадка; 5 – датчик крутящего момента; 6 – редуктор;  
 7 – двигатель для вращения винтов; 8 – телескопическая штанга;  
 9 – лазерный датчик оборотов; 10 – ходовые винты;  
 11 – форма с подготовленным грунтом; 12 – буровой инструмент; 13 – динамометр;  
 14 – подвижная траверса  
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Laboratory stand for experimental studies of the drilling process:  
 1 – drill rotation motor; 2 – bevel gear; 3 – chain transmission; 4 – turntable;  
 5 – torque sensor; 6 – gearbox; 7 – motor for rotating screws; 8 – telescopic rod;  
 9 – laser speed sensor; 10 – way screws; 11 – mold with prepared soil; 12 – drilling tool;  
 13 – dynamometer; 14 – movable traverse  
 Source: compiled by the authors.

Лабораторные экспериментальные исследования проводились следующим образом. На лабораторный стенд устанавливалась форма с подготовленным мерзлым грунтом, буровому инструменту придавалось вращательное движение и начальное задавливающее осевое усилие.

Экспериментальные исследования осуществлялись на масштабных моделях бурово-

го инструмента [29]. Варьирование изучаемых параметров моделей бурового инструмента осуществлялось по таблице.

Варианты исследуемых моделей винтовых буров представлены на рисунке 2. В качестве переменных факторов были выбраны следующие геометрические параметры бурового инструмента:

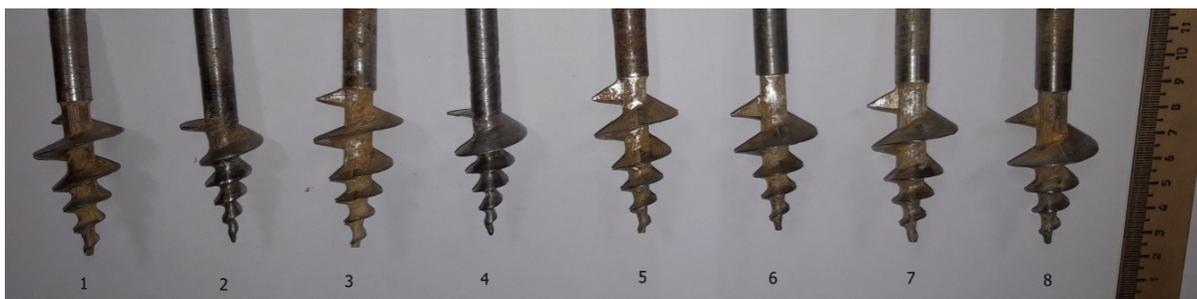


Рисунок 2 – Исследуемые модели буровых инструментов:  
 1 -  $\psi=270^\circ$ ,  $\alpha=70^\circ$ ; 2 -  $\psi=90^\circ$ ,  $\alpha=70^\circ$ ; 3 -  $\psi=270^\circ$ ,  $\alpha=70^\circ$ ; 4 -  $\psi=90^\circ$ ,  $\alpha=70^\circ$ ;  
 5 -  $\psi=270^\circ$ ,  $\alpha=60^\circ$ ; 6 -  $\psi=90^\circ$ ,  $\alpha=60^\circ$ ; 7 -  $\psi=90^\circ$ ,  $\alpha=60^\circ$ ; 8 -  $\psi=270^\circ$ ,  $\alpha=60^\circ$ ;  
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Investigated models of screw drills:  
 1 -  $\psi=270^\circ$ ,  $\alpha=70^\circ$ ; 2 -  $\psi=90^\circ$ ,  $\alpha=70^\circ$ ; 3 -  $\psi=270^\circ$ ,  $\alpha=70^\circ$ ; 4 -  $\psi=90^\circ$ ,  $\alpha=70^\circ$ ;  
 5 -  $\psi=270^\circ$ ,  $\alpha=60^\circ$ ; 6 -  $\psi=90^\circ$ ,  $\alpha=60^\circ$ ; 7 -  $\psi=90^\circ$ ,  $\alpha=60^\circ$ ; 8 -  $\psi=270^\circ$ ,  $\alpha=60^\circ$ ;  
 Source: compiled by the authors.

–  $\psi$  – угол поворота радиуса винтовой лопасти, при котором происходит его приращение на разрушающей части, град;

–  $\alpha$  – угол наклона образующей верхней поверхности винтовой лопасти к оси вращения, град;

В теоретических исследованиях [28] были определены диапазоны значений следующих факторов: угол наклона  $\alpha$  находится в диапазоне от 60 до 70. Диапазон значения угла поворота  $\psi$  находится в диапазоне значений от 90 до 270. Уровни варьирования геометрических параметров исследуемых моделей винтовых буров представлены в таблице.

Для проведения экспериментальных исследований использовалась матрица полного факторного эксперимента для числа незави-

симых переменных  $m = 2$ , предусматривающих проведение 24 опытов.

В ходе лабораторных экспериментов осуществлялась фиксация крутящего момента процесса бурения мерзлого грунта по средствам тензометрического прибора с цифровым дисплеем для регистрации сигнала от датчика усилия сжатия. Диаметр скважины замерялся при помощи штангельциркуля. Погрешность измеряемых значений составляла 5%.

На рисунке 3 представлена картина процесса разрушения мерзлого песка деформацией отрыва на поверхности грунта.

После проведения опытов происходила обработка полученных результатов. Производилось отсеивание ошибочных результатов по среднему квадратическому отклонению.

Таблица  
 Параметры исследуемых моделей буровых инструментов  
 Источник: составлено авторами.

Table  
 Parameters of the investigated models of drilling tools  
 Source: compiled by the authors.

	Факторы	
	$\psi$	$\alpha$
Верхний уровень	270°	70°
Нижний уровень	90°	60°
Основной уровень	180°	65°
Интервал варьирования	90°	5°

Далее производилась проверка однородности дисперсии с помощью критерия Кохрена, при проверке адекватности вычисления использовался F-критерий Фишера и проверку значимости коэффициентов определяли с помощью критерия Стьюдента.

В результате реализации многофакторного плана лабораторных экспериментов были получены функциональные зависимости критериев работоспособности от геометрических параметров бурового инструмента новой геометрической формы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

График зависимостей исследуемых геометрических параметров на крутящий момент  $M$  буровым инструментом новой геометрической формы представлен на рисунке 4.



Рисунок 3 – Процесс разрушения грунта буровым инструментом  
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – The process of soil destruction by drilling tools  
Source: compiled by the authors.

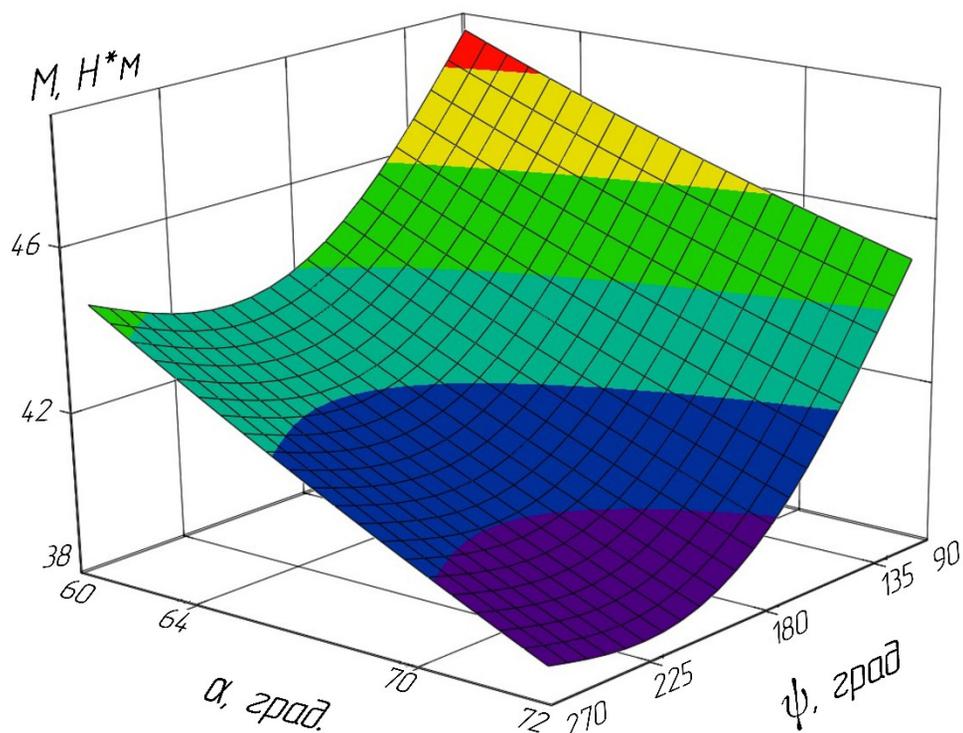


Рисунок 4 – График зависимости крутящего момента  $M$  от угла поворота радиуса  $\psi$  и угла наклона  $\alpha$   
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Graph of the dependence of the torque  $M$  on the angle of  $\psi$  rotation and  $\alpha$  angle of inclination  $\alpha$   
Source: compiled by the authors.

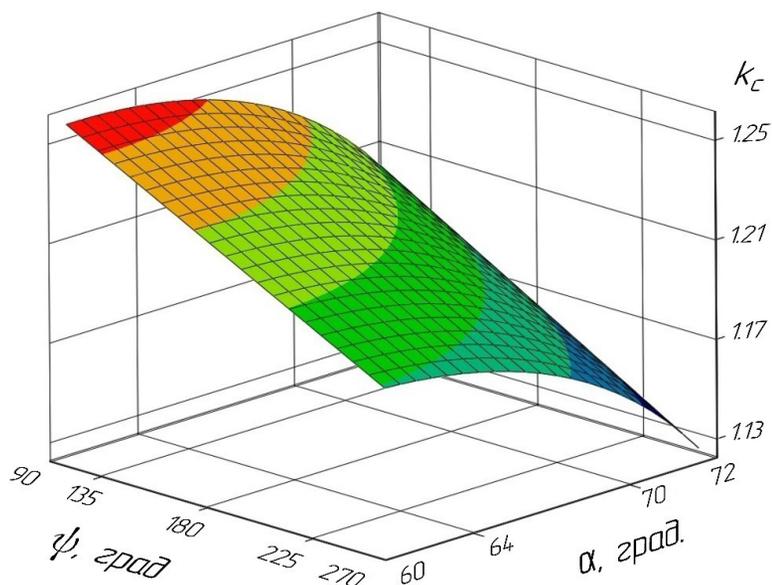


Рисунок 5 – График зависимости коэффициента диаметра скважины от угла поворота и угла наклона  
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Graph of the dependence of the well diameter coefficient on  $\psi$  angle of rotation and  $\alpha$  angle of inclination:  
 Source: compiled by the authors.

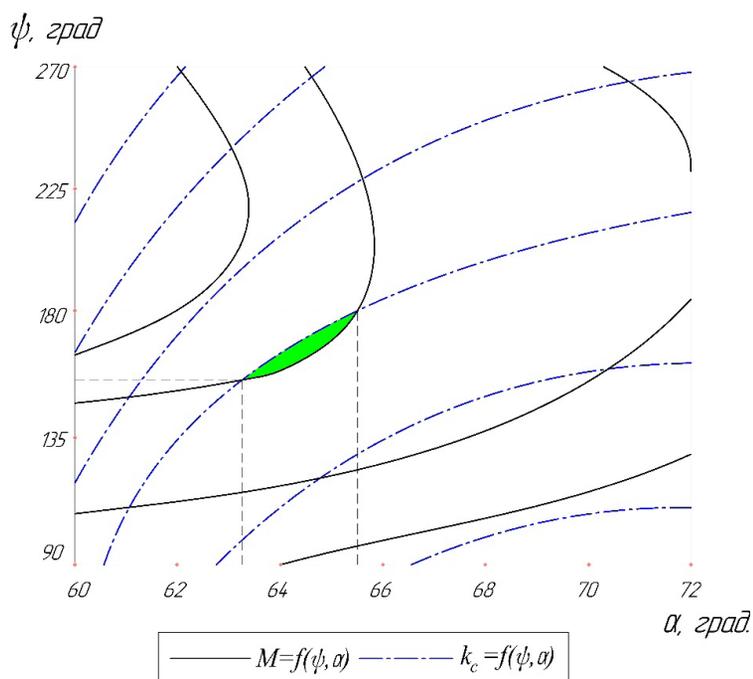


Рисунок 6 – График зависимости крутящего момента  $M$  и коэффициента от угла поворота и от угла наклона  
 Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Graph of the dependence of  $M$  torque and coefficient on  $\psi$  angle of rotation and on  $\alpha$  angle of inclination  
 Source: compiled by the authors.

Изменение значения угла наклона винтовой лопасти  $\alpha$  находящийся в диапазоне от  $60^\circ$  до  $70^\circ$ , приводит к уменьшению значения величины крутящего момента сначала на 5%. Увеличение угла поворота радиуса винтовой лопасти бурового инструмента в диапазоне от  $90^\circ$  до  $270^\circ$  приводит к уменьшению значения величины крутящего момента на 19%.

График зависимости коэффициента диаметра скважины от исследуемых геометрических параметров представлен на рисунке 5.

На рисунке 5 видно, что большее влияние на коэффициент диаметра скважины оказывает угол наклона  $\alpha$ . С увеличением угла наклона  $\alpha$  происходит увеличение коэффициента диаметра скважины на 8%. Меньшее влияние оказывает угол поворота  $\psi$ , увеличение коэффициента диаметра скважины происходит на 6%.

График зависимостей крутящего момента  $M$  и коэффициента  $k_c$  от угла поворота  $\psi$  и от угла наклона  $\alpha$  представлен на рисунке 6.

Оценка полученных результатов исследований, в том числе визуальных наблюдений в ходе опытов с испытуемыми моделями винтовых буров, подтвердила ранее полученные выводы о том, что на эффективность процесса разрушения грунта деформацией отрыва основное влияние оказывает угол поворота  $\psi$ . При рациональном значении данного угла снижаются значения величины крутящего момента на 15–25% и увеличивается значение коэффициента скважины на 6%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа следует, что для обеспечения минимального значения крутящего момента бурового инструмента и максимального значения коэффициента увеличения диаметра ствола скважины  $k_c$  необходимо использование бурового инструмента со следующими значениями геометрических параметров: угол поворота  $\psi=170-180^\circ$  и угол наклона  $\alpha=63-65^\circ$ .

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Lev V. E., Lev V. E., Izzy M. K. Well drilling in permafrost regions: dynamics of the thawed zone. *Polar Research*. 2019. vol. 38.
2. Shan W. et al. Resistivity Model of Frozen Soil and High-Density Resistivity Method for Exploration Discontinuous Permafrost. *Electrical Resistivity and Conductivity*. 2017. pp. 23-52.
3. Cao P. et al. Experimental study of the drilling process in debris-rich ice. *Cold Regions Science and Technology*. 2015. vol. 120. pp. 138-144.
4. Zubrzycki S. Drilling frozen soils in Siberia. *Polarforschung*. 2012, vol. 81, no. 2, pp. 151-153.
5. Arenson L. U., Springman S. M. Mathematical descriptions for the behaviour of ice-rich frozen soils at temperatures close to 0 C // *Canadian Geotechnical Journal*. 2005. T. 42. №. 2. С. 431-442.
6. Герасимов Д. С. [и др.] О влиянии режима нагружения на механические свойства мерзлых грунтов // *Наземные транспортно-технологические комплексы и средства*. 2016. С. 73–77.
7. Yang Z. J., Still B., Ge X. Mechanical properties of seasonally frozen and permafrost soils at high strain rate. *Cold regions science and technology*. 2015, vol. 113, pp. 12-19.
8. Aksenov, V.I., Kal'bergenov, R.G. & Leonov, A.R. Strength Characteristics of Frozen Saline Soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2003, vol. 40, pp. 55–59.
9. Yang Y., Lai Y., Chang X. Laboratory and theoretical investigations on the deformation and strength behaviors of artificial frozen soil // *Cold regions science and technology*. 2010. T. 64. №. 1. P. 39-45.
10. Zhou G. et al. Laboratory investigation on tensile strength characteristics of warm frozen soils // *Cold Regions Science and Technology*. 2015. T. 113. P. 81-90.
11. Тимофеев Н.Г., Жирков А.Н. Концепция разработки инновационного породоразрушающего инструмента для бурения скважин в условиях криолитозоны // *Евразийский союз ученых*. 2015. № 4. С. 151–154.
12. Talalay P. G. Introduction to Ice Drilling Technology. *Mechanical Ice Drilling Technology*. Springer, Singapore, 2016. pp. 1-8.
13. Ивкин В.С., Алашеев М. О. Влияние физико-механических свойств грунтов на работу машин для земляных работ // *Вестник УлГТУ*. 2015. № 3. С. 62–67.
14. Ивкин В. С., Вунберова Н. П. Малообъемные, рассредоточенные зимние земляные работы в стесненных условиях строительства // *Вестник Ульяновского государственного технического университета*. 2018. №. 2. С.52–55.
15. Валигура Н. С. Способы бурения неглубоких скважин // *Разведка и охрана недр*. 2014. №. 2. С. 27–30.
16. Тимофеев Н.Г., Скрябин Р.М., Яковлев Б.В. Повышение эффективности работы породоразрушающего инструмента при бурении скважин в многолетнемерзлых породах // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017. № 6 С. 105–113.
17. Du H. Strength properties of icy frozen silt sands under uniaxial compression for a wide range of strain rates and moisture content. *Science and technology of coldregions*. 2016, no. 123, pp. 107-113.
18. Черкасов В. И. Области применения и проблемы бурения неглубоких скважин // *Разведка и охрана недр*. 2014. №. 2. С. 24–27.
19. Валигура Н. С. Породоразрушающие инструменты для вращательного бурения неглубоких скважин и их основные конструктивные особенности // *Разведка и охрана недр*. 2014. №. 2. С. 30–33.

20. Богомолов Р. М. [и др.] Бурение дополнительных боковых стволов долота PDC // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2018. № 2. С. 17–20.

21. Панин Н. М., Богомолов Р. М. Совершенствование промывки шарошечных буровых долот // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2020. № 9. С. 11–14.

22. Сериков Д. Ю. Анализ конструкций и технологий изготовления твердосплавного вооружения шарошечных буровых долот // Сфера. Нефть и Газ. 2017. № 1. С. 30–35.

23. Саленко А. Ф., Федотьев А. Н., Федотьев Н. А. Перспективы использования регенерированного твердого сплава для производства буровых долот // Вісник СевНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. 2014. № 150. С. 139–145.

24. Анализ проходки шарошечных долот в условиях Олимпиадинского ГОКа ЗАО «ПОЛЮС» / А.В. Гилев, К.А. Бовик, А.О. Шигин, И.Р. Белозеров // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. С. 153–153.

25. Zhiqiang H., Qin L., Yi Z., Shuang J., Yachao M., Wengang H., Yongtao F. Experimental research on the surface strengthening technology of roller cone bit bearing based on the failure analysis. *Engineering Failure Analysis*. 2013, no.12, pp. 12-26.

26. Бугаев В.Г., Ереско С. П., Бугаев И.В. Выбор и обоснование конструктивных параметров бурового режущего инструмента для проходки скважин в мерзлых грунтах // Горное оборудование и электромеханика. 2013. № 2. С. 6–13.

27. Мартюченко И.Г., Зенин М.И. Перспективы развития бурового инструмента для вечномёрзлых грунтов // Строительные и дорожные машины. 2019. № 9. С. 47–48.

28. Мартюченко И.Г., Зенин М.И. Взаимодействие винтовой лопасти бурового инструмента с мерзлым грунтом // Вестник СибАДИ. 2020; 17(2): 162–171. [https:// doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-162-171](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-162-171)

29. Баловнев В. И. [и др.] Определение оптимальных параметров транспортно-технологических машин методами теории подобных преобразований // Строительные и дорожные машины. 2019. № 12. С. 3–11.

## REFERENCES

1. Lev V. E., Lev V. E., Izzy M. K. Well drilling in permafrost regions: dynamics of the thawed zone. *Polar Research*. 2019; vol. 38: 1-9.

2. Shan W. et al. Resistivity Model of Frozen Soil and High-Density Resistivity Method for Exploration Discontinuous Permafrost. *Electrical Resistivity and Conductivity*. 2017: 23-52.

3. Cao P. et al. Experimental study of the drilling process in debris-rich ice. *Cold Regions Science and Technology*. 2015; vol. 120: 138-144.

4. Zubrzycki S. Drilling frozen soils in Siberia. *Polarforschung*. 2012; vol. 81, no. 2: 151-153.

5. Arenson L. U., Springman S. M. Mathematical descriptions for the behaviour of ice-rich frozen soils

at temperatures close to 0 C. *Canadian Geotechnical Journal*. 2005; vol. 42, no. 2: 431-442.

6. Gerasimov D. S. i dr. O vlijanii rezhima nagruzhzenija na mehanicheskie svojstva merzlyh gruntov [On the influence of the loading regime on the mechanical properties of frozen soils.]. *Nazemnye transportno-tehnologicheskie komplekсы i sredstva*. 2016; 73-77. (in Russ.)

7. Yang Z. J., Still B., Ge X. Mechanical properties of seasonally frozen and permafrost soils at high strain rate. *Cold regions science and technology*. 2015, vol. 113, pp. 12-19.

8. Aksenov, V.I., Kal'bergenov, R.G. & Leonov, A.R. Strength Characteristics of Frozen Saline Soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2003; vol. 40: 55–59

9. Yang Y., Lai Y., Chang X. Laboratory and theoretical investigations on the deformation and strength behaviors of artificial frozen soil. *Cold regions science and technology*. 2010; vol. 64, no. 1: 39-45.

10. Zhou G. et al. Laboratory investigation on tensile strength characteristics of warm frozen soils. *Cold regions science and technology*. 2015; vol. 113: 81-90.

11. Timofeev N.G., Zhirkov A.N. Konceptcija razrabotki innovacionnogo porodorazrushajushhego instrumenta dlja burenija skvazhin v uslovijah kriolitozony [The concept of developing an innovative rock cutting tool for drilling in cryolithozone conditions]. *Evrazijskij sojuz uchenyh*. 2015; 4: 151 – 154. (in Russ.)

12. Talalay P. G. Introduction to Ice Drilling Technology. *Mechanical Ice Drilling Technology*. Springer, Singapore. 2016: 1-8.

13. Ivkin V.S., Alasheev M.O. Vlijanie fiziko-mehaničeskix svojstv gruntov na rabotu mashin dlja zemljanyh rabot [The influence of physical and mechanical properties of soils on the work of machines for earthworks]. *Vestnik UIGTU*. 2015; 3: 62 – 67. (in Russ.)

14. Ivkin V. S., Vunberova N. P. Maloob'jomnye, rassredotočennye zimnie zemljanye raboty v stesnonnyh uslovijah stroitel'stva [Small, dispersed winter earthworks in cramped construction conditions]. *Vestnik Ul'janovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. 2018; 2: 52-55. (in Russ.)

15. Valigura N. S. Sposoby burenija neglubokih skvazhin [Methods of drilling shallow wells]. *Razvedka i ohrana nedr*. 2014; 2: 27-30. (in Russ.)

16. Timofeev N. G., Skrjabin R.M., Jakovlev B.V. Povyszenie jeffektivnosti raboty porodorazrushajushhego instrumenta pri burenii skvazhin v mnogoletnemerzlyh porodah [Improving the efficiency of a rock-breaking tool when drilling wells in permafrost rocks. Physico-technical problems of mineral development]. *Fiziko-tehničeskije problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh*. 2017; 6:105–113. (in Russ.)

17. Du H. Strength properties of icy frozen silt sands under uniaxial compression for a wide range of strain rates and moisture content. *Science and technology of cold regions*. 2016; no. 123:107-113.

18. Cherkasov V. I. Oblasti primenenija i problemy burenija neglubokih skvazhin [Fields of application and problems of drilling shallow wells]. *Razvedka i ohrana nedr*. 2014; 2: 24-27. (in Russ.)

19. Valigura N. S. Porodorazrushajushhie instrumenty dlja vrashhatelnogo burenija neclubokih skvazhin i ih osnovnye konstruktivnye osobennosti [Rock-Breaking tools for rotational drilling of shallow wells and their main design features]. *Razvedka i ohrana nedr.* 2014; 2: 30-33. (in Russ.)

20. Bogomolov R. M. [i dr.] Burenie dopolnitel'nyh bokovyh stvolov dolota PDC [Drilling of additional side shafts of the PDC bit]. *Oborudovanie i tehnologii dlja neftegazovogo kompleksa.* 2018; 2: 17-20. (in Russ.)

21. Panin N. M., Bogomolov R.M. Bogomolov R. M. Sovershenstvovanie promyvki sharoshechnykh burovyyh dolot [Improvement of washing of spherical drill bits]. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more.* 2020; 9: 11-14. (in Russ.)

22. Serikov D. Ju. Analiz konstrukcij i tehnologij izgotovlenija tverdosplavnogo vooruzhenija sharoshechnykh burovyyh dolot [Analysis of designs and manufacturing technologies of carbide weapons of spherical drill bits]. *Sfera. Neft' i Gaz.* 2017;1: 30-35. (in Russ.)

23. Salenko A. F., Fedot'ev A. N., Fedot'ev N. A. Perspektivy ispol'zovanie regenerirovannogo tverdogo splava dlja proizvodstva burovyyh dolot [Prospects for the use of regenerated hard alloy for the production of drill bits]. *Visnik SevNTU. Serija: Mashinopriladobudovannja ta transport.* 2014; 150: 139-145. (in Russ.)

24. Gilev A. V., Bovik K.A., Shigin A.O., Belozorov I.R. Analiz prohodki sharoshechnykh dolot v usloviyah Olimpiadinskogo GOKa ZAO «POLJuS» [Analysis of rolling cone chisels in the conditions of the Olympiadinsky GOK C.JSC POLYUS]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija.* 2015; 2: 153-153. (in Russ.)

25. Zhiqiang H., Qin L., Yi Z., Shuang J., Yachao M., Wengang H., Yongtao F. Experimental research on the surface strengthening technology of roller cone bit bearing based on the failure analysis. *Engineering Failure Analysis.* 2013; no.12: 12-26.

26. Bugaev V.G., Eresko S.P., Bugaev I.V. Vybory i obosnovanie konstruktivnykh parametrov burovogo rezhushhego instrumenta dlja prohodki skvazhin v merylyh gruntah [Selection and substantiation of design parameters of a drilling cutting tool for drilling holes in frozen soils]. *Gornoe oborudovanie i jelektromehanika.* 2013; 2: 6 – 13. (in Russ.)

27. Martjuchenko I.G., Zenin M.I. Perspektivy razvitiya burovogo instrumenta dlja vechnomerzlykh gruntov [Prospects for the development of drilling tools for permafrost soils]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny.* 2019; 9: 47-48. (in Russ.)

28. Martiuchenko I.G., Zenin M.I. interaction of a helical blade of a drilling tool with frozen ground. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2020; 17(2): 162-171. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-162-171>

29. Balovnev V. I. i dr. Opredelenie optimal'nykh parametrov transportno-tehnologicheskikh mashin metodami teorii podobnykh preobrazovanij [Determination of optimal parameters of transport and technological machines by methods of the theory of similar transformations]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny.* 2019; 12: 3-11. (in Russ.)

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Зенин М. И. Формулирование проблемы исследований, постановка задач исследования, обозначения алгоритма экспериментальных исследований, проведение экспериментальных исследований взаимодействия моделей винтового бура с мерзлым грунтом.*

*Иванов С. В. Анализ полученных результатов, выполнение обзора литературных источников.*

## COAUTHORS' CONTRIBUTION

*Maksim I. Zenin – Statement of the research problem, statement of research tasks, designations of the experimental research algorithm, conducting experimental studies of the interaction of screw drill models with frozen soil.*

*Sergey V. Ivanov – analysis of the results obtained, review of information sources.*

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Зенин Максим Иванович – канд. техн. наук, проф., доц. кафедры «Транспортное строительство», SPIN-код: 1117-4492.*

*Иванов Сергей Викторович – канд. техн. наук, проф., доц. кафедры «Транспортное строительство», SPIN-код: 9003-0418.*

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Maksim I. Zenin – Cand. Of Sci., Professor, Associate Professor of the Transport Construction Department, SPIN-код: 1117-4492.*

*Sergei V. Ivanov – Cand. Of Sci., Professor, Associate Professor of the Transport Construction Department, SPIN-код: 9003-0418.*

Научная статья  
УДК 624.138.22  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>  
EDN: IGOKXE



## АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ УДАРНО-ВИБРАЦИОННЫХ ГРУНТОУПЛОТНЯЮЩИХ МАШИН

**И.С. Тюремнов**  
ФГБОУ ВО «ЯГТУ»,  
г. Ярославль, Россия  
[tyuremnovis@yandex.ru](mailto:tyuremnovis@yandex.ru), <http://orcid.org/0000-0003-2261-4153>

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Для механизации уплотнения грунтов в дорожном строительстве наибольшее распространение получили ударно-вибрационные машины, осуществляющие уплотнение с периодическим отрывом рабочего органа от грунта: самоходные неререверсивные и реверсивные виброплиты, вибротрамбовки, навесные экскаваторные виброплиты, траншейные вибрационные катки и грунтовые вибрационные катки. Для оценки возможности разработки математической модели уплотнения грунта, объединяющей сразу несколько типов ударно-вибрационных машин, необходимо проведение анализа основных технических характеристик ударно-вибрационных машин различных типов.

**Материалы и методы.** Для анализа использовались технические характеристики различных типов ударно-вибрационных машин: 342 модели неререверсивных самоходных виброплит; 312 моделей реверсивных самоходных виброплит; 311 моделей вибрационных грунтовых катков; 63 модели навесных виброплит для экскаваторов; 24 модели вибротрамбовок и 21 модель траншейных вибрационных катков. В качестве основного параметра была принята масса машины (для виброплит различных типов) или масса, приходящаяся на уплотняющий модуль (для вибрационных катков различных типов).

**Результаты.** Получены графические зависимости, показывающие, что для данных типов ударно-вибрационных машин вынуждающая сила, относительная вынуждающая сила и частота колебаний зависят на взаимно сопрягающихся и продолжающихся участках кривых, укладываемых в общую закономерность: с увеличением массы машины, увеличивается вынуждающее усилие, но уменьшается относительное вынуждающее усилие и частота колебаний. Вибротрамбовки выбиваются из этой общей закономерности, поскольку при сопоставимой массе имеют существенно меньшую частоту колебаний (9...12 Гц) и высокую амплитуду (50...75 мм). Также из общей закономерности выделяются навесные экскаваторные виброплиты, имеющие меньший диапазон частот колебаний для машин аналогичной массы, к тому же осуществляющих уплотнение грунта позиционно, а не в процессе движения с определенной скоростью, как остальные ударно-вибрационные машины.

**Обсуждение и заключение.** Наличие общей закономерности изменения основных технических характеристик самоходных неререверсивных и реверсивных виброплит, траншейных катков и грунтовых вибрационных катков при близкой номинальной амплитуде их колебаний даёт основания для разработки единого теоретического описания взаимодействия рабочих органов данных типов машин с уплотняемым грунтом и общей методики расчета влияния технических характеристик и режимов работы данных машин на результаты уплотнения грунта.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** грунт, уплотнение, вибрация, машины ударно-вибрационные, каток вибрационный, каток траншейный, вибротрамбовка, виброплита, вынуждающее усилие, относительное вынуждающее усилие, частота колебаний

**БЛАГОДАРНОСТИ:** автор выражает благодарность Ефимову Сергею Сергеевичу, Федоровой Дарье Владимировне и Шорохову Дмитрию Александровичу за помощь в сборе информации о технических характеристиках грунтоуплотняющих машин, а также рецензентам.

**Статья поступила в редакцию 8.10.2023; одобрена после рецензирования 24.10.2023; принята к публикации 20.12.2023.**

**Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.**

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

© Тюремнов И.С., 2023



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Тюрёмнов И. С. Анализ технических характеристик различных типов ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6 (94). С. 706-716. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>

EDN: IGOKXE

## TECHNICAL PARAMETERS ANALYSES OF DIFFERENT TYPES OF IMPACT-VIBRATION SOIL COMPACTING MACHINES

Ivan S. Tyuremnov

Yaroslavl State Technical University,

Yaroslavl, Russia

[tyuremnovis@yandex.ru](mailto:tyuremnovis@yandex.ru), <http://orcid.org/0000-0003-2261-4153>

### ABSTRACT

**Introduction.** Impact-vibration machines, which perform soil compaction with periodic removal of the working body from the ground, are the most common for mechanization of soil compaction in road construction: self-propelled non-reversible and reversible vibratory plates, vibratory rammers, mounted excavator vibratory plates, trench vibratory rollers and soil vibratory rollers. It is necessary to analyze the main technical characteristics of impact-vibration machines of different types in order to assess the possibility of developing a mathematical model of soil compaction, combining several types of impact-vibration machines at once.

**Materials and methods.** The technical characteristics of different types of impact-vibration machines for the analysis: 342 models of non-reversible self-propelled vibratory plates; 312 models of reversible self-propelled vibratory plates; 311 models of vibratory ground rollers; 63 models of mounted vibratory plates for excavators; 24 models of vibratory rammers and 21 models of trench vibratory rollers are used. The machine mass (for vibratory plates of different types) or the mass per compaction module (for vibratory rollers of different types) was taken as a main parameter.

**Results.** The graphical dependencies have been obtained. They illustrate that for the given types of shock-vibration machines the excitation force, relative excitation force and oscillation frequency are located on mutually contiguous and continuing parts of curves. This is a common pattern: as the mass of the machine increases, the excitation force increases, but the relative excitation force and frequency of oscillation decrease. Vibratory rammers are out of this general pattern, because at comparable weight they have significantly lower frequency of oscillation (9...12 Hz) and high amplitude (50...75 mm). Also, the mounted excavator vibratory plates stand out from the general pattern, having a smaller range of vibration frequencies for machines of similar weight, moreover, they perform soil compaction positionally, and not in the process of movement at a certain speed, as other impact-vibration machines.

**Discussion and conclusions.** The common pattern of changes in the main technical characteristics of self-propelled non-reversible and reversible vibratory plates, trench rollers and soil vibratory rollers at close nominal amplitude of their vibrations gives grounds for the development of a unified theoretical description of the interaction of the working bodies of these types of machines with the compacted soil and a common method of calculating the influence of technical characteristics and operating modes of these machines on the results of soil compaction.

**KEYWORDS:** soil, compaction, vibration, shock-vibration machines, vibratory roller, trench roller, vibratory rammer, vibratory plate, excitation force, relative excitation force, frequency of vibrations

The article was submitted 8.10.2023; approved after reviewing 24.10.2023; accepted for publication 20.12.2023.

The author has read and approved the final manuscript.

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

For citation. Tyuremnov I.S. Technical parameters analyses of different types of impact-vibration soil compacting machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (6): 706-716. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716>

© Tyuremnov I. S., 2023



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

## ВВЕДЕНИЕ

Уплотнение грунтов является ключевой составляющей<sup>1,2,3</sup> повышения прочности, устойчивости и несущей способности инженерных сооружений, возведенных на грунтах или с использованием грунта: автомобильных и железных дорог, насыпей и плотин, взлётно-посадочных полос и др. Уплотнение грунтов необходимо и в случае применения химических добавок для улучшения комплекса характеристик грунта (технологий упрочнения грунта и стабилизации грунта)<sup>1,4</sup> [5].

Для механизации уплотнения грунтов в дорожном строительстве применяются различные средства статического, вибрационного, ударно-вибрационного и ударного действия<sup>5</sup>. Грунтоуплотняющие машины (далее ГУМ) статического действия воздействуют на грунт только статическим весом рабочего органа или всей машины. Вибрационные и ударно-вибрационные ГУМ используют кроме статической составляющей и динамическую составляющую, периодически изменяющуюся во времени. Грунтоуплотняющие машины ударного действия используют ударные воздействия высокой интенсивности с интервалом времени, существенно превышающим продолжительность отдельных воздействий.

Отличием рабочего процесса ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин (далее УВ ГУМ) от вибрационных является периодический отрыв рабочего органа (далее РО) от грунта под действием вынуждающей силы вибровозбудителя. Исследованиями Н.Я. Хархуты<sup>6</sup> установлены критические значения относительного вынуждающего усилия для различных частот колебаний вибровозбудителей УВ ГУМ, при которых в процессе колебаний начинает наблюдаться периодический отрыв их рабочего органа от грунта и вибрационный

режим работы сменяется ударно-вибрационным (таблица 1). Под относительной вынуждающей силой понимается отношение вынуждающей силы  $P$  вибровозбудителя РО к весу машины  $Q$  (для виброплит различного типа) или к весу  $Q_v$ , приходящемуся на уплотняющий модуль (для вибрационных катков, в т.ч. траншейных).

Таблица 1

Критические значения относительной вынуждающей силы  $P/Q$  ( $P/Q_v$ ) для различных частот колебаний<sup>6</sup>

Table 1

Critical values of  $P/Q$  ( $P/Q_v$ ) relative excitation forces for different vibration frequencies<sup>6</sup>

Параметр	Значения		
	12...25 Гц	25...50	50...85
Критические значения $P/Q$ ( $P/Q_v$ )	0,7...1	1...1,4	1,4...2,3

Наибольшее распространение в дорожном строительстве получили машины, осуществляющие уплотнение с поверхности грунта: самоходные виброплиты (неревверсивные и реверсивные); вибротрамбовки; навесные виброплиты (для гидравлических экскаваторов); траншейные вибрационные катки и грунтовые вибрационные катки. Данные типы УВ ГУМ существенно отличаются друг от друга геометрией рабочего органа (плоская форма поверхности контакта РО с грунтом у самоходных виброплит, экскаваторных виброплит и вибротрамбовок и цилиндрическая у траншейных и вибрационных катков), по мобильности в процессе выполнения работ (позиционное уплотнение грунта у экскаваторных виброплит и передвижение в процессе выполнения работы остальных типов УВ ГУМ), по конструкции и др.

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

<sup>2</sup> Хархута Н.Я. Машины для уплотнения грунтов. Л.: Машиностроение, 1973. 176 с.

<sup>3</sup> Костельов М.П. Опять о качестве и эффективности уплотнения различных грунтов современными виброкатками // Дорожная техника. Каталог-справочник. 2008. С. 40–47. <https://elibrary.ru/item.asp?id=30463315>

<sup>4</sup> Николаева Г.О., С.С. П. Исследование физико-механических характеристик стабилизированного грунта, применяемого в конструкции дорожных одежд автомобильных дорог в условиях I дорожно-климатической зоны // Транспортные системы: безопасность, новые технологии, экология: сборник трудов II международной научно-практической конференции, Якутск, 16–17 апреля 2020 года. Якутск: Якутский институт водного транспорта (филиал) Федерального государственного бюджетн. 2020. С. 126–132. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44498034>

<sup>5</sup> Неклюдов М. Механизация уплотнения грунтов. 2-е изд. М.: Стройиздат, 1985. 168 с.

<sup>6</sup> Хархута Н.Я. Дорожные машины. Теория конструкция и расчет: учебник для вузов. Изд. 2-е., Л: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1976. 472 с.

Для каждого типа УВ ГУМ существуют проблемы обоснования технических характеристик при проектировании, а также подбора модели УВ ГУМ и назначения режимов её работы (например, числа проходов) при производстве работ по уплотнению грунта в конкретных технологических условиях. Для решения данных проблем исследователи разрабатывают математические модели взаимодействия элементов УВ ГУМ между собой и с уплотняемым грунтом с учетом особенностей конструкции и технологии применения конкретного типа УВ ГУМ: самоходных виброплит [2], [3], вибротрамбовок [4], [11], вибрационных катков<sup>7</sup> [6], [13], [15], [16], [17], [18] и др. Для оценки возможности разработки математической модели уплотнения грунта УВ ГУМ общей для нескольких типов УВ ГУМ необходимо проведение анализа технических характеристик различных типов УВ ГУМ.

В литературе приводятся исследования взаимосвязи основных технических характеристик некоторых отдельных типов УВ ГУМ: самоходных виброплит ([12], [20], [21], [22]), навесных экскаваторных виброплит [16], вибрационных грунтовых катков [17] и асфальтовых катков [18] (могут применяться для уплотнения крупнообломочных грунтов и каменных материалов). Однако исследований, рассматривающих характеристики сразу всех основных типов УВ ГУМ при анализе литературы, не было выявлено.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основными техническими характеристиками УВ ГУМ, определяющими их силовое воздействие на уплотняемый грунт, являются: масса  $M$  (кг), вынуждающая сила  $P$  (кН) и частота колебаний  $f$  (Гц). При этом для вибрационных катков (в т.ч. траншейных) для оценки силового воздействия следует рассматривать только массу, приходящуюся на уплотняющий модуль  $M_v$ , поскольку часть массы машины, приходящаяся на тяговый модуль, не участвует в формировании уплотняющего воздействия, передаваемого вальцом катка на грунт, а служит только для обеспечения передвижения машины. Кроме абсолютного значения вынуждающей силы  $P$ , необходимо рассматривать относительную вынуждаю-

щую силу, определяемую как отношение вынуждающей силы вибровозбудителя УВ ГУМ к весу машины  $Q$  (для виброплит различного типа) или к весу  $Q_v$ , приходящемуся на уплотняющий модуль (для вибрационных катков различного типа, в т.ч. траншейных), т.е.  $P/Q$  или  $P/Q_v$ .

Для анализа использовались технические характеристики различных типов УВ ГУМ:

- 342 модели нереверсивных самоходных виброплит отечественных (АО «МОТОПРОМ», ООО «РАСТОМ», СПЛИТСТОУН, АО «СММ», ПАСКАТ, МИКОМ, ТЕХКОМ) и зарубежных (AMMANN, BOMAG, MBW, WEBER, DYNAPAC, NTC, VIBROMAX, WACKER, MIKASA, TREMIX, GROST, VEKTOR, SAMSAN, ZITREK, BATMATIC, BELLE, CHICAGO PNEUMATIC, DELTA, DIAM, ENAR, EURO SHATAL, FIRMAN, HELMUT, HUSQVARNA, IMPULSE, MASTERPAC, SOVTE, STEM TECHNO, TSS, ТЕКРАС, TREMMER, TSUNAMI) производителей;

- 312 моделей реверсивных самоходных виброплит отечественных (АО «МОТОПРОМ», ООО «РАСТОМ», СПЛИТСТОУН, АО «СММ», ПАСКАТ, МИКОМ, ТЕХКОМ) и зарубежных (AMMANN, BOMAG, WEBER, DYNAPAC, NTC, WACKER, VIBROMAX, MIKASA, TREMIX, GROST, VEKTOR, SAMSAN, BATMATIC, CHICAGOPNEUMATIC, DIAM, EUROSHATAL, FIRMAN, HELMUT, HUSQVARNA, IMPULSE, MASTERPAC, STEMTECHNO, TSS, ТЕКРАС, TREMMER) производителей;

- 311 моделей вибрационных грунтовых катков отечественных (АМКОДОР, Завод дорожных машин, ПАСКАТ, Челябинский тракторный завод - УРАЛТРАК) и зарубежных (AMMANN, ATLAS WEYCOR, BOMAG, CATERPILLAR, DYNAPAC, HAMM, JCB, VOLVO, MITSUBISHI, HVBXGSHENWA, GUANGXI LIUGONG, LUTONG, SAKAI, SHANDONG CHANGLIN, XCMG, YTO INTERNATIONAL, XIAMEN XGMA, ZOOMLION) производителей;

- 63 модели навесных виброплит для экскаваторов отечественных (ТРАДИЦИЯ-К, IMPULSE) и зарубежных (GHEDINI, AMMANN, SIMEX, INDECO, EXTEN, ATLAS COPCO, LST, GENTEC EQUIPMENT) производителей;

- 24 модели вибротрамбовок (AMMANN, Atlas Copco, BOMAG, WEBER, Grost, Vektor);

<sup>7</sup> Савельев С.В., Бурый Г.Г., Аднагулова З.Р. Методика обоснования параметров вибрационных катков для уплотнения грунтовых насыпей, учитывающая зону активного действия вибрации // В сборнике Образование. Транспорт. Инновации. Строительство. Сборник материалов III Национальной научно-практической конференции. 2020. С. 54–60. <https://elibrary.ru/item.asp?id=43970005>

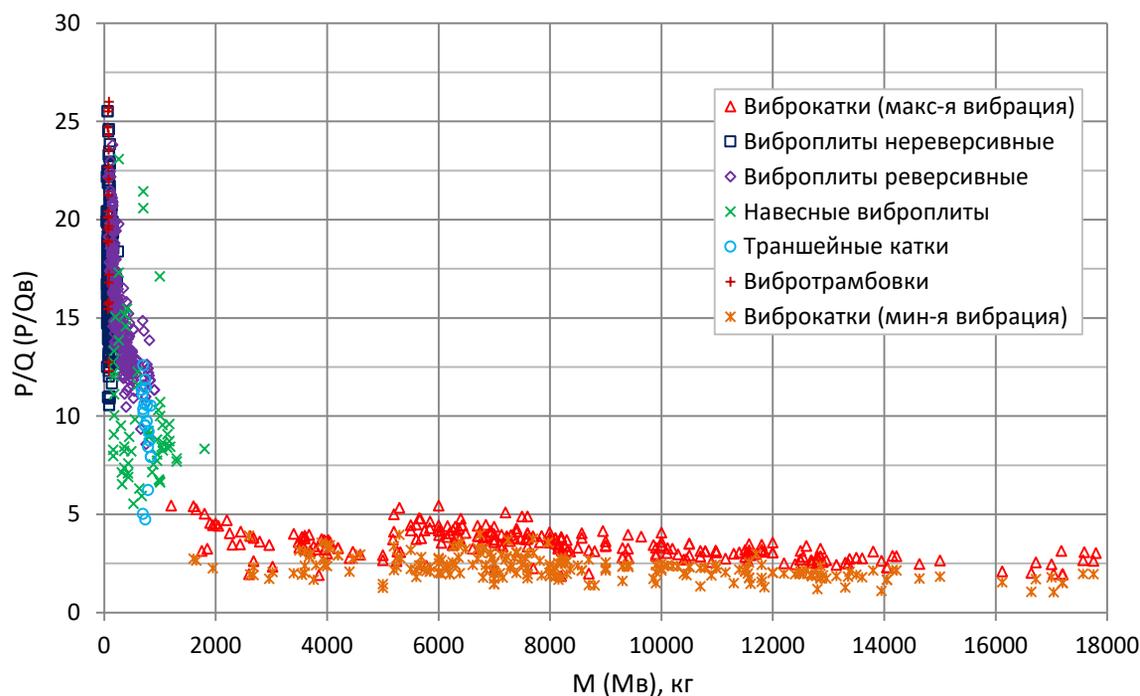


Рисунок 1 – Влияние массы грунтоуплотняющей машины ( $M$ , кг) или массы рабочего органа грунтоуплотняющей машины ( $M_в$ , кг) на значения относительной вынуждающей силы ( $P/Q$  или  $P/Q_v$ )  
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Impact of the soil compacting machine mass ( $M$ , kg) or soil compacting machine implement mass ( $M_v$ , kg) on the values of the relative excitation force ( $P/Q$  or  $P/Q_v$ )  
Source: compiled by the author.

– 21 модель траншейных вибрационных катков (AMMANN, ATLASCOPO, BOMAG, WACKER, WEBER, GROST, HUSQVARNA, CHICAGOPNEUMATIC, JCB, TORO, SAKAI).

Технические характеристики УВ ГУМ брались из каталогов и официальных сайтов производителей и дистрибьюторов УВ ГУМ.

В качестве основного параметра ГУМ была принята масса  $M$  (для виброплит различных типов) или масса, приходящаяся на уплотняющий модуль  $M_в$  (для вибрационных катков различных типов). Поскольку у большинства моделей вибрационных катков предусмотрено два стандартных режима вибрации (режим «максимальной вибрации» (повышенное значение вынуждающей силы при пониженной частоте колебаний) и режим «минимальной вибрации» (пониженное значение вынуждающей силы при повышенной частоте колебаний)), то на графиках приведены данные для обоих режимов по отдельности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результирующие данные влияния массы УВ ГУМ ( $M$ , кг) или РО ГУМ ( $M_в$ , кг) на значения относительной вынуждающей силы ( $P/Q$  или  $P/Q_v$ ), вынуждающей силы  $P$ , а также частоты колебаний  $f$  для различных типов УВ ГУМ представлены на рисунках 1, 2, 3, 4, 5, 6.

Анализ графиков (см. рисунки 1, 2, 3, 4, 5, 6) показывает, что технические характеристики УВ ГУМ, определяющие их силовое воздействие на уплотняемый грунт (вынуждающая сила, относительная вынуждающая сила и частота колебаний) находятся в определенной зависимости от массы машины (рабочего органа).

Для самоходных виброплит (как нереверсивных, так и реверсивных), навесных экскаваторных виброплит, траншейных катков и грунтовых вибрационных катков вынуждающая сила, относительная вынуждающая сила и частота колебаний располагаются на взаимно сопрягающихся и продолжающихся участках кривых, укладывающихся в общую закономерность. Наибольшие значения относительной вынуждающей силы и частоты колебаний имеют УВ ГУМ малой массы (нереверсивные виброплиты и лёгкие модели реверсивных виброплит) (см. рисунки 1, 2). Наименьшие значения относительной вынуждающей силы и частоты колебаний из всех типов УВ ГУМ имеют вибрационные катки, обладающие наибольшей массой (приходящейся на уплотняющий модуль).

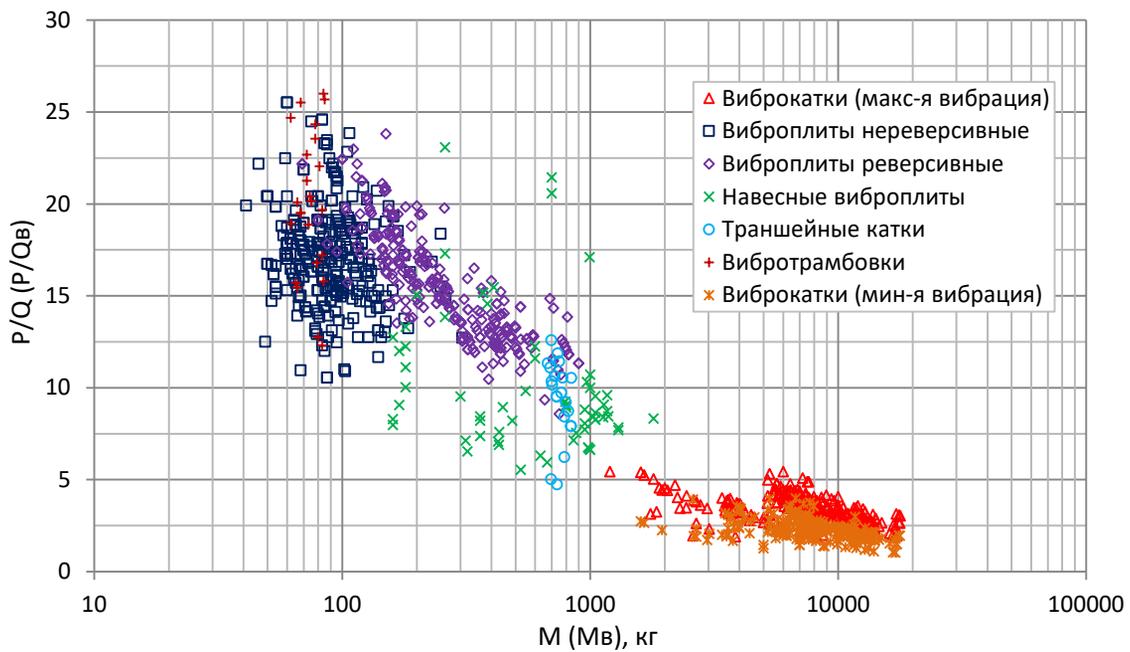


Рисунок 2 – Влияние массы грунтоуплотняющей машины ( $M$ , кг) или рабочего органа грунтоуплотняющей машины ( $M_v$ , кг) на значения относительной вынуждающей силы ( $P/Q$  или  $P/Q_v$ ) (в полулогарифмических координатах)  
 Источник: составлено автором.

Figure 2 – Impact of the soil compacting machine mass ( $M$ , kg) or the soil compacting machine working organ ( $M_v$ , kg) on the values of the relative excitation forces ( $P/Q$  or  $P/Q_v$ ) (in semi-logarithmic coordinates)  
 Source: compiled by the author.

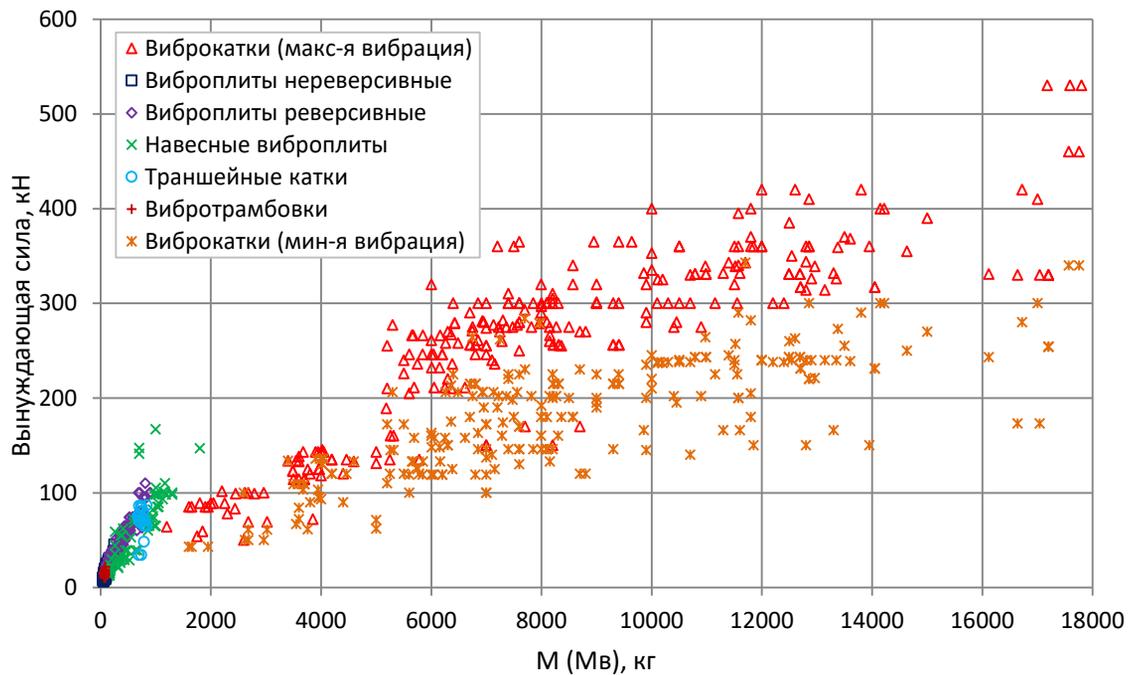


Рисунок 3 – Влияние массы грунтоуплотняющей машины ( $M$ , кг) или рабочего органа грунтоуплотняющей машины ( $M_v$ , кг) на значения вынуждающей силы колебаний  
 Источник: составлено автором.

Figure 3 – Impact of the soil compacting machine mass ( $M$ , kg) or the soil compacting machine working body ( $M_v$ , kg) on the values of the excitation forces of oscillation  
 Source: compiled by the author.

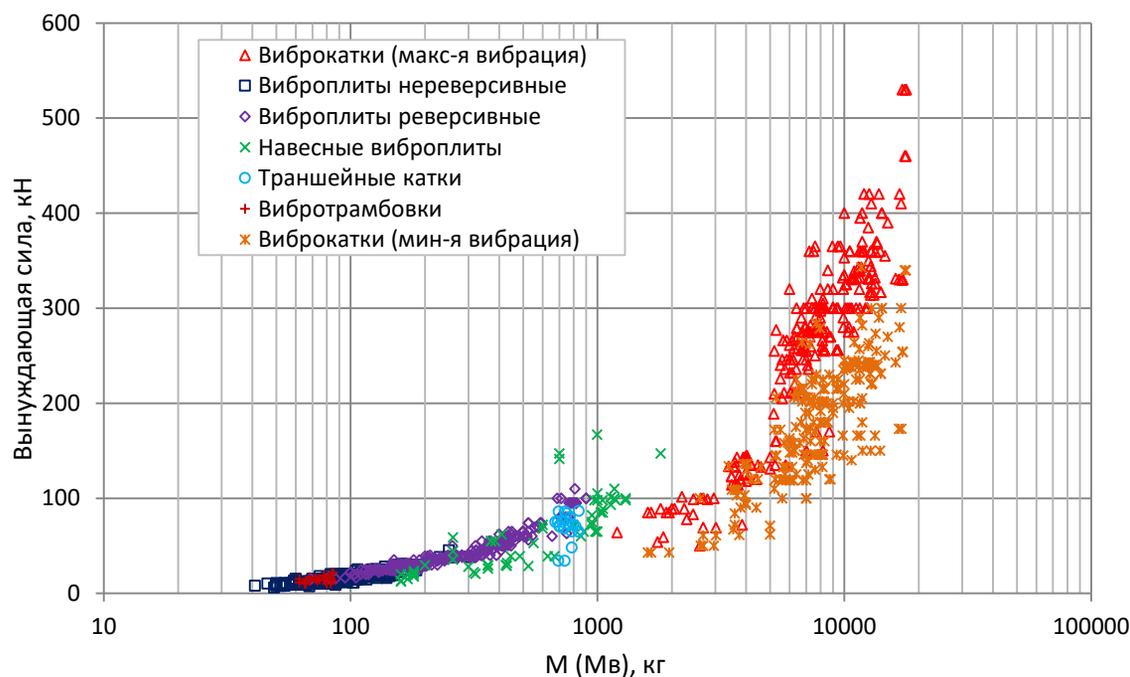


Рисунок 4 – Влияние массы грунтоуплотняющей машины ( $M$ , кг) или рабочего органа грунтоуплотняющей машины ( $M_r$ , кг) на значения вынуждающей силы колебаний (в полулогарифмических координатах)  
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Impact of the soil compacting machine mass ( $M$ , kg) or soil compacting machine working organ ( $M_r$ , kg) on the values of the excitation forces of oscillations (in semi-logarithmic coordinates)  
Source: compiled by the author.

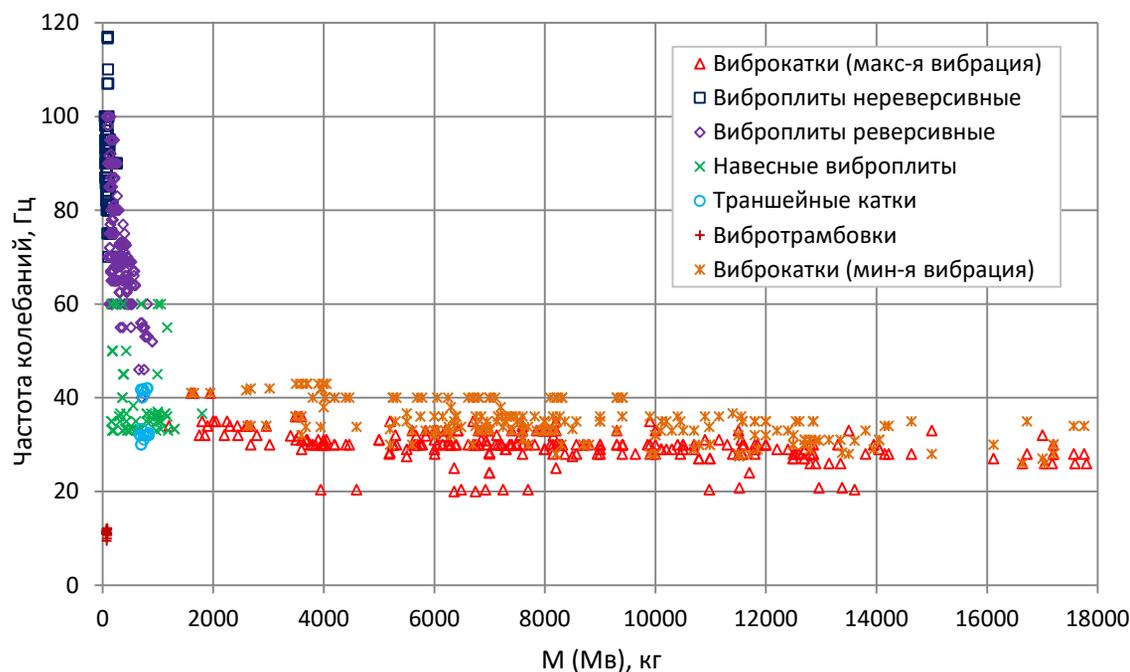


Рисунок 5 – Влияние массы грунтоуплотняющей машины ( $M$ , кг) или рабочего органа грунтоуплотняющей машины ( $M_r$ , кг) на значения частоты колебаний  
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Impact of the soil compacting machine mass ( $M$ , kg) or the soil compacting machine working body ( $M_r$ , kg) on the vibration frequency values  
Source: compiled by the author.

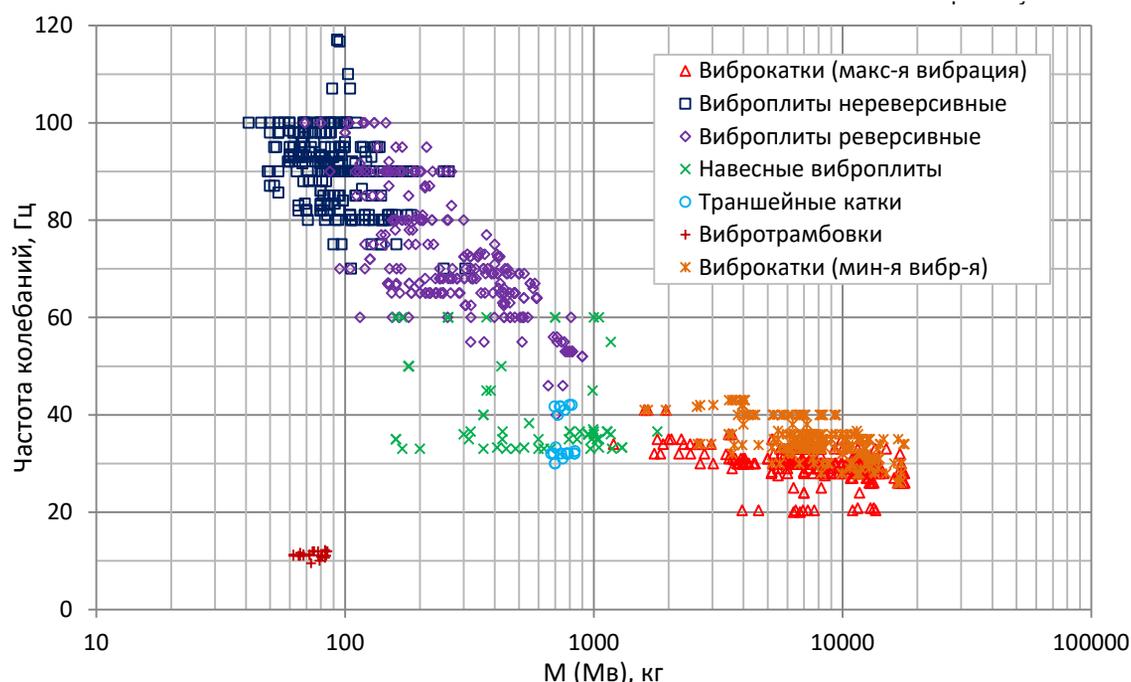


Рисунок 6 – Влияние массы грунтоуплотняющей машины (M, кг) или рабочего органа грунтоуплотняющей машины (M<sub>р</sub>, кг) на значения частоты колебаний (в полулогарифмических координатах)  
Источник: составлено автором.

Figure 6 – Impact of soil compacting machine mass (M, kg) or soil compacting machine working organ (M<sub>r</sub>, kg) on vibration frequency values (in semi-logarithmic coordinates)  
Source: compiled by the author.

Траншейные виброролы занимают промежуточное положение как по массе, приходящейся на уплотняющий модуль, так и по относительной вынуждающей силе и частоте колебаний. Диапазоны изменения вынужда-

ющей силы, относительной вынуждающей силы и частоты колебаний для различных ГУМ приведены в таблице 2. Грунтоуплотняющие машины в таблице 2 расположены в порядке увеличения их масс.

Таблица 2  
Диапазоны изменения основных технических характеристик ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин  
Источник: составлено автором.

Table 2  
Ranges of variation of the main technical characteristics for impact-vibration soil compacting machines  
Source: compiled by the author.

Параметр	Самоходные виброплиты		Вибротрамбовки	Навесные виброплиты	Траншейные виброролы	Вибрационные катки
	неревверсивные	реверсивные				
Масса плиты (M) или виброролка (M <sub>р</sub> ), кг	40...900		62...85	160...1800	675...840	1200... ...17800
	41...305	69...900				
Относительная вынуждающая сила P/Q (P/Q <sub>в</sub> )	8,6...25,5		12,3...26	5,5...23	4,7...11,9	1,9...5,4* 1...4**
	10,6...25,5	8,6...23,8				
Частота колебаний, Гц	40...117		9...12	33...60	30...42	20...41* 26...43**
	60...117	40...100				

\* Режим «максимальной вибрации» для вибрационных катков;  
\*\* Режим «минимальной вибрации» для вибрационных катков

Вибротрамбовки выбиваются из этой общей закономерности, поскольку, хотя и укладываются в общую закономерность по значениям вынуждающей силы и относительной вынуждающей силы колебаний, имеют частоты колебаний (9...12 Гц) существенно меньшие, чем ударно-вибрационные машины сопоставимой массы (см. рисунок 6 и таблицу 2). Также следует отметить, что номинальная амплитуда колебаний вибротрамбовок (по техническим характеристикам) находится в диапазоне 50...75 мм, что существенно превышает паспортные диапазоны амплитуд колебаний РО других УВ ГУМ (нереверсивных и реверсивных виброплит, траншейных катков и грунтовых вибрационных катков (данные по номинальной амплитуде колебаний навесных экскаваторных виброплит производителями не приводятся)).

Также несколько выбиваются из общей закономерности навесные виброплиты. Диапазон частот колебаний навесных экскаваторных виброплит располагается несколько ниже диапазона частот колебаний реверсивных виброплит сопоставимой массы. При этом навесные виброплиты, в отличие от других анализируемых УВ ГУМ (нереверсивных и реверсивных виброплит, вибротрамбовок, траншейных катков и грунтовых вибрационных катков), работают позиционно, крепясь на рукояти экскаватора и осуществляя уплотнение грунта без передвижения по его поверхности, что существенным образом будет влиять на математическую модель непрерывного накопления деформации на различных глубинах грунта в процессе достаточно длительного виброударного воздействия (по сравнению со сравнительно небольшой продолжительностью воздействия на поверхность грунта УВ ГУМ, передвигающихся над точкой поверхности с определенной скоростью в течение отдельного прохода).

Анализ представленных результатов (рисунки 1, 2, 3, 4, 5, 6, таблица 2) показывает, что для всех типов рассматриваемых ГУМ значения относительной вынуждающей силы при соответствующем диапазоне частот колебаний превышают критические значения  $P/Q$  ( $P/Q_c$ ) (см. таблицу 1), что свидетельствует об отрывном характере колебаний всех рассматриваемых ГУМ и необходимости отнесения их к ударно-вибрационным (виброударным) ГУМ. Данное обстоятельство является существенным и требует обязательного учета в математических моделях взаимодействия УВ ГУМ данных типов с грунтом.

Реализация вибрационного режима колебаний, при котором рабочие органы ГУМ не отрываются от грунта, возможна только на первых проходах, когда грунт находится в начальной стадии уплотнения. По мере уплотнения грунта режим колебаний современных ГУМ переходит в тот или иной вариант отрывных колебаний. Для вибрационных катков зарубежные исследователи рассматривают следующие основные виды колебаний [19]: «постоянный контакт» («continuous contact»), «частичный отрыв» («partial uplift»), «двойной прыжок» («double jump») и более сложные виды колебаний типа «раскачивание» («rocking motion») и «хаотический» («chaotic motion»). Причем наиболее эффективное уплотнение грунта вибрационным катком осуществляется в режиме «частичный отрыв» («partial uplift»). Режимы «двойной прыжок», «раскачивание» и «хаотический» являются нежелательными и даже опасными. Для своевременной индикации перехода в данные режимы колебаний и отстраивания от них применяются системы непрерывного контроля уплотнения грунтов, устанавливаемые на УВ ГУМ [20]. Таким образом, математическая модель взаимодействия УВ ГУМ с грунтом должна иметь возможность учета реализации как безотрывного режима колебаний типа «постоянный контакт» («continuous contact») (соответствующему классическому вибрационному нагружению грунта), так и различных режимов с периодическим отрывом рабочего органа УВ ГУМ от грунта (соответствующему классическому виброударному нагружению грунта).

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ основных технических характеристик УВ ГУМ, определяющих их силовое воздействие на уплотняемый грунт (вынуждающая сила, относительная вынуждающая сила и частота колебаний) показывает, что технические характеристики нереверсивных виброплит, реверсивных виброплит, траншейных катков и грунтовых вибрационных катков находятся в рамках общей закономерности: с увеличением массы машины увеличивается вынуждающее усилие, но уменьшается относительное вынуждающее усилие и частота колебаний. При этом номинальная амплитуда колебаний (определяемая сочетанием массы рабочего органа, массы рамы, частотой и вынуждающей силой колебаний, характеристиками амортизаторов РО и свойствами грунта) для нереверсивных виброплит, реверсивных виброплит, траншейных катков и грунтовых вибрационных катков находится в одинако-

вом диапазоне (порядка нескольких миллиметров). Это даёт основания для разработки единого теоретического описания взаимодействия рабочих органов данных типов УВ ГУМ с уплотняемым грунтом и общей методики расчета влияния технических характеристик и режимов работы данных машин на результаты уплотнения грунта. Поскольку для неревверсивных виброплит, реверсивных виброплит, траншейных катков и грунтовых вибрационных катков значения относительной вынуждающей силы колебаний (при рабочей частоте колебаний) больше 1 (находятся в диапазоне 2...30), методика расчета должна учитывать реализацию режимов работы рабочего органа данных ГУМ как без отрыва, так и с отрывом от грунта.

Самоходные виброплиты и вибрационные катки находятся на противоположных краях диапазонов изменения характеристик УВ ГУМ по основным характеристикам, определяющим силовые возможности ГУМ (масса, относительное вынуждающее усилие и частота колебаний). Другие типы УВ ГУМ находятся внутри этого диапазона. Поэтому разработка методики расчета влияния технических характеристик УВ ГУМ на результаты уплотнения грунта в конкретных технологических условиях для самоходных виброплит и вибрационных катков должна быть применима и для УВ ГУМ внутри этого диапазона (в первую очередь траншейных вибрационных катков) с учетом их конструктивных особенностей (соотношения массы рабочего органа и массы рамы, количества и характеристик амортизаторов РО и др).

Достаточно большой диапазон изменения значений частоты и относительной вынуждающей силы колебаний РО УВ ГУМ различных типов при сопоставимой массе машин свидетельствует об отсутствии у производителей единого мнения о требуемых характеристиках УВ ГУМ и влиянии вынуждающей силы и частоты колебаний на эффективность уплотнения грунтов в различных условиях производства работ.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Худайкулов Р.М., Мирзаев Т.Л. Применение стабилизаторов для улучшения прочности грунтового основания автомобильных дорог // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». 2019. № 1–11.
2. Hashimoto T., Fujino K., Tateyama K. Suggestion of the ground stiffness estimative method with the running speed of a plate compactor // ISARC 2016 - 33rd Int. Symp. Autom. Robot. Constr. 2016. № Isarc. P. 421–427.
3. Emelianov R.T. et al. Modeling of dynamic system “vibratory plate-soil” as an object quality control of compaction // J. Phys. Conf. Ser. 2019. Vol. 1399, № 4.
4. Carmen D. Non-linear Behaviour of a Soil Compaction Equipment // 5th Int. Vilnius Conf. “Knowledge-Based Technol. OR Methodol. Strateg. Decis. Sustain. Dev. Sept. 30–October 3, 2009, Vilnius, Lith. 2009. № August 2009. P. 114–119.
5. Morariu-Gligor R.M. The Study of the Dynamic Behavior for a Tamping Rammer // Symmetry (Basel). 2022. Vol. 14, № 5.
6. Pistol J. et al. Consideration of the Variable Contact Geometry in Vibratory Roller Compaction // Infrastructures. 2023. Vol. 8, № 110. P. 1–15.
7. Тарасов В.Н., Бояркина И.В., Серебренников В.С. Аналитический метод исследования вертикальных перемещений вибровальца дорожного катка при уплотнении материалов и грунтов // Строительные и дорожные машины. 2019. № 7. P. 13–18.
8. Савельев С.В., Михеев В.В., Белодед А.С. Математическая модель процесса динамического деформирования уплотняемой упруго вязкой пластичной среды // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2016. № 3(49). P. 99–105.
9. Pietzsch D., Poppy W. Simulation of soil compaction with vibratory rollers // J. Terramechanics. 1993. № 29(6). P. 585–597.
10. Li S., Hu C. Study on Dynamic Model of Vibratory Roller - Soil System // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 113, № 1.
11. Liu L. et al. Nonlinear Dynamics of the Rigid Drum for Vibratory Roller on Elastic Subgrades // Shock Vib. 2021. Vol. 2021. P. 1–9.
12. Евсеев Е.Ю., Куприянов Р.В., Зубков А.Ф. Анализ применения вибрационных плит для ремонта дорожных покрытий нежесткого типа // Механизация строительства. 2011. № 6(804). P. 28–31.
13. Мусяйко Д.В., Расулов Р.А. Самоходная вибрационная плита с вальцем // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 4(43). P. 73–80.
14. Кузьмичев В.А., Кузьмичев В.Д. Исследование рабочих параметров самоходных виброплит, применяемых при уплотнении грунтов // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 3(28). P. 66–71.
15. Тюремнов И.С., Новичихин А.А. Статистический анализ технических характеристик вибрационных плит // Механизация строительства. 2014. № 11. P. 32–35.
16. Тюремнов И.С., Федорова Д.В. Статистический анализ технических характеристик навесных экскаваторных виброплит // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2019. Vol. 16, № 2(66). P. 122–133.
17. Тюремнов И.С., Игнатьев А.А., Филатов И.С. Статистический анализ технических характеристик грунтовых вибрационных катков // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2014. № 3(34). P. 81–88.
18. Шишкин Е.А. et al. Исследование взаимосвязи конструктивных и технологических параметров вибрационных и осцилляционных катков // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. № 2. P. 183–188.
19. Adam D., Kopf F. Operational Devices

for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device) // Proc. Int. Semin. Geotech. Pavement Railw. Des. Constr. Athens, Greece. 2004. P. 97–106.

20. Тюремнов И.С. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 3. Особенности функционирования и «интеллектуальное уплотнение» // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 2(41). P. 115–122.

## REFERENCES

1. KHudaykulov R.M., Mirzaev T.L. Primenenie stabilizatorov dlya uluchsheniya prochnosti gruntovogo osnovaniya avtomobil'nykh dorog [The use of stabilizers to improve the strength of the soil foundation of highways]. *Internet-zhurnal «Transportnye sooruzheniya»*. 2019;1–11. (in Russ.)

2. Hashimoto T., Fujino K., Tateyama K. Suggestion of the ground stiffness estimative method with the running speed of a plate compactor. ISARC 2016 - 33rd Int. Symp. Autom. Robot. Constr. 2016. № Isarc.: 421–427.

3. Emelyanov R.T. et al. Modeling of dynamic system “vibratory plate-soil as an object quality control of compaction. J. Phys. Conf. Ser. 2019; Vol. 1399, № 4.

4. Carmen D. Non-linear Behaviour of a Soil Compaction Equipment // 5th Int. Vilnius Conf. “Knowledge-Based Technol. OR Methodol. Strateg. Decis. Sustain. Dev. Sept. 30–October 3, 2009, Vilnius, Lith. 2009; August 2009: 114–119.

5. Morariu-Gligor R.M. The Study of the Dynamic Behavior for a Tamping Rammer. *Symmetry (Base)*. 2022; Vol. 14, № 5. <https://www.mdpi.com/2073-8994/14/5/980>

6. Pistol J. et al. Consideration of the Variable Contact Geometry in Vibratory Roller Compaction. *Infrastructures*. 2023; Vol. 8, № 110: 1–15.

7. Tarasov V.N., Boyarkina I.V., Serebrennikov V.S. Analiticheskiy metod issledovaniya vertikal'nykh peremeshcheniy vibroval'tsa dorozhnogo katka pri uplotnenii materialov i gruntov [Analytical method for the study of vertical movements of the vibrating roller of a road roller during compaction of materials and soils]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2019; 7: 13–18. (in Russ.)

8. Saveliev S.V., Mikheev V.V., Beloded A.S. Mathematical model of denamic deformation of compacted elastic viscous plastic medium. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016;(3(49)):99-105. (In Russ.) [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-3\(49\)-99-105](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2016-3(49)-99-105)

9. Pietzsch D., Poppy W. Simulation of soil compaction with vibratory rollers. *J. Terramechanics*. 1993; 29(6): 585–597.

10. Li S., Hu C. Study on Dynamic Model of Vibratory Roller - Soil System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018; Vol. 113, № 1.

11. Liu L. et al. Nonlinear Dynamics of the Rigid Drum for Vibratory Roller on Elastic Subgrades. *Shock Vib*. 2021; Vol. 2021:1–9.

12. Evseev E.YU., Kupriyanov R.V., Zubkov A.F. Analiz primeneniya vibratsionnykh plit dlya remonta dorozhnykh pokrytiy nezhestkogo tipa [Analysis of the

use of vibration plates for the repair of non-rigid road surfaces]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. 2011; 6(804): 28–31. (In Russ.)

13. Musiyako D.V., Rasulov R.A. Samokhodnaya vibratsionnaya plita s val'tsem [Self-propelled vibrating plate with roller]. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016; 4(43):73–80. (In Russ.)

14. Kuz'michev V.A., Kuz'michev V.D. Issledovanie rabochikh parametrov samokhodnykh vibroplit, primenyaemykh pri uplotnenii gruntov [Investigation of the operating parameters of self-propelled vibrating plates used in soil compaction]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2011; 3(28): 66–71. (In Russ.)

15. Tyuremnov I.S., Novichikhin A.A. Statisticheskiy analiz tekhnicheskikh kharakteristik vibratsionnykh plit [Statistical analysis of the technical characteristics of vibrating plates]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. 2014;11:32–35. (In Russ.)

16. Tyuremnov I.S., Fedorova D.V. Statistical processing of technical characteristics of vibrating plate compactors. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;16(2):122-133. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-2-122-133>

17. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A., Filatov I.S. Statisticheskiy analiz tekhnicheskikh kharakteristik gruntovykh vibratsionnykh katrov [Statistical analysis of technical characteristics of ground vibration rollers]. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014; 3(34):81–88. (In Russ.)

18. SHishkin E.A. et al. Issledovanie vzaimosvyazi konstruktivnykh i tekhnologicheskikh parametrov vibratsionnykh i ostillyatsionnykh katrov [Investigation of the relationship between the design and technological parameters of vibration and oscillation rollers]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2021; 2: 183–188. (In Russ.)

19. Adam D., Kopf F. Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device). *Proc. Int. Semin. Geotech. Pavement Railw. Des. Constr. Athens, Greece*. 2004. P. 97–106.

20. Tyuremnov I.S. Obzor sistem nepreryvno kontrolya uplotneniya grunta dlya vibratsionnykh katrov. CHast' 3. Osobennosti funktsionirovaniya i «intellektual'noe uplotnenie» [Overview of continuous soil compaction monitoring systems for vibrating rollers. Part 3. Features of functioning and «intelligent sealing»]. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016; 2(41):115–122. (In Russ.)

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Тюремнов Иван Сергеевич – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины».

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ivan S. Tyuremnov – Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Construction and Road Machines Department.

## **РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ**



## **PART II. TRANSPORT**

Научная статья  
УДК 665.73 (076.5)  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-718-727>  
EDN: VAEMSJ



# ОПТИМИЗАЦИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ ГОРОДСКОГО НАЗЕМНОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

**Д.А. Дрючин**

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»,  
г. Оренбург, Россия  
[dmi-dryuchin@yandex.ru](mailto:dmi-dryuchin@yandex.ru), <http://orcid.org/0000-0002-1311-6462>

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** Обозначено влияние городского пассажирского транспорта на формирование комфортной городской среды. Определена роль и место инфраструктуры топливно-энергетического обеспечения как одной из подсистем в системе городского наземного пассажирского транспорта. Представлены результаты обзора научных работ в области проектирования инфраструктуры топливно-энергетического обеспечения. Отмечена недостаточная степень разработки методического обеспечения, формирующего интегрированное развитие подсистем городского пассажирского транспорта. Сформулирована цель исследования, определены задачи, решение которых обеспечивает её достижение.

**Материалы и методы.** Представлено краткое описание методики определения основных технологических параметров инфраструктуры топливно-энергетического обеспечения системы городского наземного пассажирского транспорта. Определена последовательность применения представленных расчётных формул, описана основная гипотеза, положенная в основу проводимого исследования. Дано описание ожидаемых результатов.

**Результаты.** В качестве промежуточных результатов проводимого исследования приведены данные и функциональные зависимости, полученные в процессе выполнения исследовательской части работы. Указанные данные обеспечивают практическую реализацию разработанной методики и позволяют провести моделирование параметров проектируемой инфраструктуры. Приведены зависимости, полученные в результате моделирования и являющиеся основой для разработки оптимизационных мероприятий.

**Обсуждение.** Отмечено, что логистический подход, реализуемый при разработке представленных методов, позволяет определить проектные параметры инфраструктуры топливно-энергетического обеспечения как одной из подсистем городского пассажирского транспорта, что обеспечивает согласованное развитие системы, исходя из условия достижения максимальной эффективности.

**Заключение.** В качестве обобщающего вывода отмечено, что практическая реализация разработанной методики в рамках комплексного системного подхода позволяет обеспечить достижение поставленной цели – повышение эффективности системы городского наземного пассажирского транспорта.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пассажирский транспорт, топливно-энергетическое обеспечение, инфраструктура, заправочные станции, альтернативная транспортная энергетика

**БЛАГОДАРНОСТИ:** автор статьи выражает благодарность сотрудникам транспортного факультета ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», научному консультанту д-ру техн. наук, проф. Н. Н. Якунину, анонимным рецензентам за их помощь, советы, рекомендации, ценные замечания и критику.

**Статья поступила в редакцию 06.10.2023; одобрена после рецензирования 01.11.2023; принята к публикации 20.12.2023.**

**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:** Дрючин Д. А. Оптимизация инфраструктуры топливно-энергетического обеспечения системы городского наземного пассажирского транспорта // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6 (94). С. 718-727. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-718-727>

© Дрючин Д.А., 2023



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-718-727>  
EDN: VAEMSJ

## OPTIMIZATION OF FUEL AND ENERGY INFRASTRUCTURE FOR URBAN GROUND PASSENGER TRANSPORT SYSTEM

**Dmitry A. Dryuchin**  
Orenburg State University,  
Orenburg, Russia

[dmi-dryuchin@yandex.ru](mailto:dmi-dryuchin@yandex.ru), <http://orcid.org/0000-0002-1311-6462>

### ABSTRACT

**Introduction.** The influence of urban passenger transport on the formation of a comfortable urban environment is indicated. The role and place of the fuel and energy supply infrastructure as one of the subsystems in the urban ground passenger transport system is determined. The results of the review of scientific works in the field of designing the infrastructure of fuel and energy supply are presented. The insufficient degree of development of methodological support forming the integrated development of subsystems of urban passenger transport is noted. The purpose of the study is formulated, the tasks are defined, the solution of which ensures its achievement.

**Materials and methods.** A brief description of the methodology for determining the main technological parameters of the fuel and energy infrastructure of the urban ground passenger transport system is presented. The sequence of use of the presented calculation formulas is determined, the main hypothesis underlying the research is described. The expected results are described.

**Results.** As intermediate results of the conducted research, the data and functional dependencies obtained in the process of performing the research part of the work are presented. These data provide practical implementation of the developed methodology and allow modeling of the parameters of the projected infrastructure. The dependencies obtained as a result of modeling and which are the basis for the development of optimization measures are given.

**Discussion.** It is noted that the logistics approach implemented in the development of the presented methods allows us to determine the design parameters of the fuel and energy infrastructure as one of the subsystems of urban passenger transport, which ensures the coordinated development of the system based on the conditions for achieving maximum efficiency.

**Conclusion.** As a generalizing conclusion, it is noted that the practical implementation of the developed methodology within the framework of an integrated system approach makes it possible to achieve the set goal – to increase the efficiency of the urban ground passenger transport system.

**KEYWORDS:** Passenger transport, fuel and energy supply, infrastructure, gas stations, alternative transport energy

**ACKNOWLEDGEMENTS:** The author of the article expresses gratitude to the staff of the Transport Faculty of the Orenburg State University, scientific consultant, Doctor of Technical Sciences, Professor N. N. Yakunin, anonymous reviewers for their help, advice, recommendations, valuable comments and criticism.

The article was submitted 06.10.2023; approved after reviewing 01.11.2023; accepted for publication 20.12.2023.

The author has read and approved the final manuscript.

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

For citation. Dryuchin D. A. Optimization of fuel and energy infrastructure for urban ground passenger transport system. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (6): 718-727. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-718-727>

© Dryuchin D. A., 2023



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

**ВВЕДЕНИЕ**

Комфортная городская среда современных муниципальных образований формируется множеством факторов, одним из которых является способность городской транспортной системы удовлетворять транспортные потребности населения. Эффективность системы городского пассажирского транспорта определяется состоянием и взаимной согласованностью подсистем, входящих в её состав. Ключевыми подсистемами, составляющими материальную основу транспортной системы, являются: подвижной состав; производственно-техническая база транспортных и сервисных предприятий; инфраструктура топливно-энергетического обеспечения. Наличие логистической взаимосвязи между конструктивно-технологическими особенностями эксплуатируемых транспортных средств, их численностью и состоянием инфраструктуры топливно-энергетического обеспечения формирует одно из условий, обеспечивающих максимальную эффективность транспортного процесса. Исходя из наличия объективной потребности в создании условий, обеспечивающих согласованное развитие ключевых подсистем системы городского пассажирского транспорта, актуальной является задача разработки методики определения оптимальных параметров инфраструктуры топливно-энергетического обеспечения.

Вопросы формирования инфраструктуры топливно-энергетического обеспечения, обеспечивающей эффективное развитие транспортных систем и региональной экономики, рассмотрены в трудах Ю.Н. Гольской, М.В. Иванова, А.М. Кудрявцева, А.А. Тарасенко, О.Н. Ларина и других авторов [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Данные работы посвящены формированию параметров транспортно-энергетической инфраструктуры, исходя из уровня развития производства и социальной сферы. Региональный транспорт рассмотрен в качестве одной из системообразующих отраслей, создающей условия экономического роста.

Процессы и факторы, определяющие формирование инфраструктуры топливно-энергетического обеспечения транспортных систем, рассмотрены в работах Е.В. Бондаренко, А.А. Вельниковского, С.А. Воробьёва, А.А. Евстифеева, С.А. Евтюкова, С.В. Люгай, М.А. Овсянникова, А.С. Тищенко, А.А. Филиппова, Р.Т. Шайлина и других авторов [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25]. Содержание работ данных авторов позволило сформулировать требования к ин-

фраструктуре топливно-энергетического обеспечения. Решение поставленной задачи обеспечено на основе практического применения разработанных математических моделей, описывающих влияние параметров инфраструктуры топливно-энергетического обеспечения на показатели функционирования транспортной системы.

Анализ содержания рассмотренных научных работ позволил выявить недостаточность методического обеспечения процессов согласованного формирования структурных частей системы городского наземного пассажирского транспорта. Большинство исследователей отмечена высокая сложность инфраструктуры топливно-энергетического обеспечения для частных инвесторов. Это обусловлено высокой капиталоемкостью; наличием комплекса ограничений; длительными сроками окупаемости; высокой зависимостью от поставщиков энергоносителей. Одним из направлений решения обозначенных проблем является применение комплексного подхода, обеспечивающего согласованное формирование инфраструктуры городского наземного пассажирского транспорта. Реализация обозначенного подхода требует разработки соответствующего методического обеспечения.

Исходя из обозначенных проблем, сформулирована цель исследования: повышение эффективности работы системы городского наземного пассажирского транспорта на основе согласованного формирования парка эксплуатируемых транспортных средств и инфраструктуры топливно-энергетического обеспечения.

Для достижения поставленной цели необходимо решение ряда задач:

- провести литературный обзор в области, определяемой тематикой исследования;
- разработать методику согласованного формирования парка транспортных средств системы городского наземного пассажирского транспорта и инфраструктуры топливно-энергетического обеспечения;
- сформировать массив данных, необходимых для практической реализации разработанных методов;
- провести проверочный расчёт, подтверждающий работоспособность разработанных методов.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Первоначальным этапом определения оптимальной структуры системы городского наземного пассажирского транспорта является

оптимизация структуры парка транспортных средств. Оптимизация производится исходя из параметров маршрутной сети, объемов перевозок и их распределения по временным интервалам и участкам маршрутов. Решения данной оптимизационной задачи выходит за рамки представленной публикации. Подвижной состав является ключевым потребителем реализуемых энергоресурсов, а его структурные параметры используются в качестве исходной информации при определении оптимальных параметров инфраструктуры топливно-энергетического обеспечения.

Производительность заправочной (зарядной) станции может быть измерена двумя параметрами: объемом реализуемого за заданный период времени энергоносителя; количеством заправок (обслуживаний транспортных средств), произведенных за тот же период. Годовое количество производимых заправок, может быть определено по формуле

$$\Pi_{АЗС1}^{MAX} = \frac{ДР_{ГОД} \cdot T_{СУТ} \cdot e}{(t_1 + t_{ПЗ1}) \cdot k_{НС}} \quad (1)$$

где  $ДР_{ГОД}$  – количество рабочих дней в году, ед.;

$T_{СУТ}$  – суточная продолжительность работы заправочной станции, ч;

$e$  – количество точек обслуживания на заправочном пункте, ед.;

$k_{НС}$  – коэффициент неравномерности поступления транспортных средств в течение суток, ед.;

$t_1$  – средняя продолжительность одной заправки (зарядки), ч;

$t_{ПЗ1}$  – подготовительно-заключительное время одной заправки, ч.

Максимально-возможный объем энергоносителя, реализуемого одной заправочной (зарядной) станцией, может быть рассчитан по формуле

$$V_{АЗС1}^{MAX} = \Pi_{АЗС}^{MAX} \cdot \bar{V}_1 = \frac{ДР_{ГОД} \cdot T_{СУТ} \cdot e \cdot \sum_{j=1}^m (V_{1j} \cdot N_{Aj})}{(t_1 + t_{ПЗ1}) \cdot k_{НС} \cdot N_A} \quad (2)$$

где  $\bar{V}_1$  – средний объем энергоносителя, реализуемого за одну заправку, ед.;

$$n_{АЗС} \geq \frac{N_A \cdot k_{НС} \cdot k \cdot \left( v \cdot \frac{1}{N_A} \cdot \sum_{j=1}^m (V_{1j} \cdot N_{Aj}) + t_{ПЗ1} \right) \cdot \sum_{j=1}^m \left( 0,01 \cdot \sum_{i=1}^n \left( r_{ij} \cdot S_{Обi} \cdot \frac{1}{\beta_i} \right) \cdot H_{Бj} \right)}{ДР_{ГОД} \cdot T_{СУТ} \cdot e \cdot \sum_{j=1}^m (V_{1j} \cdot N_{Aj})} \quad (5)$$

$V_{1j}$  – заправляемый объем транспортного средства j-й категории, ед.;

$N_{Aj}$  – количество пассажирских транспортных средств j-й категории, ед.;

$N_A$  – общее количество транспортных средств – потребителей энергоносителя, ед.

Количество заправок, необходимое для бесперебойного обеспечения работы системы городского наземного пассажирского транспорта:

$$\Pi_{АЗС}^{\Phi АКТ} = \sum_{j=1}^m \left( \frac{0,01 \cdot \sum_{i=1}^n (N_{Aji} \cdot r_{ij} \cdot S_{Обi} + S_{0i}) \cdot H_{Бj} \cdot k}{V_{1j}} \right) \quad (3)$$

где  $N_{Aji}$  – количество транспортных средств j-й категории, обслуживающих i-й маршрут, ед.;

$r_{ij}$  – среднее количество оборотных рейсов, совершаемых транспортными средствами j-й категории, обслуживающих i-й маршрут, ед.;

$S_{Обi}$  – длина оборотного рейса i-го маршрута, км;

$S_{0i}$  – общий нулевой пробег, совершаемый транспортными средствами, обслуживающими i-й маршрут, км;

$H_{Бj}$  – базовая норма расхода топлива транспортных средств j-й категории, ед./км.;

$k$  – поправочный коэффициент к базовой норме расхода топлива, учитывающий условия эксплуатации;

$V_{1j}$  – заправляемый объем транспортного средства j-й категории, ед.

Необходимая численность заправочных (зарядных) станций определяется условиями:

$$\begin{cases} n_{АЗС, V} \geq \frac{V_{Факт}}{V_{АЗС}^{MAX}} \\ n_{АЗС, \Pi} \geq \frac{\Pi_{АЗС}^{\Phi АКТ}}{\Pi_{АЗС}^{MAX}} \end{cases} \quad (4)$$

Преобразованием представленных выражений получено выражение, являющееся основой для расчёта параметров инфраструктуры топливно-энергетического обеспечения:

Установлено, что производительность заправочной станции определяется двумя её параметрами: количеством заправочных постов и средней скоростью заправки ( $v$ ). Исходя из выражения (5), можно сделать вывод о том, что неограниченный объём энергоносителя при неограниченном количестве заправляемых транспортных средств может быть реализован одной заправочной станцией при отсутствии ограничений на количество заправочных постов.

С учётом срока окупаемости инвестиций расчёт минимально-допустимого объёма реализуемого энергоносителя может быть произведён по формуле

$$V_{MIN}^{ГОД} = \frac{K}{\Delta C \cdot [T_{OK}] \cdot (1 - 0,01 \cdot H_{П})} + \frac{3_{Э}}{\Delta C}, \quad (6)$$

где  $\Delta C$  – разница между закупочной и розничной ценой энергоносителя, руб.;  
 $[T_{OK}]$  – принятый допустимый срок окупаемости инвестиций, лет;  
 $H_{П}$  – ставка налога на прибыль, %.

Исходя из вышеизложенного, выдвинута гипотеза о том, что объём энергоносителя, необходимый для обеспечения работы совокупности ключевых потребителей, может быть реализован через сеть заправочных станций, численность которых ( $Y$ ) находится в интервале от 1 до  $Y_{MAX}$ . Величина  $Y_{MAX}$  определяется по формуле

$$Y_{MAX} = \frac{V_{ФАКТ}^{ГОД}}{V_{MIN}^{ГОД}}, \quad (7)$$

где  $V_{ФАКТ}^{ГОД}$  – объём энергоносителя, необходимый на совершение транспортной работы, ед.;  
 $V_{MIN}^{ГОД}$  – объём энергоносителя, определяющий целесообразность строительства заправочной (зарядной) станции, ед.

Очевидно, что затраты на формирование инфраструктуры топливно-энергетического обеспечения и затраты на её эксплуатацию возрастают с увеличением количества заправочных (зарядных) станций. Но увеличение численности заправочных станций способствует сокращению нулевых пробегов и увеличению полезного использования сменного времени.

Системный подход, реализуемый в рамках проводимого исследования, предполагает комплексную оценку эффективности системы городского наземного пассажирского транспорта, включающий в свой состав совокупность транспортных средств, инфраструктуру топливно-энергетического обеспечения, производственно-техническую базу и другие

составляющие, рассматриваемые в качестве подсистем первого уровня. В рамках системного подхода, в качестве минимизируемого показателя, использована сумма эксплуатационных затрат на содержание инфраструктуры и эксплуатационных затрат на перевозку пассажиров. Минимальное значение зависимости суммарных затрат от количества заправочных (зарядных) станций соответствует их оптимальной численности. Предложенная процедура проиллюстрирована при помощи графиков, представленных на рисунке 1.

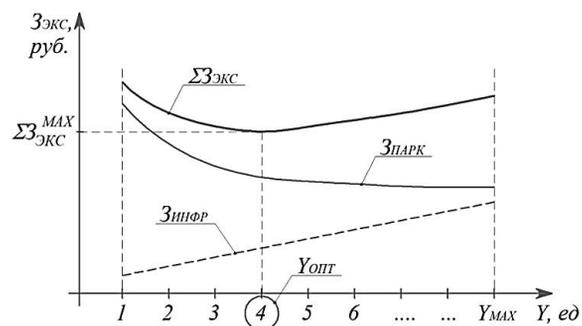


Рисунок 1 – Суммарные затраты, определяющие количество заправочных станций:  
 $Z_{ИНФР}$  – затраты на эксплуатацию инфраструктуры топливно-энергетического обеспечения;  
 $Z_{ПАРК}$  – общие затраты на эксплуатацию парка транспортных средств;  
 $\Sigma Z_{ЭКС}$  – суммарные эксплуатационные затраты;  
 $\Sigma Z_{ЭКС}^{MIN}$  – минимальное значение суммарных эксплуатационных затрат;  
 $Y_{ОПТ}$  – оптимальное количество заправочных (зарядных) станций  
 Источник: составлено автором.

Figure 1 – Total costs determining the number of filling (charging) stations  
 $Z_{ИНФР}$  – costs for the operation of fuel and energy infrastructure;  
 $Z_{ПАРК}$  – the total cost of operating a fleet of vehicles;  
 $\Sigma Z_{ЭКС}$  – total operating costs;  
 $\Sigma Z_{ЭКС}^{MIN}$  – minimum value of total operating costs;  
 $Y_{ОПТ}$  – the optimal number of filling (charging) stations.  
 Source: compiled by the author.

Численность транспортных средств, формирующая потребление энергоносителя в объёме, определённом при помощи формулы (6), может быть составлена из выражения

$$N_{Aj}^{MIN} = \frac{K + 3_{Э} \cdot (1 - 0,01 \cdot H_{П})}{0,01 \cdot \Delta C \cdot S_{ГОД1} \cdot H_{Бj} \cdot k \cdot [T_{OK}] \cdot (1 - 0,01 \cdot H_{П})}. \quad (8)$$

Годовое количество заправочных операций, обеспечивающих эксплуатацию транспортных средств, численность которых определена формулой (8), вычисляется при помощи выражения

$$P_{MIN}^{ГОД} = \frac{K + 3_{\Sigma} \cdot \Delta C \cdot [T_{OK}] \cdot (1 - 0,01 \cdot H_{П})}{\Delta C \cdot [T_{OK}] \cdot (1 - 0,01 \cdot H_{П}) \cdot \bar{V}_1}, \quad (9)$$

где  $\bar{V}_1$  – средний объём энергоносителя, реализуемого в результате выполнения одной заправочной операции, ед.

Условие, определяющее возможность производства данного количества заправочных операций описывается неравенством  $P_{MIN}^{ГОД} \leq P_{АЗС1}^{MAX}$ .

Таким образом, разработаны методические основы, позволяющие вычислить минимально-необходимое количество заправок общего пользования, определяемое структурой парка транспортных средств, эксплуатируемых в рамках системы городского наземного пассажирского транспорта. При наличии других (дополнительных) групп ключевых потребителей количество потребляемого энергоносителя подлежит корректировке с учётом технических характеристик и эксплуатационных параметров транспортных средств данных групп.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Для получения информации, необходимой для практического применения разработанной методики, на репрезентативной выборке заправочных (зарядных) станций проведены статистические исследования, по результатам которых получены данные об объёмах инвестиционных вложений, необходимых для строительства станций различного типа. Объём выборки составил 58 заправочных станций общего пользования Оренбургской области и республики Татарстан, ориентированных на обслуживание коммерческого автотранспорта. Исходя из характера решаемых задач, в выборку не включены многотопливные зарядно-заправочные комплексы, заправки самообслуживания, ведомственные заправки и

заправочные станции, ориентированные на обслуживание не коммерческого транспорта.

На основе результатов обработки данных об объёмах инвестиционных вложений получены выражения, определяющие зависимость объёма данных вложений от технологических параметров заправочных (зарядных) станций. Полученные выражения имеют вид:

- жидкое топливо:

$$K = 525 \cdot R + 50 \cdot e + 11112,5;$$

- сжатый природный газ:

$$K = 20 \cdot e + 30682,5;$$

- сжиженный природный газ:

$$K = 2000 \cdot e + 92290;$$

- электроэнергия:

$$K = 2000 \cdot e + 2725,$$

где  $K$  – объём инвестиционных вложений, тыс. руб.;  $R$  – количество накопителей энергоносителя, ед.;  $e$  – количество точек обслуживания, ед.

Количество накопителей энергоносителя ( $R$ ) в рамках проводимого исследования определяется номенклатурой реализуемых видов топлив. Исходя из этого, для монотопливных заправочных станций, обслуживающих ограниченную группу потребителей, для рассматриваемого диапазона потребляемых объёмов, целесообразное количество накопителей принято равным единице. Скорость заправки при использовании рассматриваемых типов заправочного оборудования принята в качестве постоянной величины, зависящей лишь от вида энергоносителя.

Суммированием математических выражений, используемых при определении численных значений составляющих эксплуатационных затрат на содержание заправочных (зарядных) станций, реализующих различные виды энергоносителей, получены итоговые выражения, позволяющие произвести укрупнённый расчёт объёма эксплуатационных затрат. Данные выражения приведены в таблице.

Таблица  
Выражения для укрупнённого расчёта годового объёма эксплуатационных затрат на содержание заправочной (зарядной) станции  
Источник: составлено автором.

Table  
Expressions for the enlarged calculation of the annual volume of operating costs for the maintenance of a filling (charging) station  
Source: compiled by the author.

Вид энергоносителя	Выражение для укрупнённого расчёта годовых эксплуатационных затрат на содержание заправочной (зарядной) станции
Жидкое топливо	$\Sigma ЗЭКС = 161200 \cdot R + 29300 \cdot e + 15,186 \cdot V_{ГОД} + 7086708$
Сжиженный углеводородный газ	$\Sigma ЗЭКС = 173075 \cdot R + 35900 \cdot e + 12,154 \cdot V_{ГОД} + 8688334$
Компримированный природный газ	$\Sigma ЗЭКС = 16780 \cdot e + 3,46 \cdot V_{ГОД} + 11064664$
Электроэнергия	$\Sigma ЗЭКС = 80300 \cdot e + 1,595 \cdot V_{ГОД} + 7448011$

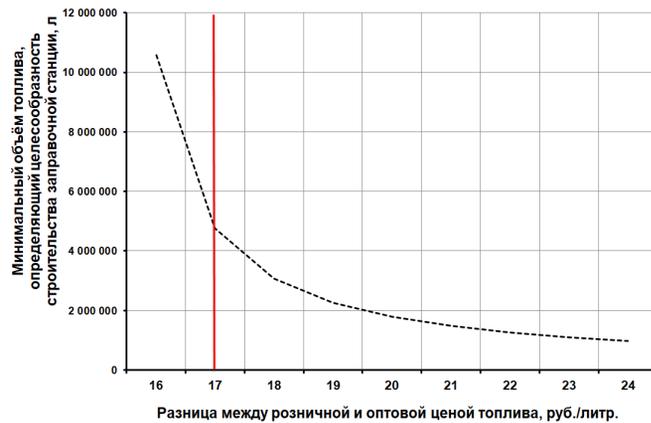


Рисунок 2 – Минимальный объем жидкого топлива, определяющий целесообразность строительства заправочной станции  
Источник: составлено автором.

Figure 2 – The minimum volume of liquid fuel that determines the feasibility of a gas station construction  
Source: compiled by the author.

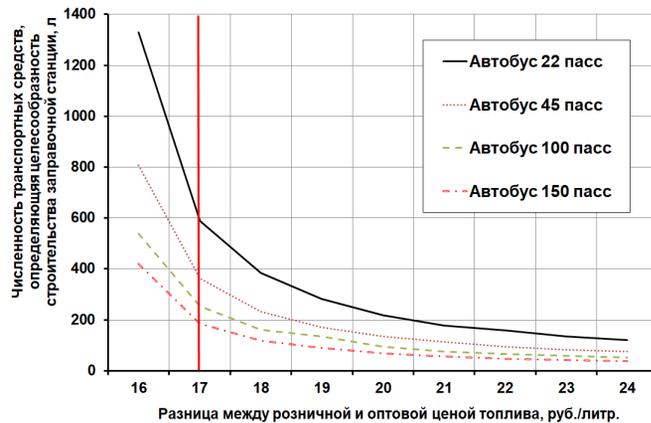


Рисунок 3 – Минимальная численность транспортных средств, определяющая заданный уровень энергопотребления  
Источник: составлено автором.

Figure 3 – The minimum number of vehicles determining a given level of energy consumption  
Source: compiled by the author.

При помощи разработанной методики произведено математическое моделирование условий, определяющих согласованное формирование инфраструктуры топливно-энергетического обеспечения как подсистемы первого уровня системы городского пассажирского наземного транспорта. На рисунке 1 в качестве примера приведён один из полученных графиков. График иллюстрирует зависимость минимального объёма энергоносителя (жидкого топлива), определяющий целесообразность строительства заправочной станции от разницы между оптовой и розничной ценой топлива. На рисунке 2 представлены значения минимальной численности средств различной пассажироместимости, формирующие объём

потребления, определяющий целесообразность строительства заправочной станции, от разницы между оптовой и розничной стоимостью топлива.

На рисунках 2, 3 показана фактическая средняя разница между оптовой и розничной ценой на жидкое топливо в Оренбургской области по состоянию на июнь 2023 г. (с учётом акцизного сбора). Исходя из установленного соотношения цен установлена минимальная численность транспортных средств различной пассажироместимости, которая составляет: 590 ед. пассажироместимостью 22 чел.; 370 ед. пассажироместимостью 45 чел.; 260 ед. пассажироместимостью 100 чел.; 190 ед. пассажироместимостью 150 ед.

Таким образом, получены данные, составляющие основу для реализации комплексного подхода при проектировании подсистем, входящих в состав системы городского наземного пассажирского транспорта.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Городской пассажирский транспорт является одной из важнейших систем, определяющих комфортность городской среды и качество жизни городского населения. Одной из ключевых подсистем первого уровня, входящей в систему городского наземного пассажирского транспорта и во многом определяющий эффективность транспортного процесса, является инфраструктура топливно-энергетического обеспечения. Выдвинутая на начальном этапе исследования гипотеза о целесообразности применения логистического подхода при формировании указанной инфраструктуры нашла своё подтверждение в ходе выполнения литературного обзора и основе анализа результатов выполненной научной работы. В ходе изучения известных научных работ выявлена недостаточная проработанность методов реализации системного подхода при формировании подсистем, входящих в состав системы городского наземного пассажирского транспорта.

Разработанная и представленная методика позволяет реализовать логистический подход при определении проектных параметров инфраструктуры топливно-энергетического обеспечения. Практическая реализация разработанной методики позволяет обеспечить достижение поставленной цели – повышение эффективности системы городского наземного пассажирского транспорта.

*В ходе выполнения экспериментально-исследовательской части работы получены данные, необходимые для практического применения данной методики. В заключительной части исследования проведено моделирование потребления энергоресурсов различными категориями транспортных средств, определены зависимости, формирующие проектные параметры инфраструктуры топливно-энергетического обеспечения.*

Очевидным направлением дальнейших исследований является разработка методов определения оптимальной структуры всей совокупности подсистем городского наземного пассажирского транспорта и алгоритма выполнения оптимизационного расчёта, позволяющего обеспечить согласованное формирование рассматриваемых ключевых подсистем.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гольская Ю. Н. Понятие транспортной инфраструктуры и оценка ее влияния на региональную экономику // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы второй межвузовской научно-практической конференции: в 6 т. Иркутск: ИрГУПС, 2011. С. 157–162.
2. Иванов М. В. Транспортная обеспеченность и экономическое развитие регионов (на примере регионов Поволжья) // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения. 2014. № 2 (24). С. 125–131.
3. Иванов М. В. Транспортная система и транспортная инфраструктура: взаимосвязь и факторы развития // Экономика и предпринимательство. 2015. № 12-2 (65). С. 418–422.
4. Кудрявцев А. М. Особенности функционирования автотранспортной инфраструктуры Российской Федерации // Академический журнал Западной Сибири. 2015. Т. 11, № 1. С. 118–119.
5. Кудрявцев А. М., Тарасенко А. А. Методический подход к оценке развития транспортной инфраструктуры региона // Фундаментальные исследования. 2014. № 6-4. С. 789–793.
6. Ларин О. Н. Методологические основы организации и функционирования транспортной системы региона: монография. Челябинск: ЮУрГУ, 2007. 207 с.
7. Бондаренко Е. В., Федотов А. М., Шайлин Р. Т. Формирование сети заправочных станций компримированным природным газом // Вестник Оренбургского государственного университета. 2014. № 10 (171). С. 23–29.
8. Бондаренко Е. В., Шайлин Р. Т., Филиппов А. А., Сологуб В. А. Формирование газозаправочной инфраструктуры, адаптированной к параметрам работы пассажирского маршрутного транспорта // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 1-4 (55). С. 25–29.
9. Вельниковский А. А. Имитационное моделирование инфраструктуры автомобильных газонаполнительных компрессорных станций Санкт-Петербурга на основе районирования городской территории на кластеры // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 5 (64). С. 137–141.
10. Вельниковский А. А. Концепция инфраструктуры газомоторного парка автомобильного транспорта пути развития // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 6 (47). С. 183–187.
11. Воробьев С. А. Перспективы развития автомобильного транспорта на альтернативной энергетике: монография. СПб.: Научное издание, 2023. 122 с.
12. Евстифеев А. А. Математическая модель определения численности и производительности заправочных колонок на АГНКС // Газовая промышленность. 2015. № 8 (726). С. 95–97.
13. Евстифеев А. А. Методология рационального построения и непрерывного совершенствования региональной сети АГНКС // Транспорт на альтернативном топливе. 2014. № 3 (39). С. 53–60.

14. Евтюков С. А., Воробьев С. А., Абызов И. Т. Перспективные пути повышения экологической безопасности автобусного парка страны // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 6 (59). С. 213–215.

15. Люгай С. В., Петряхина В. Б., Гнедова Л. А., Гриценко К. А. О нормировании эксплуатационных затрат на АГНКС // Транспорт на альтернативном топливе. 2010. № 1 (13). С.30–34.

16. Овсянников М. А., Воробьев С. А. Перспектива развития СПГ технологии на автомобильном транспорте в СЗФО. Анализ состояния инфраструктуры, существующих заправок и заводов СПГ // Евразийский научный журнал. 2020. № 2. С. 19–24.

17. Овсянников М. А., Воробьев С. А. Перспектива развития СПГ технологии на автомобильном транспорте в СЗФО. Анализ состояния инфраструктуры, существующих заправок и заводов СПГ // Евразийский научный журнал. 2020. № 2. С. 19–24.

18. Тищенко А. С., Дрючин Д. А., Филиппов А. А., Шайлин Р. Т. Повышение эффективности функционирования автотранспортного комплекса региона на основе применения альтернативных схем топливно-энергетического обеспечения // Газовая промышленность. 2020. № 1 (795). С. 74–80.

19. Шайлин Р. Т., Филиппов А. А., Арсланов М. А. Структурно-функциональная модель системы «Автобусный парк – газозаправочный комплекс» // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2020. № 1. С. 122–130.

20. Шайлин Р. Т., Филиппов А. А., Сулейманов И. Ф. Определение потребности в совершенствовании сети метановых заправочных станций // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2017. № 11. С. 59–62.

21. Saadat-Targhi M., Khadem J., Farzaneh-Gord M. Thermodynamic analysis of a CNG refueling station considering the reciprocating compressor // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2016. Vol. 29, pp. 453–461.

22. Ghedan S. G. Aljawad M. S., Poettmann F. H. Compressibility of natural gases // Journal of Petroleum Science and Engineering. 1993. Vol. 10. № 2, pp. 157–162.

23. Farzaneh-Gord M., Niazmand A., Deymi-Dashtebayaz M., Rahbari H. R. Effects of natural gas compositions on CNG (compressed natural gas) reciprocating compressors performance // Energy. 2015. Vol. 90 (Part 1), pp. 1152–1162.

24. Baratta M., D'Ambrosio S., Iemmolo D., Misul D. Method for the recognition of the fuel composition in CNG engines fed with natural gas/biofuel/hydrogen blends // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2017. Vol. 40, pp. 312–326.

25. Suleimanov I. F., Moskova E. V., Bondarenko E. V., Shaylin R. T., Filippov A. A. Improvement of system of providing with gas motor fuel // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. 2018. Vol. 10. №13. Special Issue, pp. 564–568.

## REFERENCES

1. Golskaya Yu. N. Ponyatie transportnoj infrastruktury i ocenka ee vliyaniya na regional'nyuy

ekonomiku [Conceito de infraestrutura de transporte e avaliação de seu impacto na economia regional]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: segunda conferência interuniversitária: em 6 volumes - Irkutsk; IrGUPS, 2011:157-162 p. (In Russ.)*

2. Ivanov M. V. Transportnaya obespechennost' i ekonomicheskoe razvitie regionov (na primere regionov Povolzh'ya) [Segurança de transporte e desenvolvimento econômico das regiões (por exemplo, regiões do Volga)]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2014; 2 (24): 125-131. (In Russ.)

3. Ivanov M. V. Transportnaya sistema i transportnaya infrastruktura: vzaimosvyaz' i faktory razvitiya [Transport system and transport infrastructure: interrelation and development factors]. *Ekonomika i predprinimatel'stvo*. 2015; 12-2 (65): 418-422. (In Russ.)

4. Kudryavtsev A.M. Osobennosti funkcionirovaniya avtotransportnoj infrastruktury Rossijskoj Federacii [Características do funcionamento da infra-estrutura de transporte rodoviário da Federação Russa]. *Akademicheskij zhurnal Zapadnoj Sibiri*. 2015; 1, Volume 11. 118-119. (In Russ.)

5. Kudryavtsev A.M., Tarasenko A. A. Metodicheskij podhod k ocenke razvitiya transportnoj infrastruktury regiona [Methodological approach to assessing the development of transport infrastructure in the region]. *Fundamentalnye issledovaniya*. 2014; 6-4: 789-793. (In Russ.)

6. Larin O. N. *Metodologicheskie osnovy organizacii i funkcionirovaniya transportnoj sistemy regiona* [Methodological foundations of the organization and functioning of the transport system of the region]: monograph – Chelyabinsk: SUSU Publishing House, 2007: 207. (In Russ.)

7. Bondarenko E. V., Fedotov A.M., Shaylin R. T. Formirovanie seti zapravochnyh stancij komprimirovannym prirodnyim gazom [Formation of a network of gas stations with compressed natural gas]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014; 10 (171): 23-29. (In Russ.)

8. Bondarenko E. V., Shaylin R. T., Filippov A. A., Sologub V. A. Formirovanie gazozapravochnoj infrastruktury, adaptirovannoj k parametram raboty passazhirskogo marshrutnogo transporta [Formation of gas refueling infrastructure adapted to the parameters of passenger route transport]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. 2017; 1-4 (55): 25-29. (In Russ.)

9. Velnikovskiy A. A. Imitacionnoe modelirovanie infrastruktury avtomobil'nyh gazonapolnitel'nyh kompressornyh stancij Sankt-Peterburga na osnove rajonirovaniya gorodskoj territorii na klastery [Simulation modeling of the infrastructure of automobile gas-filling compressor stations of St. Petersburg on the basis of zoning of urban territory into clusters]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2017; 5 (64): 137-141. (In Russ.)

10. Velnikovskiy, A. A. Konceptsiya infrastruktury gazomotornogo parka avtomobil'nogo transporta. puti razvitiya [Conceito de infra-estrutura de uma frota de veículos movidos a gás. caminhos de desenvolvimento]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2014; 6 (47): 183-187. (In Russ.)

11. Vorobyov S. A. *Perspektivy razvitiya avtomobil'nogo transporta na al'ternativnoj energetike* [Prospects for the development of road transport on alternative energy]. Monograph. – St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2023: 122. (In Russ.)

12. Evstifeev A. A. Matematicheskaya model opredeleniya chislennosti i proizvoditel'nosti zapravochnyh kolonok na AGNKS [Mathematical model for determining the number and productivity of filling columns at CNG stations]. *Gazovaya promyshlennost*. 2015; 8 (726): 95-97. (In Russ.)

13. Evstifeev A. A. Metodologiya racional'nogo postroeniya i nepreryvnogo sovershenstvovaniya regional'noj seti AGNKS [Methodology of rational construction and continuous improvement of the regional network of CNG stations]. *Transport na alternativnom toplive*. 2014; 3 (39): 53-60. (In Russ.)

14. Evtuykov S. A., Vorobyov S. A., Abyzov I. T. Perspektivnye puti povysheniya ekologicheskoy bezopasnosti avtobusnogo parka strany [Promising ways to improve the environmental safety of the country's bus fleet]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2016; 6 (59): 213-215. (In Russ.)

15. Lyugay, S. V. Petryakhina V. B., Gnedova L. A., Gritsenko K. A. O normirovani ekspluatatsionnyh zatrat na AGNKS [On rationing of operating costs for CNG stations]. *Transport na alternativnom toplive*. 2010; 1 (13): 30-34. (In Russ.)

16. Ovsyannikov M. A., Vorobyov S. A. Perspektiva razvitiya SPG tekhnologii na avtomobil'nom transporte v SZFO. Analiz sostoyaniya infrastruktury, sushchestvuyushchih zapravok i zavodov SPG [Prospects for the development of LNG technology in road transport in the NWFD. Analysis of the state of infrastructure, existing gas stations and LNG plants]. *Evrzyskiy nauchnyy zhurnal*. 2020; 2: 19-24. (In Russ.)

17. Ovsyannikov M. A., Vorobyov S. A. Perspektiva razvitiya SPG tekhnologii na avtomobil'nom transporte v SZFO. Analiz sostoyaniya infrastruktury, sushchestvuyushchih zapravok i zavodov SPG [Prospects for the development of LNG technology in road transport in the Northwestern Federal District. Analysis of the state of infrastructure, existing gas stations and LNG plants]. *Evrzyskiy nauchnyy zhurnal*. 2020; 2: 19-24. (In Russ.)

18. Tishchenko A. S., Dryuchin D. A., Filippov A. A., Shaylin R. T. Povyshenie effektivnosti funkcionirovaniya avtotransportnogo kompleksa regiona na osnove primeneniya al'ternativnyh skhem toplivno-energeticheskogo obespecheniya [Improving the efficiency of the functioning of the motor transport complex of the region

based on the use of alternative fuel and energy supply schemes]. *Gazovaya promyshlennost*. 2020; 1 (795): 74-80. (In Russ.)

19. Shaylin R. T., Filippov A. A., Arslanov M. A. Ctrukturno-funkcionalnaya model sistemy «Avtobusnyj park - gazozapravochnyj kompleks» [Structural and functional model of the system «Bus park - gas station complex»]. *Intellekt. Innovacii. Investicii*. 2020; 1: 122-130. (In Russ.)

20. Shaylin R. T., Filippov A. A., Suleymanov I. F. Opredelenie potrebnosti v sovershenstvovanii seti metanovyh zapravochnyh stancij [Determination of the need to improve the network of methane gas stations]. *Intellekt. Innovacii. Investicii*. 2017; 11: 59-62. (In Russ.)

21. Saadat-Targhi M., Khadem J., Farzaneh-Gord M. [Thermodynamic analysis of a CNG refueling station considering the reciprocating compressor]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016; Vol. 29: 453–461.

22. Ghedan S. G. Aljawad M. S., Poettmann F. H. [Compressibility of natural gases]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 1993; Vol. 10. No. 2: 157–162.

23. Farzaneh-Gord M., Niazmand A., Deymi-Dashtebayaz M., Rahbari H. R. [Effects of natural gas compositions on CNG (compressed naturalgas) reciprocating compressors performance]. *Energy*. 2015; Vol. 90 (Part 1): 1152–1162.

24. Baratta M., D'Ambrosio S., Iemmolo D., Misul D. [Method for the recognition of the fuel composition in CNG engines fed with natural gas/biofuel/hydrogen blends]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2017; Vol. 40: 312–326.

25. Suleimanov I. F., Moskova E. V., Bondarenko E. V., Shajlin R. T., Filippov A. A. [Improvement of system of providing with gas motor fuel]. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 2018; Vol. 10. No. 13. Special Issue: 564–568.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Дрючин Дмитрий Алексеевич – канд. техн. наук, доц., ORCID I 0000-0002-1311-6462; SPIN-код: 5075-0710.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Dmitry A. Dryuchin – Cand. of Sci., Associate Professor, SPIN-код: 5075-0710.

Научная статья  
УДК 621.892.28  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-728-737>  
EDN: OKGGSO



## АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МОТОРНОГО МАСЛА ВСЛЕДСТВИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДОЙ И ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ

**С.В. Пашукевич**

Омский государственный технический университет (ОмГТУ),  
г. Омск, Россия  
[sofia96@bk.ru](mailto:sofia96@bk.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8111-4725>

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В процессе эксплуатации тяжело нагруженной дизельной техники в районах с низкотемпературным климатом моторные масла подвергаются загрязнению со стороны охлаждающей жидкости и воды. Попадание данных веществ в смазочный материал приводит к ухудшению его показателей качества, что впоследствии влечет проблемы в узлах двигателя внутреннего сгорания.

**Актуальность.** Ухудшение значений показателей качества моторного масла напрямую связано с наличием воды и охлаждающей жидкости в нем. Не всегда возможно объективно отследить пути утечек данных загрязнителей, а это, в свою очередь, приводит к серьезным последствиям в виде износа соприкасающихся поверхностей деталей двигателя, коррозии. Важна также и оценка ресурса пакетов присадок смазочного материала вследствие разжижения его водой и антифризом.

**Материалы и методы.** В данной работе приведены результаты литературного обзора, направленного на изучение путей попадания охлаждающей жидкости и воды при эксплуатации дизельных двигателей, их влияния на физико-химические свойства моторных масел. Обозначены краткие сведения о составе охлаждающей жидкости.

**Выводы.** Попадание воды и охлаждающей жидкости в моторное масло влечет за собой увеличение кинематической вязкости смазочного материала, а также к образованию отложений на поверхностях пар трения двигателя. Помимо этого в картере двигателя возникают шарообразные соединения, представляющие собой совокупность разрушенных пакетов присадок и гликоля. Интервалы замены масла необходимо контролировать при повышенной интенсивности поступления воды и охлаждающей жидкости в моторное масло.

**Рамки исследования/возможность.** Такого вида исследование поможет определить причины проникновения воды и охлаждающей жидкости в картерное пространство, понять последствия использования загрязненного водой и охлаждающей жидкостью моторного масла.

**Оригинальность/ценность.** Проведенное исследование может являться основой для разработки рекомендаций по совершенствованию технического обслуживания двигателей внутреннего сгорания для предприятий, имеющих в своем распоряжении автомобили с дизельными двигателями с целью увеличения ресурса силовых агрегатов и сокращения эксплуатационных затрат.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** моторное масло, окисление, вода, двигатель внутреннего сгорания, охлаждающая жидкость, износ, присадки

**Статья поступила в редакцию 19.09.2023; одобрена после рецензирования 14.11.2023; принята к публикации 20.12.2023.**

**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: Пашукевич С.В. Анализ работоспособности моторного масла вследствие загрязнения водой и охлаждающей жидкостью // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6 (94). С. 728-737. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-728-737>

© Пашукевич С.В., 2023



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-728-737>  
EDN: OKGGSO

## MOTOR OIL PERFORMANCE ANALYSIS DUE TO WATER AND COOLANT CONTAMINATION

**Sofia V. Pashukevich**

Omsk State Technical University (OmSTU),

Omsk, Russia

[sofia96@bk.ru](mailto:sofia96@bk.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8111-4725>

### ABSTRACT

**Introduction.** During the operation of heavy-duty diesel equipment in areas with a low-temperature climate, engine oils are contaminated by coolant and water. The ingress of these substances into the lubricant leads to a deterioration in its quality indicators, which subsequently leads to problems in the nodes of the internal combustion engine.

**Relevance.** The deterioration of the values of engine oil quality indicators is directly related to the presence of water and coolant in it. It is not always possible to objectively track the ways of leakage of these pollutants, and this, in turn, leads to serious consequences in the form of wear of the contacting surfaces of engine parts, corrosion. It is also important to evaluate the resource of lubricant additive packages due to its dilution with water and antifreeze.

**Materials and methods.** This paper presents the results of a literature review aimed at studying the ways of coolant and water ingress during the operation of diesel engines, their influence on the physical and chemical properties of motor oils. The brief information about the composition of the coolant is indicated.

**Conclusions.** The ingress of water and coolant into the engine oil leads to an increase in the kinematic viscosity of the lubricant, as well as to the formation of deposits on the surfaces of the engine friction pairs. In addition, spherical compounds appear in the crankcase of the engine, which are a combination of destroyed additive packages and glycol. Oil change intervals must be monitored at an increased rate of water and coolant entering the engine oil.

**Scope of the study / possibility.** This type of study will help to determine the causes of penetration of water and coolant into the crankcase space, to understand the consequences of using engine oil contaminated with water and coolant.

**Originality / value.** The conducted research can be the basis for the development of recommendations for improving the maintenance of internal combustion engines for enterprises that have at their disposal cars with diesel engines in order to increase the resource of power units and reduce operating costs.

**KEYWORDS:** engine oil, oxidation, water, internal combustion engine, kinematic viscosity, coolant, wear, additives

**The article was submitted 19.09.2023; approved after reviewing 14.11.2023; accepted for publication 20.12.2023.**

**The author has read and approved the final manuscript.**

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

**For citation.** Sofia V. Pashukevich Motor oil performance analysis due to water and coolant contamination. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (6): 728-737. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-728-737>

© Pashukevich S. V., 2023



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

## ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что смазочные материалы используются в узлах трения автомобильной техники, особое внимание уделяется маслу, используемому в двигателях внутреннего сгорания. Моторное масло эксплуатируется при таких условиях, как высокая температура; высокое давление; агрессивная среда, попадание твердых углеродных частиц, дизельного топлива, воды и охлаждающей жидкости, а также окислительный процесс [1, 2, 3, 4]. Производители моторных масел постоянно совершенствуют рецептуру, добиваясь того, чтобы смазочный материал обеспечивал при наличии всех указанных выше факторов надлежащую смазку поверхностей трущихся деталей двигателя, при этом сводя к минимуму износ. Моторное масло, которое имеет в своем объеме возникшие при эксплуатации такие загрязнители, как сажа и вода, должно обеспечивать их улавливание либо изоляцию для препятствия попадания на движущиеся поверхности пар трения [5].

Смазывание поверхностей обеспечивает один из нескольких режимов смазки. Режим напрямую взаимосвязан с образованием масляной пленки между трущимися поверхностями деталей. Толщина масляной пленки зависит от нагрузки, кинематической вязкости масла при 100 °С и относительной скорости перемещения трущихся поверхностей деталей двигателя внутреннего сгорания [6, 7, 8].

При использовании режима гидродинамической смазки толщина масляной пленки достигает более двух микрон, что препятствует образованию износа поверхности и деформации материала поверхности соответственно. Эластогидродинамический режим смазки развивается в условиях высокой нагрузки, создавая более высокие давления и более тонкие пленки жидкости порядка 0,05–2 мкм. Давления, возникающие в зоне взаимодействия, достаточно велики, чтобы вызвать упругую деформацию поверхностных слоев сопряженных деталей. Это выражается в увеличении микротвердости поверхностных слоев. Частицы, размеры которых значительно превышают более тонкую масляную пленку, могут вызывать вмятины при экстремальных давлениях. Конечный режим, т.е. граничная смазка, применяется в ситуациях, которые могут привести к нехватке масла в зоне контакта. Толщина масляной пленки при граничной смазке может составлять от 0,001 до 0,05 мкм. При таких толщинах шероховатость поверхности детали становится фактором, влияющим на скорость

износа, и в тех случаях, когда масляная пленка практически исчезает, может произойти износ поверхностей пар трения. Даже очень мелкие частицы, попавшие в масло, могут ускорить износ поверхности [9].

В ходе эксплуатации моторные масла постоянно подвергаются загрязнению извне, тяжелые климатические условия, условия работы техники приводят к деградации смазочного материала. Наиболее подвержены загрязнению в виде воды, охлаждающей жидкости и сажи моторные масла, применяемые в дизельных двигателях [10].

В связи с этим производителями двигателей выставляются рекомендации по интервалу замены масла в зависимости от пробега или мото-часов. Достижения в области производства и рецептуры моторных масел сделали возможным увеличить эти интервалы замены, одновременно улучшая экономию топлива и снижая выбросы вредных веществ с отработавшими газами [11].

С появлением и последующим распространением электронного управления двигателем производители автомобилей создали множество алгоритмов, предназначенных для расчета состояния масла на основе рабочих параметров двигателя.

По мере того как масло циркулирует по различным частям двигателя, загрязняющие соединения негативно влияют на моторное масло. Ухудшение качества масла с течением времени может привести к увеличению износа, нанося вред двигателю и вводя частицы износа в систему смазки, что еще больше увеличивает износ двигателя [12].

## КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЛИКОЛЕ – ОСНОВНОМ КОМПОНЕНТЕ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

В совокупности вода и гликоль в соотношении 50/50 образуют хладагент. Его основные назначения – повышение температуры кипения и снижение температуры замерзания. Помимо данных свойств охлаждающая жидкость способствует защите от коррозии и кавитации, в зависимости от ее состава.

Этиленгликоль находит более широкое распространение, несмотря на токсичность, по сравнению с пропиленгликолем, в первую очередь из-за высоких теплопередающих свойств. Пакет присадок обширен не только в отрасли смазочных материалов, добавки различной природы (металлоорганика и органика) используются и в составе антифризов (основной вид охлаждающей жидкости). Именно добав-

ляемые пакеты способствуют предотвращению образования на поверхности металлов коррозии, кавитации, накипи, также предотвращают вспенивание и поддерживают нормальный уровень pH. Соединениями добавок к антифризу являются фосфаты, борат натрия, молибдат, силикат натрия, гидроксид калия и нитрат натрия. Данные соединения помогают понять при элементном анализе загрязнено ли моторное масло охлаждающей жидкостью [13, 14].

Добавки, используемые в рецептурах антифризов, значительно различаются между поставщиками на вторичном рынке и производителями оборудования, которые поставляют оригинальную заводскую заливку и предлагают дополнительные присадки к охлаждающей жидкости [15].

### ПУТИ ПОПАДАНИЯ ГЛИКОЛЯ В МОТОРНЫЕ МАСЛА

Гликоль может попадать в моторные масла различными путями. К ним относятся:

- дефектные или изношенные уплотнения;
- прокладка выдувной головки;
- неправильно затянутые болты;
- термически деформированные или треснувшие головки блоков цилиндров (от низкого уровня охлаждающей жидкости до заклинившего термостата);
  - треснувший блок или головка блока цилиндров из-за замерзшей охлаждающей жидкости;
  - неправильно обработанные поверхности головки и блока цилиндров;
  - коррозионные повреждения гильз цилиндров;
  - кавитационная эрозия и коррозия гильз цилиндров;
  - электрохимическая эрозия;
  - поврежденные или проржавевшие сердечники охладителя;
  - неисправность уплотнения водяного насоса и засорение сливного отверстия.

Более половины отказов в узлах дизельных двигателей связаны с попаданием охлаждающей жидкости в моторное масло, причем наибольшему риску подвергаются дизельные двигатели в нерабочее время. В результате непостоянной работы двигателя возникают внутренние утечки воды, дизельного топлива и охлаждающей жидкости. Наиболее подвержены утечкам головки цилиндров. В таких случаях уплотнительные прокладки могут смещаться. В системе смазки у моторного масла

гидростатическое давление ниже по сравнению с охлаждающей жидкостью в системе охлаждения при неработающем двигателе. Этот фактор является основной причиной попадания охлаждающей жидкости в смазочный материал [16, 17, 18, 19, 20].

Кавитация пара присуща поверхности гильзы цилиндра в области водяной рубашки. Такое явление возникает также вследствие утечек в двигателях из-за сильной вибрации гильз при тактах впрыска, сжатия и горения. Указанные действия приводят к тому, что образуются области отрицательного давления, в которых возникают пузырьки пара [21]. При такте сгорания топлива возможно проявление процессов кавитации в верхней части гильзы цилиндра. Это может сопровождаться образованием окислов на поверхности гильзы цилиндра [22].

В случае длительного кавитационного воздействия возможно разрушение гильзы цилиндра с образованием утечек охлаждающей жидкости в камеру сгорания (рисунок 1). Эти процессы могут сопровождаться как механическим кавитационным воздействием, так и химическим [23].



Рисунок 1 – Кавитационная эрозия стенки цилиндра [14]

Figure 1 – Cavitation erosion of the cylinder wall [14]

Рост кавитационной коррозии может быть замедлен в связи с наличием ингибитора (молибдата натрия и нитрита натрия) в составе охлаждающей жидкости. Использование ингибиторов, замедляющих процессы окисления, позволяет уменьшить химическое воздействие с внутренней стороны гильзы цилиндра [24].



Рисунок 2 – Механизм образования масляных шариков из-за загрязнения картерного масла гликолем [14]

Figure 2 – Mechanism of oil balls formation due to contamination of crankcase oil with glycol [14]

### ВРЕД ОТ МОТОРНОГО МАСЛА, ЗАГРЯЗНЕННОГО ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ

Смесь моторного масла, гликоля и воды является губительной для двигателя внутреннего сгорания. Последние два загрязнителя в смазочную систему попадают одновременно. При попадании гликоля в картер коренные и шатунные подшипники начинают темнеть.

В минеральном масле гликоль не растворяется, потому что тяжелые условия эксплуатации двигателя (высокие температуры, процесс окисления) способствуют тому, что в составе гликоля начинается образование различных химических соединений.

Далее описаны серьезные последствия, возникающие вследствие утечки охлаждающей жидкости [25].

- Гидравлический замок

В ходе эксплуатации автомобильной техники возможно образование очагов коррозии и разъедание стенок гильз цилиндров, что является причиной точечной перфорации. В том случае, когда двигатель не заведен, есть высокая вероятность заполнения камеры сгорания охлаждающей жидкостью в случае негерметичности системы охлаждения. При заполнении камеры сгорания антифризом движение поршня вверх практически невозможно, так как антифриз является трудносжимаемой жидкостью. В этом случае основная нагрузка приходится на поршень, поршневые кольца, подшипники поршневого пальца, подшипники

шатуна и коленчатого вала. Блок вызывает невозможность оттока охлаждающей жидкости, из-за чего возникают отказы в работе подшипников и поршневых колец.

- Нарушение в работе подшипников из-за действия кислот

В ходе стандартной эксплуатации техники основной компонент охлаждающей жидкости этиленгликоль, окисляясь, образует органические кислоты: гликолевая, щавелевая, муравьиная кислота и углекислая. При каждом повышении температуры на 10 °С скорость реакции увеличивается вдвое. Наличие кислот в моторном масле влечет за собой повреждение подшипников и других поверхностей трения. Коррозионные условия могут привести к образованию трещин на покрытых слоем свинца/олова поверхностях подшипников, появлению ржавчины на стальных и железных поверхностях и потускнению металлов, таких как бронза и латунь.

### МАСЛЯНЫЕ ШАРИКИ И ОСАЖДЕНИЕ ПРИСАДОК

Компания Chevron и другие исследователи сообщили, что при термическом старении охлаждающих жидкостей на основе гликоля в картерном пространстве образуются масляные шарики, в основном в результате реакции гликоля с присадками к базовому моторному маслу (рисунок 2). Используемые добавки включают сульфонаты, фенаты и ZDDP (диалкилдитиофосфат цинка) [26, 27, 28].

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОДОЙ И ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ

Вода считается одним из наиболее разрушительных загрязнителей, влияющих на систему смазки. Небольшое количество воды, образующейся естественным образом в качестве побочного продукта сгорания углеводородов, попадет в систему смазки двигателя внутреннего сгорания независимо от принятых мер предосторожности. Это происходит из-за тонкой масляной пленки на внутренней поверхности цилиндра. Попадание моторного масла обратно в масляный поддон картера зависит от движения поршня. Низкая температура и работа на холостом ходу может усугубить попадание воды в картер из-за повышенного образования конденсата на относительно холодных деталях двигателя. Эта проблема может быть устранена самостоятельно, если двигатель работает в условиях повышенной нагрузки, с помощью увеличения температуры масла выше точки кипения воды. Водяной пар в силу своих свойств легко проникает сквозь неплотности смазочной системы и выходит наружу. Работоспособность моторного масла зависит от его чистоты, тем самым даже незначительное количество воды разрушает базовую основу и пакеты присадок масла. Высокое содержание воды в моторном масле снижает уровень смазывающей способности, приводя к повышенному износу трущихся деталей двигателя [29].

Состояние воды в моторном масле ограничивается тремя видами: растворенном, свободном и эмульгированном. На рисунке 3 показаны данные виды.



Рисунок 3 – Вода в моторном масле в различных состояниях [17]

Figure 3 – Water in engine oil in various states [17]

Моторное масло и вода в одной емкости имеют четкое разделение фаз, при этом масло способно растворять в себе совсем небольшой объем воды. Визуально изменения трудно заметить, так как они выражаются только в незначительном обесцвечивании [30].

После того, как моторное масло насытилось водой, образуется свободная вода. При незаведенном двигателе вода опускается на дно картера в связи с более высокой плотностью по сравнению с маслом. Масляный насос при заведенном двигателе способствует постоянному перемешиванию воды и маслом. При большом количестве свободной воды в масле образуется эмульсия. Чтобы определить, есть ли вода в смазочной системе, достаточно зрительно оценить цвет, наличие молочной пены говорит о присутствии данного жидкого загрязнителя. Антифриз применяется почти во всех дизельных двигателях тяжелонагруженной техники в составе 50% воды и 50% этилен-, пропилен-гликоля. Эта смесь способствует уменьшению температуры замерзания смеси, одновременно повышая температуру кипения. Внутри блока цилиндров имеются многочисленные каналы, по которым протекает охлаждающая жидкость, поддерживая стандартную рабочую температуру двигателя. В блоке цилиндров также имеются аналогичные каналы для движения масла по механизмам, например, по клапанному. Загрязнение системы смазки антифризом напрямую зависит от последовательного соединения указанных каналов. В связи с тем, что уплотнители не гарантируют стопроцентную герметичность, утечка охлаждающей жидкости может возникнуть как в прокладке головки блока цилиндров, уплотнительных кольцах форсунок, а также трещины в блоке цилиндров. Скорость попадания охлаждающей жидкости в моторное масло может меняться от небольшого попадания в течение длительного времени до конкретного слива за относительно малый период эксплуатации.

Однозначно с попаданием антифриза моторное масло меняет свои показатели качества, при этом не выполняется основная функция масла – должная смазка трущихся деталей двигателя [31].

Помимо того, что меняется качество моторного масла, меняется и его цвет при попадании антифриза в силу наличия красителей-добавок в составе охлаждающей жидкости. При продолжении эксплуатации автомобильной техники без замены загрязненного гликолем масла существует риск образования микроскопических масляных шариков, возникших при реакции пакетов присадок моторного мас-

ла и гликоля, эта проблема усугубляется еще и тем, что шарики скапливаются в осадок на дне картера.

### МЕХАНИЗМЫ ДЕГРАДАЦИИ МОТОРНОГО МАСЛА

Скорость реакции воды, гликоля и базовой основы масла, а также его пакета присадок высока. Даже низкий уровень загрязнителей в объеме масла может привести к значительному ухудшению качества смазочного материала при длительном контакте. Если не обнаружить рассматриваемые загрязняющие вещества и не удалить их вскоре, загрязнение водой и гликолем может привести к образованию осадка и засорению, что может серьезно повредить пары трения двигателя.

Детергенты и диспергаторы, входящие в состав масла, обычно являются главными защитниками от загрязнения водой. Поскольку вода является полярной молекулой, присадки с полярными головками будут цепляться за молекулы воды и окружать их. Хвостовая часть этих присадок неполярна, что позволяет им легко растворяться в масле. Когда полярная часть растворяется в микроскопической капельке воды, а неполярные остатки все еще растворяются в масле, присадки образуют пленку вокруг капли, как показано на рисунке 4. Такую структуру чаще называют обратной мицеллой. Поскольку они легко смешиваются с основной массой масла, микроэмульсия

образуется по мере увеличения концентрации воды и образования большего количества обратных мицелл [32, 33, 34].

Как итог, количество воды превышает количество этих присадок и образуется свободная вода. Дополнительное попадание воды в моторное масло наряду с перемешиванием приведет к тому, что образуется пенообразный шлам из-за наличия свободной воды. Такого рода шлам возникает при предельном уровне воды в смазочном материале. В связи с тем, что и гликоль, и вода имеют идентичные характеристики химической связи, что и вода, взаимодействие гликоля с детергентами и диспергаторами будет таким же. В ходе эксплуатации, при наличии гликоля в системе смазки, указанные виды присадок претерпевают снижение уровня в моторном масле, соответственно вероятность износа поверхностей пар трения резко возрастает. Помимо жидких загрязнителей, рассматриваемых в этой работе, существенный вред диспергаторам, а также в целом качеству моторного масла, тоже наносят твердые элементарные частицы углерода (сажа), при полном расходе диспергаторов попадание сажи в моторное масло становится неконтролируемым. Однако, когда количество воды не достигает высокого уровня в масле, в течение какого-то времени с поверхности смазочного материала молекулы воды могут испариться, сохраняя первоначальный уровень диспергатора [35].

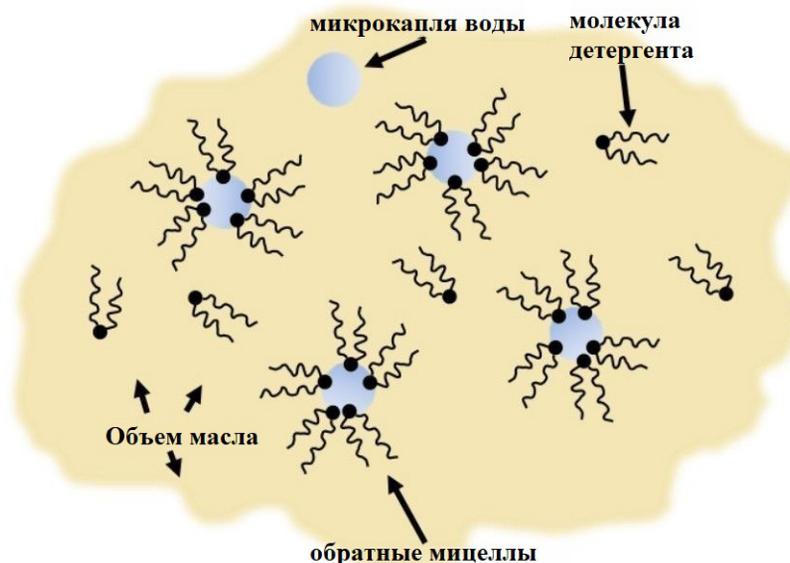


Рисунок 4 – Механизмы деградации моторного масла [14]

Figure 4 – Mechanisms of engine oil degradation [14]

Моторное масло в ходе эксплуатации тяжело нагруженной дизельной техники подвергается различным воздействиям: высокая температура, попадание загрязнителей разнообразной природы, а также процесс окисления. Причем чем выше содержание воды и гликоля в моторном масле, тем более интенсивно протекает процесс окисления смазочного материала. Окисление масла в присутствии загрязнителя чревато не только тем, что в ходе реакции возникают побочные продукты в виде масляных шариков, а также разрушением базовой основы, то есть углеводородные связи рушатся, образуя свободные алкильные радикалы. Эти радикалы обладают высокой химической активностью, вступая в реакцию с кислородом, создаются дополнительные радикалы, которые ускоряют процесс окисления. Усиливают процесс образования радикалов вода и гликоль. Всё это благоприятно способствует процессу коррозии и соответственно повышенному износу поверхностей деталей двигателя. Также образуются высокомолекулярные нерастворимые соединения, которые проявляются в виде осадка или лака, которые могут покрывать металлические поверхности и увеличивать вязкость масла [36].

Антиоксиданты, присутствующие в масле, могут быстро подавляться повышенной скоростью окисления, вызванной загрязнением воды или охлаждающей жидкости.

Воздействие загрязнителем в виде гликоля не единственное, которое способствует нарушению качества моторного масла из-за разрушения пакета присадок, так, вода негативно влияет на противоизносные присадки (ZDDP), при гораздо более высоких температурах, чем диспергаторы и дисперсанты. Вода разрушает структуру противоизносной присадки, не давая возможности снижать износ в ходе эксплуатации двигателя. В связи с этим выход из строя узлов двигателя возникает быстрее по сравнению с тем, когда в технике применяется чистое моторное масло. Образование масляных микроскопических шариков возникает не только при взаимодействии гликоля с дисперсантами и диспергентами, но и с ZDDP. Помимо проблемы в виде осаждения шариков, существует проблема и в их слипании. Данные агломераты подвергают масляные фильтры засорению и повреждению.

Биокоррозия также является следствием попадания воды в моторное масло. Особенно остро эта проблема обстоит в районах с тяжелыми климатическими условиями при простоях техники с высокооборотными дизельными

двигателями в связи с большим накоплением микроорганизмов.

Потенциальными проблемами, связанными с ростом микроорганизмов, являются засорение фильтров, повышенная скорость коррозии, изменение характеристик эмульсии и образование кислых отходов.

Поскольку загрязнение водой и охлаждающей жидкостью со временем ухудшает качество масла, то можно понять, за счёт образовавшихся химических соединений, что конкретно негативно воздействует на состояние моторного масла. Результатом попадания воды и охлаждающей жидкости в моторное масло является увеличение кинематической вязкости, кислотного числа, снижение щелочного числа вследствие разрушения детергентов соответственно. Резкий прирост кислотного числа создает изменения в значениях диэлектрической проницаемости [37, 38, 39].

Вредное воздействие воды может заключаться в том, что в зоне трения вода распадается на атомы водорода и кислорода, вызывая окисление поверхностных слоев и их охрупчивание за счет насыщения водородом. Последняя проблема возникает из-за того, что водород проникает в те области покрытия металлических поверхностей деталей, где нарушена целостность оксидной пленки. Атомы кислорода при этом создают новый оксидный слой на поверхности металла при их взаимодействии [40, 41].

Проблема с кавитацией же возникает непосредственно в областях низкого давления, где пузырьки воды/антифриза схлопываются. Из-за циклической работы цилиндро-поршневой группы давление на коленчатом валу меняется от незначительного до весьма высоких значений. Данный процесс занимает небольшую площадь, моторное масло уходит со смазанного участка, возникает разрушение поверхностных слоев металла, создавая благоприятные условия для процесса окисления в связи с новыми участками потенциального поражения [42].

Если загрязненное масло остается в течение длительного времени без регулярной эксплуатации, поверхности подвержены сильному окислению, а также приросту коррозии.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе приведены основные пути проникновения охлаждающей жидкости и воды в моторное масло.

2. Рассмотрены возможные побочные эффекты в работоспособности моторного

масла в случае его загрязнения антифризом и водой.

3. Отмечено влияние рассматриваемых загрязнителей на трибологическую составляющую поверхностей пар трения.

4. Обозначен механизм образования микроскопических масляных шариков вследствие загрязнения антифризом и распадом пакетов присадок. Указаны причины разрушения диспергаторов и детергентов при работе смазочного материала.

5. Проиллюстрирована схема деградации моторного масла при попадании в него охлаждающей жидкости и воды.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. E J., Xu W., Ma Yi, Tan D., Peng Q., Tan Ya., Chen L. Soot formation mechanism of modern automobile engines and methods of reducing soot emissions: A review. *Fuel Processing Technology*. 2022. 235: 107373. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107373>
2. Omar A. Al Sh., Salehi F. M., Farooq U., Morina A., Neville A. Chemical and physical assessment of engine oils degradation and additive depletion by soot. *Tribology International*. 2021. 160: 107054. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107054>
3. Salehi F. Motamen, Morina A., Neville A. The effect of soot and diesel contamination on wear and friction of engine oil pump. *Tribology International*. 2017. 115: 285-296. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.041>
4. Bagi S., Sharma V., Aswath P. B. Role of dispersant on soot-induced wear in Cummins ISB engine test. *Carbon*. 2018. 136: 395-408. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.066>
5. Notay R. S., Priest M., Fox M. F. The influence of lubricant degradation on measured piston ring film thickness in a fired gasoline reciprocating engine. *Tribology International*. 2019. 129: 112-123. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.07.002>
6. Wei J., Lu W., Zeng Y., Huang H., Pan M., Liu Y. Physicochemical properties and oxidation reactivity of exhaust soot from a modern diesel engine: Effect of oxyfuel type. *Combustion and Flame*. 2022. 238: 111940. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111940>
7. Rocca A. La, Ferrante A., Haffner-Staton E., Cairns A., Weilhard A., Sans V., Carlucci A.P., Laforgia D. Investigating the impact of copper leaching on combustion characteristics and particulate emissions in HPCR diesel engines. *Fuel*. 2020. 263: 116719. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116719>
8. Tormos B., Novella R., Gomez-Soriano J., García-Barberá A., Tsuji N., Uehara I., Alonso M. Study of the influence of emission control strategies on the soot content and fuel dilution in engine oil. *Tribology International*. 2019. 136: 285-298. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.03.066>
9. Gönül M., Kutlar O. A., Calik A.T., Parlak F. O. Prediction of oil dilution formation rate due to post injections in diesel engines by using Gaussian process. *Fuel*. 2021. 305: 121608. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121608>
10. Rahimi M., Pourramezan M.-Reza, Rohani A. Modeling and classifying the in-operando effects of wear and metal contaminations of lubricating oil on diesel engine: A machine learning approach. *Expert Systems with Applications*. 2022. 203: 117494. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117494>
11. Deulgaonkar V. R., Ingolikar N., Borkar A., Ghute S., Awate N. Failure analysis of diesel engine piston in transport utility vehicles. *Engineering Failure Analysis*. 2021. 120: 105008. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105008>
12. Chu-Van Th., Surawski N., Ristovski Z., Yuan Chung-Shin, Stevanovic S., Rahman S.M. A., Hossain F. M., Guo Yi, Rainey Th., Brown R. J. The effect of diesel fuel sulphur and vanadium on engine performance and emissions. *Fuel*. 2020. 261: 116437. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116437>
13. Heredia-Cancino J.A., Ramezani M., Álvarez-Ramos M.E. Effect of degradation on tribological performance of engine lubricants at elevated temperatures. *Tribology International*. 2018. 124: 230-237. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.04.015>
14. Huang H., Huang R., Guo X., Pan M., Teng W., Chen Yi., Li Zh. Effects of pine oil additive and pilot injection strategies on energy distribution, combustion and emissions in a diesel engine at low-load condition. *Applied Energy*. 2019. 250: 185-197. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.028>
15. Esfe M. H., Arani A. A. A., Esfandeh S., Afrand M. Proposing new hybrid nano-engine oil for lubrication of internal combustion engines: Preventing cold start engine damages and saving energy. *Energy*. 2019. 170: 228-238. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.127>
16. Kirkby Th., Smith J. J., Berryman J., Fowell M., Reddyhoff T. Soot wear mechanisms in heavy-duty diesel engine contacts. *Wear*. 2023. 524–525.204733. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204733>
17. Baskov V., Ignatov A., Polotnyanshikov V. Assessing the influence of operating factors on the properties of engine oil and the environmental safety of internal combustion engine. *Transportation Research Procedia*. 2020. 50: 37-43. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.005>
18. Agocs A., Nagy A. L., Tabakov Z., Perger J., Rohde-Brandenburger J., Schandl M., Besser Ch., Dörr N. Comprehensive assessment of oil degradation patterns in petrol and diesel engines observed in a field test with passenger cars – Conventional oil analysis and fuel dilution. *Tribology International*. 2021. 161: 107079. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107079>
19. Salehi F. M., Morina A., Neville A. The effect of soot and diesel contamination on wear and friction of engine oil pump. *Tribology International*. 2017. 115: 285-296. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.041>
20. McMillin R. E., Nowaczyk J., Centofanti K., Bragg J., Tansi B. M., Remias J. E., Ferri J. K. Effect of small molecule surfactant structure on the stability of water-in-lubricating oil emulsions. *Journal of Colloid*

and Interface Science. 2023. 652: 825-835. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.08.024>

21. Karimi A., Mesbah M., Majidi S. Magnetophoretically enhanced separation of particles in engine oil filters. Separation and Purification Technology. 2023. 305. 122432. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122432>

22. Chhabra A., Singh K.t, Engine oil dialysis of heavy-duty engine oil 5W50. Materials Today: Proceedings. 2022. 56: 72-76. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.156>.

23. Rostek E., Babiak M. The experimental analysis of engine oil degradation utilizing selected thermoanalytical methods. Transportation Research Procedia. 2019. 40: 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.014>.

24. Mohanty S., Hazra S., Paul S. Intelligent prediction of engine failure through computational image analysis of wear particle. Engineering Failure Analysis. 2020. 116. 104731. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104731>.

25. Zhang Q., Liu Sh., Wang Z., Li R., Zhang L., Dong Zh. Effects of a barium-based additive on gaseous and particulate emissions of a diesel engine. Journal of Hazardous Materials. 2022. 427. 128124. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128124>.

26. Jian Zh., Zhong-yu P., Shi-ying L., Sheng-wei Su, Li-jun D. Investigation of wear behavior of graphite coating on aluminum piston skirt of automobile engine. Engineering Failure Analysis. 2019. 97. 2019: 408-415. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.01.012>.

27. Dou P., Jia Ya., Zheng P., Wu T., Yu M., Reddyhoff T., Peng Zh. Review of ultrasonic-based technology for oil film thickness measurement in lubrication. Tribology International. 2022. 165. 107290. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107290>.

28. Wang Ya., Yang He, Liang X., Song H., Tao Zh. Effect of lubricating base oil on the oxidation behavior of diesel exhaust soot. Science of The Total Environment. 2023. 858. 160009. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160009>.

29. Cao Zh., Wu H., Zhao R., Wang H., Shi Zh., Zhang G., Li X. Numerical study on the wall-impinging diesel spray soot generation and oxidation in the cylinder under cold-start conditions of a diesel engine. Chemosphere. 2022. 309. 136619. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136619>

30. Zhang Ch., Li Y., Liu Zh., Liu J. An investigation of the effect of plateau environment on the soot generation and oxidation in diesel engines. Energy. 2022. 253. 124086. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124086>

31. Liang X., Wang Y., Wang Yu., Zhao B., Zhang Z., Lv Xu, Wu Zh., Cai X., Wang K. Impact of lubricating base oil on diesel soot oxidation reactivity. Combustion and Flame. 2020. 217: 77-84. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.03.035>

32. Yu M., Zhang J., Joedicke A., Reddyhoff T. Experimental investigation into the effects of diesel dilution on engine lubrication. Tribology International. 2021. 156. 106828. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106828>

33. Sun Zh., Wang Y., Yuan Ch. Influence of oil deposition on the measurement accuracy of a calorimetric flow sensor. Measurement. 2021. 185. 110052. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110052>

34. Raposo H., Farinha J.T., Fonseca I., Galar D. Predicting condition based on oil analysis – A case study. Tribology International. 2019. 135: 65-74. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.041>

35. Srata L., Farres S., Fethi F. Engine oil authentication using near infrared spectroscopy and chemometrics methods. Vibrational Spectroscopy. 2019. 100: 99-106. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2018.10.002>

36. Chhabra A., Singh K. Engine oil dialysis of heavy-duty engine oil 5W50. Materials Today: Proceedings. 2022. 56: 72-76. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.156>

37. Tonk R. The science and technology of using nano-materials in engine oil as a lubricant additives. Materials Today: Proceedings. 2021. 37: 3475-3479. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.384>

38. Kozina A., Radica G., Nižetić S. Analysis of methods towards reduction of harmful pollutants from diesel engines. Journal of Cleaner Production. 2020. 262. 121105. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121105>

39. He W., Zeng Q., Cheng L., Zhu J., Wang Zh., Zhuang J., Wei X. Droplet size dependent localized corrosion evolution of M50 bearing steel in salt water contaminated lubricant oil. Corrosion Science. 2022. 208. 110620. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110620>

40. Korneev S. V., Bakulina V. D., Yarmovich Y. V., Pashukevich S. V. Influence of base oils on changes in the performance characteristics of motor oils when exposed to high temperatures and diluted with fuel // AIP Conference Proceedings. Omsk, 2021. P. 020001. DOI 10.1063/5.0075527. EDN UOLQSH.

41. Karimi A., Mesbah M., Majidi S. Magnetophoretically enhanced separation of particles in engine oil filters. Separation and Purification Technology. 2023. 305. 122432. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122432>

42. McMillin R. E., Nowaczyk J., Centofanti K., Bragg J., Tansi B. M., Remias J.E., Ferri J.K. Effect of small molecule surfactant structure on the stability of water-in-lubricating oil emulsions. Journal of Colloid and Interface Science. 2023. 652: 825-835. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.08.024>

43. Pashukevich S. V., Korneev S. V., Bakulina V. D., Yarmovich Y. V., Centofanti K., Bragg J., Tansi B. M., Remias J.E., Ferri J.K. Effect of small molecule surfactant structure on the stability of water-in-lubricating oil emulsions. Journal of Colloid and Interface Science. 2023. 652: 825-835. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.08.024>

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

*Пашукевич Софья Вячеславовна – аспирант группы Ма – 202 кафедры «Химия и химическая технология».*

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

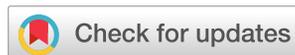
*Sofia V. Pashukevich – Postgraduate student, Ma – 202 study group, the Chemistry and Chemical Technology Department.*

Научная статья

УДК 656.1

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-738-747>

EDN: CYPNGC



## ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В МЕЖДУНАРОДНОМ СООБЩЕНИИ С УЧЕТОМ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ К ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕВОЗКИ ГРУЗОВ

Л.С. Трофимова\*, Н.В. Ловыгина, П.В. Кочубей

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

[trofimova\\_ls@mail.ru](mailto:trofimova_ls@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7312-1557>.

[nadiahohlova@mail.ru](mailto:nadiahohlova@mail.ru) <https://orcid.org/0009-0007-5467-3736>.

[polina.kochubey2001@yandex.ru](mailto:polina.kochubey2001@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0002-5686-8135>.

\*ответственный автор

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Актуальность выполненных исследований обоснована необходимостью планирования показателей работы подвижного состава в условиях изменения технологии перевозок грузов в международном сообщении при выполнении проекта приказа Министерства транспорта РФ. Обязательным элементом в технологии перевозок грузов является перецепка полуприцепа или перегрузка груза. В практике работы наблюдаются дополнительные затраты на перевозку грузов по причине значительного времени ожидания перецепки из-за отклонения времени прибытия подвижного состава, осуществляющего перевозки грузов в международном сообщении в пункт перецепки в соответствии с договором, от планового времени прибытия в пункт перецепки. На сегодняшний день отсутствует методика планирования работы подвижного состава автомобильного транспорта в международном сообщении, учитывающая современные требования к технологии перевозки грузов в части исключения времени ожидания в пункте перецепки или перегрузки груза. Целью настоящей статьи является разработка алгоритма методики планирования на основе впервые созданной авторами математической модели функционирования подвижного состава в международном сообщении с учетом современных требований к технологии перевозки грузов.

**Материалы и методы.** Для достижения цели исследования применяются научные основы текущего планирования работы автотранспортного предприятия. Разработка математической модели функционирования подвижного состава в международном сообщении выполнена на основе критерия – минимум затрат на перевозку с учетом продолжительности технологических операций, в том числе времени ожидания в пункте перецепки или перегрузки груза. Системность исследования заключается в том, что свойства перевозок грузов проявляются применительно к подвижному составу и зависят не только от свойств груза, но и от технологии перевозок, времени выполнения транспортного процесса, которые установлены в договоре и оказывают влияние на показатели работы подвижного состава.

**Результаты.** Применение методики планирования для практики функционирования подвижного состава в международном сообщении с учетом современных требований к технологии перевозки грузов выполнено на примере перевозок гидравлического вулканизационного пресса в разборном виде. Для расчёта затрат разработано программно-математическое обеспечение.

**Заключение.** Разработана методика планирования функционирования подвижного состава в международном сообщении с учетом современных требований к технологии перевозки грузов на основе созданной математической модели, с использованием нормативных требований к перевозке грузов в международном сообщении и перспективных теоретических исследований. Практическая реализация представлена на примере работы седельного тягача DAF XF 480 FT с полуприцепом Kogel S24-1.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** международные автомобильные перевозки, время прибытия в пункт перецепки, минимальные затраты на перевозку

**БЛАГОДАРНОСТИ:** авторы благодарят редакционную коллегию и редакционный совет научного рецензируемого журнала «Вестник СибАДИ», анонимных рецензентов статьи.

© Трофимова Л.С., Ловыгина Н.В., Кочубей П.В., 2023



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Статья поступила в редакцию 31.10.2023; одобрена после рецензирования 13.11.2023; принята к публикации 20.12.2023.

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: Трофимова Л. С., Ловыгина Н.В., Кочубей П.В. Планирование работы подвижного состава в международном сообщении с учетом современных требований к технологии перевозки грузов // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6 (94). С. 738-747. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-738-747>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-738-747>

EDN: CYPNGC

## PLANNING ROLLING STOCK OPERATION IN INTERNATIONAL COMMUNICATIONS WITH MODERN REQUIREMENTS TO CARGO TRANSPORTATION TECHNOLOGY

Ludmila S. Trofimova\*, Nadeshda V. Lovygina, Polina V. Kochubei

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),

Omsk, Russia

[trofimova\\_ls@mail.ru](mailto:trofimova_ls@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7312-1557>.

[nadahohlova@mail.ru](mailto:nadahohlova@mail.ru) <https://orcid.org/0009-0007-5467-3736>.

[polina.kochubey2001@yandex.ru](mailto:polina.kochubey2001@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0002-5686-8135>.

\*corresponding author

### ABSTRACT

**Introduction.** The relevance of the research carried out is justified by the need to plan performance indicators of rolling stock in the context of changes in the technology of cargo transportation in international traffic when implementing the Draft Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation. An obligatory element in the technology of cargo transportation is the re-coupling of a semi-trailer or reloading of cargo. In practice, there are additional costs for the transportation of goods due to the significant waiting time for interchange due to the deviation of the time of arrival of rolling stock transporting goods in international traffic to the interchange point in accordance with the contract from the planned time of arrival at the interchange point. Today, there is no methodology for planning the operation of rolling stock of road transport in international traffic that takes into account modern requirements for the technology of cargo transportation in terms of eliminating waiting time at the point of transfer or reloading of cargo. The purpose of this article is to develop an algorithm for a planning methodology based on the mathematical model of the functioning of rolling stock in international traffic, created for the first time by the authors, taking into account modern requirements for cargo transportation technology.

**Materials and methods.** To achieve the purpose of the study, the scientific foundations of current planning of the work of a motor transport enterprise are applied. The development of a mathematical model for the functioning of rolling stock in international traffic was carried out on the basis of the criterion - minimum transportation costs, taking into account the duration of technological operations, including waiting time at the point of transfer or reloading of cargo. The systematic nature of the study lies in the fact that the properties of cargo transportation are manifested in relation to rolling stock and depend not only on the properties of the cargo, but also on transportation technology, the time of completion of the transport process, which are established in the contract and affect the performance of the rolling stock.

**Results.** The use of planning methodology for the practice of functioning of rolling stock in international traffic, taking into account modern requirements for cargo transportation technology, was carried out using the example of transporting a disassembled hydraulic vulcanization press. Software and mathematics have been developed to calculate costs.

**Conclusions.** A methodology for planning the functioning of rolling stock in international traffic has been developed, taking into account modern requirements for the technology of cargo transportation based on the created mathematical model, using regulatory requirements for the transportation of goods in international traffic and promising theoretical studies. Practical implementation is presented using the example of a DAF XF 480 FT truck tractor with a Kogel S24-1 semi-trailer.

© Trofimova L. S., Lovygina N. V., Kochubei P. V., 2023



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

**KEYWORDS:** *international road transport, time of arrival at the transfer point, minimum transportation costs*

**ACKNOWLEDGMENTS.** *The authors express their gratitude to the editorial board and editorial board of the Russian Automobile and Highway Industry Journal, anonymous reviewers of the article.*

*The article was submitted 31.10.2023; approved after reviewing 13.11.2023; accepted for publication 20.12.2023.*

*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.* Trofimova L. S., Lovygina N.V., Kochubey P.V. Planning rolling stock operation in international communications with modern requirements to cargo transportation technology. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2023; 20 (6): 738-747. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-738-747>

**Основные положения.** В статье представлен научный подход к планированию работы подвижного состава автомобильного транспорта, который базируется на методах текущего планирования работы автотранспортного предприятия и учитывает современные требования к технологии перевозки грузов в международном сообщении. Предложенная методика основана на впервые разработанной математической модели функционирования подвижного состава в международном сообщении с учетом современных требований к технологии перевозки грузов. В качестве критерия используется показатель – минимальные затраты на перевозку. Алгоритм методики представляет собой последовательность этапов, позволяющих осуществить подбор времени выхода каждого подвижного состава, осуществляющего перевозки грузов в международном сообщении с учетом времени на маршруте для соблюдения условия «обеспечить соответствие времени прибытия в пункт перецепки в соответствии с договором на перевозку».

Для практической реализации представлен пример перевозок вулканизационного пресса в разборном виде с использованием седельного тягача DAF XF 480 FT и полуприцепа Kogel S24-1. Расчёт затрат на перевозку выполнен с применением разработанного программно-математического обеспечения.

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема планирования работы подвижного состава автомобильного транспорта в международном сообщении связана с изменением технологии перевозок из-за существо-

ющих экономических ограничений и требований. Перевозки в международном сообщении осуществляются за пределы территории Российской Федерации или на территорию Российской Федерации с пересечением государственной границы Российской Федерации, в том числе транзитом через территорию Российской Федерации<sup>1</sup>.

Согласно Проекта Приказа Министерства транспорта РФ<sup>2</sup> с 10 октября 2022 г. Российской Федерацией и государствами, поддерживающими решение Совета Евросоюза вводится запрет на осуществление международных автомобильных перевозок грузов по территории Российской Федерации грузовыми транспортными средствами, принадлежащими иностранным перевозчикам, зарегистрированным в иностранных государствах, которые ввели в отношении граждан Российской Федерации и российских юридических лиц ограничительные меры в сфере международных автомобильных перевозок грузов.

В результате введения Проекта Приказа изменилась технология перевозок грузов в международном сообщении.

Перевозку можно осуществлять путем перегрузки грузов с подвижного состава автомобильного транспорта, принадлежащим иностранным перевозчикам, на подвижной состав автомобильного транспорта, принадлежащий российским международным автомобильным перевозчикам (или путем перегрузки грузов с автотранспортных средств, принадлежащих российским международным автомобильным перевозчикам на транспортные средства, принадлежащие иностранным перевозчикам соответствующих государств)<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Федеральный закон от 08.11.2007 N 259-ФЗ (ред. от 24.07.2023) «Устав автомобильного транспорта и городского наземного электрического транспорта» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2023).

<sup>2</sup> Проект Приказа Министерства транспорта РФ «О внесении изменений в приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 28 июля 2020 г. № 259 «Об утверждении Особенности выполнения международной автомобильной перевозки грузов третьих государств» (подготовлен Минтрансом России 04.05.2023).

Аналогичные меры приняты с апреля 2022 г. в Республике Беларусь.

Международная автомобильная перевозка грузов между странами Европейского Союза (ЕС) и Евразийского Экономического Союза (ЕАЭС) осуществляется по принципу перецепки или перегрузки из-за введенных запретов.

Исследование практики перевозок грузов показало, что процесс ожидания перецепки может достигать значительного времени, а в некоторых случаях полуприцеп остаётся в пункте перецепки в ожидании, пока седельный тягач не придет и не будет выполнена прицепка. Такая ситуация приводит к значительным затратам на перевозку.

В этом случае необходима разработка этапов планирования, направленных на взаимодействие по времени подвижного состава, осуществляющего перевозки грузов в международном сообщении (ПСМС) в пункте перецепки.

Проблемой планирования перевозки грузов в международном сообщении занимались научные и практические работники.

Вопросам планирования международных автомобильных перевозок уделяется меньше внимания, что определяет необходимость использовать существующие инструменты, которые на данный момент не позволяют учесть современных реалий<sup>3</sup>. Авторы уделяют внимание оперативности, мобильности, экономичности при международных перевозках<sup>4,5,6</sup>[1,2].

В научных исследованиях сделаны выводы о влиянии технологии на плановые показатели перевозок в международном сообщении [3,4,5,6], в том числе с применением цифровизации автоперевозок [7]. Особое внимание уделяется технологии выполнения перецепки/перегрузки при осуществлении перевозок грузов автомобильным транспортом в международном сообщении и влиянию технологии перевозок на затраты [8, 9,10].

Авторы [11] разработали перечень рекомендуемых мест для перецепки и перегрузки.

В. М. Курганов, М. В. Грязнов, А. Н. Дорофеев [12] указывают на необходимость соблюдения нормативных значений технико-эксплуатационных показателей работы подвижного состава.

Х. А. Фасхиев, В. А. Целищев [13] делают вывод о том, что каждая операция транспортного процесса должна быть зафиксирована по времени выполнения. Акцент в статье [13] делается на увеличение скорости доставки.

Результаты исследования практики перевозок грузов в международном сообщении и теоретических подходов позволяют утверждать об актуальности выполненной работы.

Целью настоящих исследований является разработка алгоритма методики планирования на основе впервые созданной авторами математической модели функционирования подвижного состава в международном сообщении с учетом современных требований к технологии перевозки грузов.

Задачи исследований:

– изучение нормативной литературы по современным требованиям к технологии перевозки грузов в международном сообщении;

– обзор теоретических исследований по теме статьи;

– разработка математической модели функционирования подвижного состава, осуществляющего перевозки грузов в международном сообщении с учетом современных требований к технологии перевозки грузов;

– создание методики планирования функционирования подвижного состава, осуществляющего перевозки грузов в международном сообщении с учетом современных требований к технологии перевозки грузов;

– применение методики планирования для практики функционирования подвижного состава в международном сообщении с учетом современных требований к технологии перевозки грузов.

<sup>3</sup> Галактионова Е. С., Добреля И. В. Обзор современных теоретических исследований при международных грузовых автомобильных перевозках. Образование. Транспорт. Инновации. Строительство. Матер. V Национал. науч.-практ. конф. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2022. С. 208–211.

<sup>4</sup> Францова А. В. Особенности международных автомобильных перевозок грузов. Матер. X Международ. молодеж. науч. конф. Том 1. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. С. 520–525.

<sup>5</sup> Славина Ю. А., Возов Д. А. Современное состояние и тенденции развития международных автомобильных перевозок грузов. Актуальные вопросы организации автомобильных перевозок, безопасности движения и эксплуатации транспортных средств. Матер. XV Международ. науч.-техн. конф. Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2020. С. 223–228.

<sup>6</sup> Лощинин О. В., Влазнева С. А. Российские международные автомобильные перевозки в условиях пандемии. Мир в эпоху модернизации и глобализации: правовые, политические, экономические, технические и социокультурные аспекты. Матер. IX Международ. науч.-практ. конф. Пенза: Пензенский государственный университет, 2022. С. 51–55.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Настоящие исследования выполнены с применением научных основ текущего планирования работы автотранспортного предприятия, в которых учитывается критериальный показатель при перевозке грузов [14,15]. Разработка математической модели функционирования подвижного состава в международном сообщении осуществляется с учетом последовательности выполнения технологических операций. Системность исследования заключается в том, что свойства видов деятельности проявляются применительно к ПСМС и зависят не только от свойств груза, но и технологии перевозок, времени выполнения транспортного процесса, которые установлены в договоре и оказывают влияние на плановые показатели. Анализ нормативной литературы по современным требованиям к технологии перевозки грузов в международном сообщении и теоретических исследований по теме статьи позволил выделить основные элементы научной новизны и практической значимости исследования. Применение методики планирования для практики функционирования подвижного состава выполнено на примере перевозок гидравлического вулканизационного пресса в разборном виде<sup>7</sup>.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В планировании необходимо, чтобы общие затраты на работу ПСМС были минимальные

$$Z \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$Z = \sum_{j=1}^J (Z_{зпj} + Z_{тj} + Z_{тоj} + Z_{шj} + Z_{аj} + Z_{оj} + Z_{шj} + Z_{аj} + Z_{оj}) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $Z_{зпj}$ ,  $Z_{тj}$ ,  $Z_{тоj}$ ,  $Z_{шj}$ ,  $Z_{аj}$ ,  $Z_{оj}$  – соответственно затраты на заработную плату водителей с отчислениями, топливо, техническое обслуживание и текущий ремонт, восстановление износа и ремонт шин, амортизация, ожидание перецепки  $j$ -го ПСМС, руб.

В настоящей работе делается акцент на затраты каждого подвижного состава, осуществ-

ляющего перевозки грузов в международном сообщении, которые зависят от времени ожидания перецепки.

$$Z_{оj} = \begin{cases} t_{оj} \cdot C_{оj}, & \text{если } t_{нлj} \leq t_{оj}; \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (3)$$

где  $t_{оj}$  – время ожидания  $j$ -го ПСМС, ч;  $C_{оj}$  – себестоимость ожидания перецепки, руб./час;  $t_{дj}$  – время прибытия  $j$ -го ПСМС в пункт перецепки в соответствии с договором, ч;  $t_{плj}$  – плановое (расчётное) время прибытия  $j$ -го ПСМС в пункт перецепки, ч.

Задача планирования – обеспечить соответствие времени прибытия  $j$ -го подвижного состава, осуществляющего перевозки грузов в международном сообщении в пункт перецепки в соответствии с договором на перевозку.

$$t_{нлj} = t_{вj} + t_{mj}, \quad (4)$$

где  $t_{вj}$  – время выхода  $j$ -го ПСМС из пункта постоянного пребывания, ч;  $t_{mj}$  – время на маршруте  $j$ -го ПСМС, необходимое для перемещения в пункт перецепки, ч.

В данном случае необходимо выполнить подбор времени выхода каждого подвижного состава, осуществляющего перевозки грузов в международном сообщении с учетом времени на маршруте.

$$t_{mj} = \frac{l_{mj}}{V_{mj}} + t_{nj} + t_{pj} + t_{oj} + t_{перj}, \quad (5)$$

где  $l_{mj}$  – длина маршрута для  $j$ -го ПСМС, необходимая для перемещения в пункт перецепки, ч;  $V_{mj}$  – средняя техническая скорость на маршруте для  $j$ -го ПСМС, км/ч;  $t_{nj}$  – время на погрузку  $j$ -го ПСМС, ч;  $t_{pj}$  – время на разгрузку  $j$ -го ПСМС, ч;  $t_{орj}$  – время отдыха водителя  $j$ -го ПСМС, ч;  $t_{перj}$  – время для перерыва водителя  $j$ -го ПСМС, ч;

Определение времени на маршруте осуществляется с использованием нормативного документа<sup>8</sup> по режимам труда и отдыха водителя по территории РФ и иностранного государства<sup>9</sup>.

<sup>7</sup> Кочубей П. В. Вариант планирования перевозки штучных грузов в международном сообщении. Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных. Матер. VII Международ. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. Омск: СибАДИ, 2023. С. 184–189.

<sup>8</sup> Приказ Министерства транспорта РФ от 16 октября 2020 г. № 424 «Об утверждении Особенности режима рабочего времени и времени отдыха, условий труда водителей автомобилей».

<sup>9</sup> Европейской Соглашение, касающееся работы экипажей транспортных средств, производящих международные автомобильные перевозки (ЕСТР) (заключено в г. Женеве 1.07.1970, с изм. от 20.09.2010).

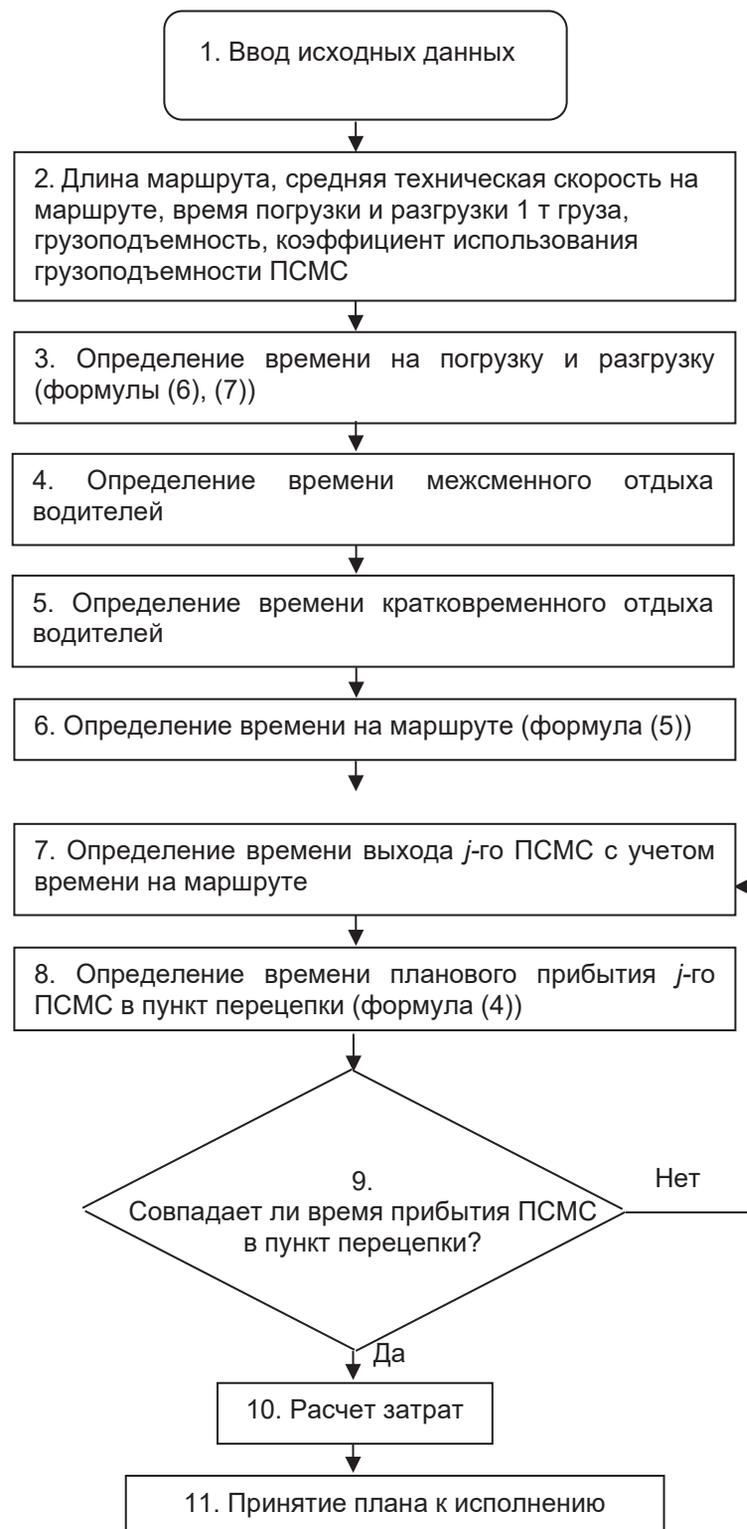


Рисунок 1 – Алгоритм методики планирования функционирования подвижного состава в международном сообщении с учетом современных требований к технологии перевозки грузов  
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Algorithm of the methodology for planning the rolling stock functioning in international traffic, taking into account modern requirements to cargo transportation technology  
Source: compiled by the authors.

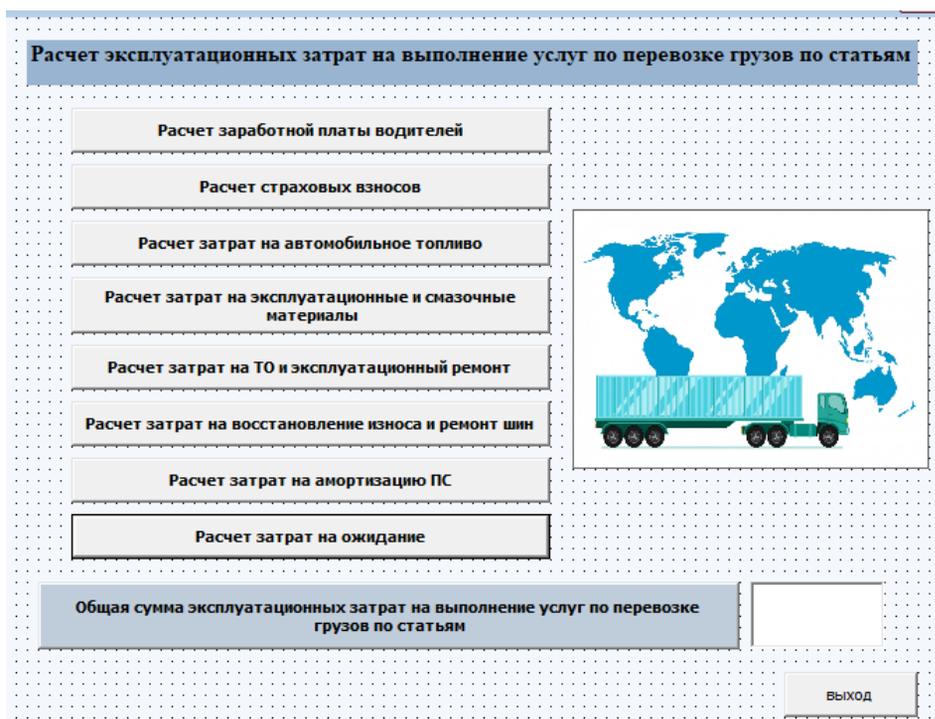


Рисунок 2 – Фрагмент разработанного программного продукта для расчета эксплуатационных затрат на перевозку груза в международном сообщении  
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – A fragment of the developed software product for calculating the operating costs of cargo transportation in international traffic  
 Source: compiled by the authors.

$$t_{nj} = \tau_n \cdot q_j \gamma_j, \quad (6)$$

где  $\tau_n$  – время на погрузку 1 т груза, ч;  $q_j$  – грузоподъемность  $j$ -го ПСМС, т;  $\gamma_j$  – коэффициент использования грузоподъемности  $j$ -го ПСМС.

Время на разгрузку  $t_p$ , ч:

$$t_p = \tau_p \cdot q_j \gamma_j, \quad (7)$$

где  $\tau_p$  – время на разгрузку 1 т груза.

В практике перевозок используется «суммированный учет рабочего времени с продолжительностью учетного периода один месяц». По требованиям Приказа Министерства транспорта РФ от 16 октября 2020 г. № 424 «Об утверждении Особенности режима рабочего времени и времени отдыха, условий труда водителей автомобилей» после 9 часов работы необходим отдых 11 часов. Значит, время для отдыха водителей будет рассчитываться по формуле (8):

$$t_{oj} = \left[ \frac{t_{mj}}{t_{p\bar{o}j}} \right] t_n, \quad (8)$$

где  $t_{p\bar{o}j}$ ,  $t_{mj}$  – соответственно время работы, время для отдыха водителя  $j$ -го ПСМС, ч.

Аналогичным образом будет выполнено планирование перерывов ( $t_{перj}$ ).

На основе математической модели разработан алгоритм методики планирования функционирования подвижного состава в международном сообщении с учетом современных требований к технологии перевозки грузов (рисунок 1).

### ОБСУЖДЕНИЕ

Применение методики планирования для практики работы подвижного состава с учетом современных требований к технологии перевозки грузов выполнено для перевозки гидравлического вулканизационного пресса в разборном виде в направлении Чьерна-над-Тисоу (Словакия) – Нижнекамск (РФ). Для перевозки гидравлического вулканизационного пресса в направлении Чьерна-над-Тисоу (Словакия) – Нижнекамск (РФ) применяется седельный тягач DAF XF 480 FTc полуприцепом Kogel S24-1.

Место погрузки – Словакия, г. Чьерна-над-Тисоу; место перецепки – Беларусь, г. Брест; Место разгрузки – Россия, г. Нижне-

камск. Применение методики позволило определить:

- время начала погрузки (время на погрузку – 5,10 ч) – 8:00;
- время выхода ПСМС после погрузки г. Чьерна-над-Тисоу – 13:06 ч;
- время прибытия в пункт перецепки грузового ПСМС – 21:27 ч;
- время выхода ПСМС за грузом из г. Нижнекамска – 00:00 ч;
- время прибытия в пункт перецепки негруженого ПСМС – 23:56 ч.+ 2 дн.

Время ожидания 2:29 ч.

В результате расчётов установлено, что затраты на перевозку груза составили 1 045 224,57 руб. (с учетом движения по РФ и иностранному государству).

Расчёт затрат был выполнен с применением специально разработанного программного обеспечения для расчёта затрат на перевозку грузов в международном сообщении (рисунок 2).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение нормативной литературы и обзор теоретических исследований привели авторов к выводу о необходимости разработки плана перевозок грузов с учетом современных требований к технологии перевозки грузов в международном сообщении. В теоретических и практических исследованиях уделялось значительное влияние вопросам планирования и организации работ при перецепке полуприцепа или перегрузке груза, однако времени ожидания в пунктах взаимодействия подвижного состава не уделялось внимание. Исследование практики работы подвижного состава, нормативных документов по режимам труда и отдыха водителей при перевозке грузов на территории РФ и иностранных государств позволило разработать математическую модель, направленную на подбор времени выхода подвижного состава из пунктов отправления. Алгоритм методики предусматривает расчет времени прибытия таким образом, чтобы время ожидания в пункте взаимодействия подвижного состава, осуществляющего перевозки грузов в международном сообщении, было минимальным. Разработка плана работы подвижного состава с учетом продолжительности каждой операции позволяет минимизировать затраты на перевозку. Применение разработанной методики было выполнено для работы седельного тягача DAF XF 480 FT с полуприцепом Kogel S24-1 в международном сообщении, что подтверждает практическую значимость исследований.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Степанова Р. С. Достоинства международных автомобильных перевозок грузов // *Аллея науки*. 2020. Т. 1, № 3(42). С. 92–94.
2. Фаткуллин И. И., Латыпова Д. Р., Ильясова А. В. Международные автомобильные перевозки // *Интерактивная наука*. 2021. № 5(60). С. 126–128.
3. Рябов И.М., Горина В.В. Разработка и оценка эффективности технологии перевозки грузов в крупнотоннажных контейнерах с грузоподъемными стойками в автомобильно-железнодорожном сообщении // *Вестник СибАДИ*. 2020;17(3):400–412. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-3-400-412>
4. Рыбин П. К., Новикова И. Д., Мороз Ю. А. Анализ потенциала контрейлерных перевозок (на примере Калининградского транспортного узла) // *Техника транспорта: образование и практика*. 2021. Т. 2, № 1. С. 78-86. DOI 10.46684/2687-1033.2021.1.78-86.
5. Kopteva L. A., Shabalina L. V., Budagov A. S. Trends of the cargo vehicle world market innovative development // *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 3: Экономические, гуманитарные и общественные науки*. 2022. №. 2. P. 11-17. DOI 10.46418/2079-8210\_2022\_2\_2.
6. Зуева О. Н., Сидоренко А. М., Галактионов А. Д. Имитационное моделирование доставки грузов с помощью сменных кузовов // *Управленец*. 2017. № 6(70). С. 80–86.
7. Мельникова Т. Е., Мельников С. Е., Макурина В. М. [и др.] Проблемы создания регуляторной базы в процессе цифровизации автоперевозок // *Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник*. 2021. № 9. С. 49–52. DOI 10.36535/0236-1914-2021-09-9.
8. Ошорова В. В., Ивахненко А. М., Трушин Р. Ю. [и др.] Применение механизма перецепки/перегрузки при осуществлении перевозок грузов автомобильным транспортом в международном сообщении // *Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник*. 2022. № 11. С. 40–43. DOI 10.36535/0236-1914-2022-11-7.
9. Ивахненко А. М., Ошорова В. В., Гоголин С. С. [и др.] Основные факторы изменения себестоимости транспортировки грузов автомобильным транспортом в условиях кризисного развития экономики. *Транспорт: наука, техника, управление // Научный информационный сборник*. 2022. № 11. С. 44–47. DOI 10.36535/0236-1914-2022-11-8.
10. Батищев И. И., Низов М. А., Можайская И. А. Актуальные проблемы развития рынка грузовых автотранспортных перевозок // *ЭКО*. 2022. № 9(579). С. 46–65. DOI 10.30680/ECO0131-7652-2022-9-46-65.
11. Вахрушев В. Ю., Худжатов М. Б. Таможенные аспекты осуществления международных автомобильных перевозок в условиях санкционной борьбы России и Евросоюза // *Маркетинг и логистика*. 2022. № 5(43). С. 1020.

12. Курганов В. М., Грязнов М. В., Дорофеев А. Н. Нормативы скорости автомобиля в планировании перевозок с использованием электронных путевых листов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2(58). С. 84–95. DOI 10.20291/2079-0392-2023-2-84-95.

13. Фасхиев Х. А., Целищев В. А. Инновационная модель организации международных автомобильных перевозок // Грузовик. 2019. № 8. С. 22–31.

14. Трофимова Л. С., Певнев Н. Г. Математическая модель функционирования автотранспортного предприятия при перевозке грузов в междугородном сообщении для текущего планирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 4(135). С. 243-252. DOI 10.21285/1814-3520-2018-4-243-252. EDN OSNLWV.

15. Трофимова Л. С., Трофимов Б. С., Янкович Н. В. Планирование работы подвижного состава при перевозке нефтепродуктов в междугородном сообщении // Мир транспорта. 2021. Т. 19, № 5(96). С. 75–82. DOI 10.30932/1992-3252-2021-19-5-9.

## REFERENCES

1. Stepanova, R. S. Dostoinstva mezhdunarodnykh avtomobilnykh perevozok грузов [Advantages of international automobile cargo transportation]. *Alley-anauki*. 2020; 1, № 3(42): 92-94. (in Russ.)

2. Fatkullin I. I., Latypova D. R., Ilyasova A. V. Mezhdunarodnye avtomobilnye perevozki [International road transport]. *Interaktivnaya nauka*. 2021; 5(60):126-128. (in Russ.)

3. Ryabov I.M., Gorina V. Development and efficiency evaluation of cargo transportation technology in high-capacity containers with load lifting vertical stays in road/rail network. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020;17(3):400-412. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-3-400-412>

4. Rybin P.K., Novikova I.D., Moroz J.A. Analysis of the potential of trailer transport (on the example of the Kaliningrad transport hub). *Transport Technician: Education and Practice*. 2021;2(1):78-86. (In Russ.) <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2021.1.78-86>

5. Kopteva L. A., Shabalina L. V., Budagov A. S. Trends of the cargo vehicles world market innovative development. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizajna. Seriya 3: Ekonomicheskie, gumanitarnye i obshchestvennye nauki*. 2022; 2:11-17. DOI 10.46418/2079-8210\_2022\_2\_2.

6. Zueva O. N., Sidorenko A. M., Galaktionov A. D. Imitacionnoe modelirovanie dostavki грузов s pomoshyu smennykh kuzovov [Simulation of cargo delivery using interchangeable bodies]. *Upravlenec*. 2017; 6(70): 80-86. (in Russ.)

7. Melnikova T. E., Melnikov S. E., Makurina V. M. [i dr.] Problemy sozdaniya regulyatornoj bazy v processe cifrovizatsii avtoperevozok. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*[Problems of creating a regulatory framework in the process of digitalization of road transport]. *Nauchnyy informacionnyy sbornik*. 2021; 9: 49-52. (in Russ.) DOI 10.36535/0236-1914-2021-09-9.

8. Oshorova V. V., Ivahnenko A. M., Trushin R. Yu. [i dr.] Application of the mechanism of reload-

ing/transshipment in the conducting of cargo transportation by road transport in international communication. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyy informacionnyy sbornik*. 2022; 11: 40-43. (in Russ.) DOI 10.36535/0236-1914-2022-11-7.

9. Ivahnenko A. M., Oshorova V. V., Gogolin S. S. [i dr.] [Main factors of change in the cost of cargo transportation by road transport in conditions of the crisis development of the economy]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyy informacionnyy sbornik*. 2022;11: 44-47. (in Russ.) DOI 10.36535/0236-1914-2022-11-8.

10. Batishev I. I., Nizov M. A., Mozhajskaia I. A. Aktualnye problemy razvitiya rynka gruzovykh avtotransportnykh perevozok [Pressing issues for the development of the trucking market]. *EKO*. 2022; 9(579): 46-65. (in Russ.) DOI 10.30680/ECO0131-7652-2022-9-46-65.

11. Vahrushev V. Yu., Hudzhatov M. B. Tamozhennye aspekty osushestvleniya mezhdunarodnykh avtomobilnykh perevozok v usloviyah sankcionnoj borby Rossii i Evrosoyuza [Customs aspects of international road transport in the context of the sanctions struggle between Russia and the European Union]. *Marketing i logistika*. 2022; 5(43): 10-20. (in Russ.)

12. Kurganov V. M., Gryaznov M. V., Dorofeev A. N. Normativy skorosti avtomobilya v planirovani perevozok s ispolzovaniem elektronnykh putevykh listov [Vehicle speed standards in transportation planning using electronic waybills]. *Vestnik Uralskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobsheniya*. 2023; 2(58): 84-95. (in Russ.) DOI 10.20291/2079-0392-2023-2-84-95.

13. Fashiev H. A., Celishev V. A. Innovacionnaya model organizatsii mezhdunarodnykh avtomobilnykh perevozok [An innovative model for the organization of international road transport]. *Gruzovik*. 2019; 8: 22-31. (in Russ.)

14. Trofimova L.S., Pevnev N.G. Mathematical model of motor transport enterprise operation under long distance cargo transportation for current planning. *iPolytech Journal*. 2018;22(4):243-252. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-243-252>

15. Trofimova L.S., Trofimov B.S., Yankevich N.V. Scheduling of Vehicle Fleet of Oil Products in Intercity Traffic. *World of Transport and Transportation*. 2021;19(5):75-82. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-5-9>

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

Трофимова Л.С. Постановка цели и задачи исследования; описание проблемы, с которой связано исследование; разработка математической модели;

Ловыгина Н.В. Применение разработанного программного продукта для расчета эксплуатационных затрат на перевозку груза в международном сообщении;

Кочубей П.В. Обзор литературы, связанной с исследованием; разработка алгоритма методики планирования функционирования подвижного состава в международном сообщении с учетом современных требований к технологии перевозки грузов.

## COAUTHORS' CONTRIBUTION

*Lyudmila S. Trofimova. The purpose and objectives of the study statement; the problem with which the study is associated statement; a mathematical model development;*

*Nadezhda V. Lovygina. The developed software product to calculate the operating costs of transporting cargo in international traffic use;*

*Polina V. Kochubei. The literature related to the study review; an algorithm for planning the functioning of rolling stock in international traffic taking into account modern requirements to the technology of cargo transportation development.*

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Трофимова Людмила Семеновна – д-р техн. наук, проф. кафедры «Организация перевозок и управление на транспорте», SPIN-код: 6711-9953.*

*Ловыгина Надежда Васильевна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Организация перевозок и безопасность движения», SPIN-код: 7098-5568.*

*Кочубей Полина Викторовна – магистрант, направление «Технология транспортных процессов», направленность: «Транспортная логистика и организация безопасности движения».*

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Liudmila S. Trofimova – Dr. of Sci., head of the Transportation and Traffic Safety Organization Department, SPIN-код: 6711-9953.*

*Nadezhda V. Lovygina – Cand. of Sci., Associate Professor of the Transportation and Traffic Safety Organization Department, SPIN-код: 7098-5568.*

*Polina V. Kochubei – Master's student, the field of the study is Technology of Transport Processes, the major is Transport Logistics and Traffic Safety Organization.*

Научная статья  
УДК 656.132  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-748-761>  
EDN: VAEMJSJ



## РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПАССАЖИРСКИЕ АВТОТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Н. Н. Якунин, Н. В. Якунина, И. И. Любимов\*  
Оренбургский государственный университет,  
г. Оренбург, Россия

yakunin-n@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6282-2331>  
nat.yakunina56@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8895-1307>  
lyubimovii@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-0057-8537>

\*ответственный автор

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Функционирование пассажирского автомобильного транспорта в 90-х годах прошлого столетия можно охарактеризовать как период перехода к новым методам управления. Последующая стабилизация деятельности пассажирского автомобильного транспорта произошла в большей степени за счёт нормативного регулирования. Однако важные проблемы становления отрасли, в особенности в регионах, не решены. Например, кризисная ситуация во внутрирегиональных межмуниципальных перевозках, высокая аварийность. В значительной степени такое положение вызвано отставанием современного толкования региональной пассажирской автотранспортной системы от её реального состояния, что не позволяет добиваться наибольшего эффекта в развитии пассажирского автомобильного транспорта. Цель работы состоит в повышении эффективности регулярных перевозок пассажиров на основе анализа вклада структурных частей региональных пассажирских автотранспортных систем, применения методологии оценивания их состояния, с учётом правил развития этих систем.

**Материалы и методы.** В работе использованы общенаучные методы анализа и синтеза, системного анализа, математической статистики, а также положения теории транспортных процессов и систем. Используются современные общенаучные программные продукты, открытые информационные ресурсы о пассажирских автотранспортных средствах в регионах.

**Полученные результаты.** Основным научным результатом статьи является введённое понятие региональной пассажирской автотранспортной системы. Для количественной оценки её состояния разработан показатель уровня самоорганизации системы, определяемый отношением количества легковых автомобилей к количеству автобусов, троллейбусов и трамваев в регионе. Значения показателей находятся в пределах от 74 до 543 при среднем значении 277. Выявлены зависимости влияния валовых региональных продуктов и количества населения в регионах на количество автобусов и легковых автомобилей в них. Практическая значимость состоит в разработке инструментария оценки состояния региональных пассажирских автотранспортных систем. Направления дальнейших исследований связаны с определением влияния структурных частей на уровень самоорганизации системы, построением на этой основе эффективных региональных стратегий развития пассажирского автомобильного транспорта.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пассажирский автомобильный транспорт, транспортная система, автомобиль

Статья поступила в редакцию 09.09.2023; одобрена после рецензирования 07.11.2023; принята к публикации 20.12.2023.

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: Якунин Н. Н., Якунина Н. В. Любимов И. И. Региональные пассажирские автотранспортные системы: постановка задачи, первые результаты оценивания // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6 (94). С. 748-761. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-748-761>

© Якунин Н. Н., Якунина Н. В., Любимов И. И., 2023



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-748-761>  
EDN: VAEMSJ

## REGIONAL PASSENGER MOTOR TRANSPORT SYSTEMS: PROBLEM STATEMENT, FIRST ESTIMATION RESULTS

**Nikolai N. Yakunin, Natalia V. Yakunina, Igor I. Lyubimov\***

Orenburg State University,  
Orenburg, Russia

[yakunin-n@yandex.ru](mailto:yakunin-n@yandex.ru), <http://orcid.org/0000-0001-6282-2331>  
[nat.yakunina56@yandex.ru](mailto:nat.yakunina56@yandex.ru), <http://orcid.org/0000-0002-8895-1307>  
[lyubimovii@gmail.com](mailto:lyubimovii@gmail.com), <http://orcid.org/0000-0002-0057-8537>

\*corresponding author

### ABSTRACT

**Relevance.** Passenger road transport in the 90s of the last century showed a high rate of transition to new management methods. The subsequent streamlining of activities progressed unevenly, mainly through regulation. However, important problems in the development of the industry, especially in the regions, have not been resolved. A crisis situation in intra-regional inter-municipal transportation and a high accident rate are the example. To a large extent, this situation is caused by the lag of the modern interpretation of the regional passenger road transport system from its real state, which does not allow achieving the greatest effect in the development of passenger road transport. The purpose of the work is to increase the importance of regular passenger transportation based on the substantiation of the importance of the structural parts of regional passenger motor transport systems, the developed methodology for assessing their condition, and creating development rules taking this into account.

**Materials and methods.** General scientific methods of analysis and synthesis, system analysis, mathematical statistics, as well as the provisions of the theory of transport processes and systems are used in the work. Modern general scientific software products, open information resources about passenger vehicles in the regions were used.

**Results.** The main scientific result of the article is the introduced concept of a regional passenger motor transport system. For a quantitative assessment of its condition, an indicator of the level of system self-organization has been developed, which is determined by the ratio of the number of cars to the number of buses, trolleybuses and trams in the region. The values of the indicators are in the range from 74 to 543 with an average value of 277. The dependencies of the influence of gross regional products and the number of population in the regions on the number of buses and cars in them are revealed. The practical significance lies in the development of tools for assessing the state of regional passenger transport systems. The directions for further research to determine the influence of structural parts on the level of self-organization of the system, building on this basis effective regional strategies for the development of passenger road transport are related.

**KEYWORDS:** passenger road transport, transport system, car

**The article was submitted 09.09.2023; approved after reviewing 07.11.2023; accepted for publication 20.12.2023.**

**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:** Lyubimov: I. I., Yakunin N. N., Yakunina N. V. Regional passenger motor transport systems: problem statement, first estimation results. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (6): 748-761. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-748-761>

© Yakunin N. N., Yakunina N. V., Lyubimov I. I., 2023



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

## ВВЕДЕНИЕ

Функционирование пассажирского автомобильного транспорта в 90-х годах прошлого столетия можно охарактеризовать как период перехода к новым методам управления. Последующая стабилизация деятельности пассажирского автомобильного транспорта произошла в большей степени за счёт нормативного регулирования. Однако важные проблемы становления отрасли, в особенности в регионах, не решены до настоящего времени. Сложилась и продолжает усугубляться кризисная ситуация во внутрирегиональных межмуниципальных перевозках, в которых доминирующие позиции занимают перевозки легковыми автомобилями, часто не имеющими необходимой разрешительной документации. Данный факт характеризуется наличием в подавляющем большинстве регионов РФ структуры взаимодействия в пассажирских перевозках, основанной на «модели 90-х годов» [1]. В процессе осуществления городских регулярных пассажирских перевозок возникает множество не решённых задач во взаимодействии между перевозчиками. Данное утверждение базируется на анализе региональных законодательств и количестве возбужденных уголовных дел, связанных с взаимодействием властей и перевозчиков. На наш взгляд, управление этим видом деятельности осуществляется с использованием большого количества нормативных и поднормативных актов, которые зачастую противоречат друг другу. Данный факт отрицательно влияет на привлекательность регулярных пассажирских автомобильных перевозок, уменьшая их долю в удовлетворении транспортного спроса и, как следствие, увеличивает долю перевозок легковыми автомобилями, в том числе легковыми такси.

Вышеизложенное не соответствует Транспортной стратегии развития РФ на период до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г. В последнее время для улучшения состояния отрасли сделано много. Приняты программы по обновлению подвижного состава, развивается транспортная инфраструктура, внедряются передовые информационные системы в технологию и организацию перевозок, упорядочиваются требования к перевозчикам, совершенствуется система контроля. Однако в полном объёме кризисные явления преодолеть не удалось. В значительной степени такое положение вызвано отставанием современного толкования региональной пассажир-

ской автотранспортной системы от её реального состояния, что не позволяет добиваться наибольшего эффекта в развитии. Цель работы состоит в повышении эффективности регулярных перевозок пассажиров на основе анализа вклада структурных частей региональных пассажирских автотранспортных систем, применения методологии оценивания их состояния с учётом правил развития этих систем. Задачи работы: выполнить литературный обзор в области региональных пассажирских автотранспортных систем и транспортной системы страны в целом; провести анализ сложившейся ситуации в области пассажирских перевозок в регионах Российской Федерации; разработать функциональную схему региональной пассажирской автотранспортной системы; выполнить анализ нормативных баз пассажирских перевозок; разработать схему принадлежности категорий транспортных средств детерминированной и стохастической частям; разработать методику определения уровня самоорганизации региональной пассажирской автотранспортной системы.

Обзор литературы. В современной литературе авторам не удалось встретить рассмотрение систем подобного уровня. Однако существует большое количество исследований, направленных на глубокое изучение направлений, которые актуальны в настоящее время и которые необходимо учитывать при исследовании автотранспортных систем широкого класса, региональных пассажирских автотранспортных в частности.

Теоретическим базисом для разработки региональных пассажирских автотранспортных систем послужили работы [2, 3, 4, 5, 6], в которых приведена общая характеристика единой транспортной системы страны, составных её частей, в том числе автомобильного транспорта. Отмечается, что в состав транспортной системы входят транспортная инфраструктура, предприятия транспорта, осуществляющие перевозочную деятельность, а также деятельность по поддержанию подвижного состава в исправном техническом состоянии, подвижной состав, научные и образовательные организации. С учётом этого приводятся определения транспортной системы. Упоминается региональный транспорт, предназначенный для удовлетворения потребностей производства в регионе. Объединяющим фактором перечисленных публикаций является наличие в них предпосылок к формированию экономических и социальных основ автотранспортных систем страны.

В работе [5] приводится более полное определение единой транспортной системы, в ней, дополнительно к выше отмеченной структуре, упоминаются средства управления и связи, производственные взаимоотношения между субъектами транспорта. Отмечается, что транспортный комплекс состоит из двух основных частей: первая часть предназначена для удовлетворения общественных потребностей в перемещениях; вторая – для технологических потребностей хозяйствующих субъектов, у которых транспортная деятельность не является основной. Приводятся актуальные в настоящее время определения понятий «технология транспортного процесса», «организация транспортного процесса», «управление на транспорте».

В работах [7, 8, 9] исследованы современные информационные автотранспортные технологии, применяемые при проектировании процессов перевозок пассажиров и грузов, организации движения, в том числе в интересах регулярного транспорта, исследовании пассажиропотоков, оценке психофизиологического состояния водительского состава. Отмечается положительное влияние интеллектуальных транспортных систем на качество транспортного процесса, сложившиеся трудности и противоречия. Объединение пассажирских и грузовых перевозок выполнено на основе влияния этих видов перевозок на валовые региональные продукты регионов страны.

В работе [1] исследованы современные модели взаимодействия субъектов пассажирского автомобильного транспорта. Отмечается необходимость преодоления сложившегося ещё в 90-х годах многообразия методик управления автотранспортным комплексом. Доказана перспективность применения Брунто-модели во взаимоотношениях организаторов транспортного процесса и транспортных операторов.

В работе [10] изложены современные методы управления качеством перевозок пассажиров автомобильным транспортом с использованием положений теории квалиметрии и складывающейся системы государственного регулирования.

Многочисленные работы посвящены технической эксплуатации автомобилей. Отметим в

этой связи работу [9], в которой дана методология адаптации автосервисной деятельности к современным условиям с учётом особенностей автотранспортного комплекса региона.

Проблема подготовки специалистов для автотранспортных комплексов регионов изучена в работе [11, 12]. Отмечается недостаточное количество подготавливаемых специалистов, кризисное состояние региональных систем высшего автотранспортного образования. Выявлено, что развитие образования должно опираться не только на потребности отрасли автомобильного транспорта, но и на потребности хозяйствующих субъектов другой хозяйственной направленности.

Работа<sup>1</sup> посвящена развитию организации и технологии пассажирских перевозок. Существует работа, в которой изложены основные положения современной теории пассажирских автомобильных перевозок<sup>2</sup>. Работа [13] посвящена перевозке организованных групп детей в междугороднем сообщении, обеспечивающих безопасность транспортного процесса. Доказана необходимость учёта возраста перевозимых детей и корректировки в этой связи режимов труда и отдыха водителей.

Часть работ [14, 15, 16] направлена на изучение транспортного поведения населения городских агломераций, распределение транспортных корреспонденций по длине маршрутов, времени суток. Сформулировано понятие транспортной системы индивидуального поведения с учётом временных и пространственных характеристик и особенностей агломераций.

В работах [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 12, 25] рассматриваются положения, касающиеся системы оценки региональных автотранспортных систем по показателям безопасности дорожного движения на основе применения положений энтропийного анализа. В результате появилась возможность оценки соотношения двух основных характеристик случайного процесса – детерминированной и стохастической. Такое соотношение характеризует степень управляемости случайным процессом. Этот подход может быть применён к оценке управляемости в региональной пассажирской автотранспортной системе.

<sup>1</sup> Ларин О.Н., Моононхуу Ц., Баасан С., Оюунгарав А. Анализ данных при планировании перевозок // Интеллектуальные транспортные системы. Материалы II Международной научно-практической конференции. Москва, 2023. С. 238–242.

<sup>2</sup> Якунина Н.В. Методика повышения качества пассажирских перевозок автомобильным транспортом на регулярных маршрутах: дис. ... д-р техн. наук: 05.22.10. Оренб. государственный университет, Оренбург. 2015. 438 с. утв. 31.03.2016

В рамках статьи нельзя осветить все направления исследований, изученные модели и применяемые методы, однако можно утверждать о создании научного задела для изучения на его базе региональных пассажирских автотранспортных систем (РПАТС).

Постановка задачи исследования региональных пассажирских автотранспортных систем. Выполненный аналитический обзор позволил сформулировать определение изучаемой системы. Региональная пассажирская автотранспортная система – это совокупность материальных объектов, субъектов, методов их взаимодействия, соответствующая принципам необходимости и достаточности, обеспечивающая полное удовлетворение потребностей населения в перемещениях в пределах региона и муниципальных образований на его территории, устойчивое развитие в условиях изменений внешних по отношению к ней факторов.

На рисунке 1 приведена схема региональной пассажирской автотранспортной системы (РПАТС). Структурными частями этой системы являются: транспортная инфраструктура региона и муниципальных образований на его территории – совокупность всех видов пассажирского транспорта и пассажирских транспортных структур, деятельность которых направлена на создание благоприятных условий функционирования РПАТС; автотранспортные предприятия, перевозчики, автотранспортные службы хозяйствующих субъектов – организации, осуществляющие пассажирские перевозки автомобильным транспортом, а также хранение, техническое обслуживание и ремонт подвижного состава, и их хозяйственные подразделения, физические или юридические лица, выполняющие функцию по транспортировке пассажиров; автотранспортные информационные системы – системы, использующие инновационные разработки в моделировании РПАТС и регулировании автотранспортных потоков, предоставляющая конечным потребителям большую информативность и безопасность, а также качественно повышающая уровень взаимодействия участников движения по сравнению с обычными автотранспортными системами; субъекты организации, контроля и управления РПАТС – государственные региональные и местные органы, осуществляющие надзор, контроль и управление элементами РПАТС; сервисные автотранспортные службы – предприятия и организации, реализующие мероприятия по техобслуживанию, текущему, восстановительному

и капитальному ремонту автотранспорта, а также по установке на него дополнительного оборудования; пользователи РПАТС – физические и юридические лица и организации различного уровня, которым представляются услуги в рамках РПАТС; система подготовки кадров, научного сопровождения и инновационного развития РПАТС – совокупности элементов, обеспечивающих бесперебойное и эффективное функционирование РПАТС. В схеме приведена структура первого уровня. Каждая из данных структурных частей образует соответствующую подсистему.

РПАТС существует и развивается в соответствии с нормативной базой эксплуатации автомобильного транспорта. Её общее состояние, характеристики структурных частей и эффективность их действия зависят от многих факторов, которые обобщённо названы социально-экономическим состоянием региона. В качестве показателя эффективности системы использован показатель уровня её самоорганизации, основанный на соотношении вклада стохастической и детерминированной частей в удовлетворение транспортного спроса.

Методика оценки уровня самоорганизации системы основана на определении степени распространённости нормативно-правового регулирования на виды пассажирских перевозок. В случае значительного влияния перевозки отнесены к детерминированной части, в случае не значительного – к стохастической.

Нормативная база в сфере эксплуатации автомобильного транспорта представлена законодательными актами федерального, регионального, муниципального уровней, а также локальными актами хозяйствующих субъектов. Все уровни законодательных актов носят подчинённый характер в отношении законодательных актов федерального уровня, поэтому в качестве основных документов рассмотрены пять федеральных законов: федеральный закон от 10.12.1995 N 196-ФЗ «О безопасности дорожного движения»; федеральный закон от 13 июля 2015 г. N 220-ФЗ «Об организации регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»; федеральный закон от 08.11.2007 N 259-ФЗ «Устав автомобильного транспорта и городского наземного электрического транспорта»; федеральный закон от 4 мая 2011 г. N 99-ФЗ «О лицензировании отдельных видов деятельности»; федеральный закон от

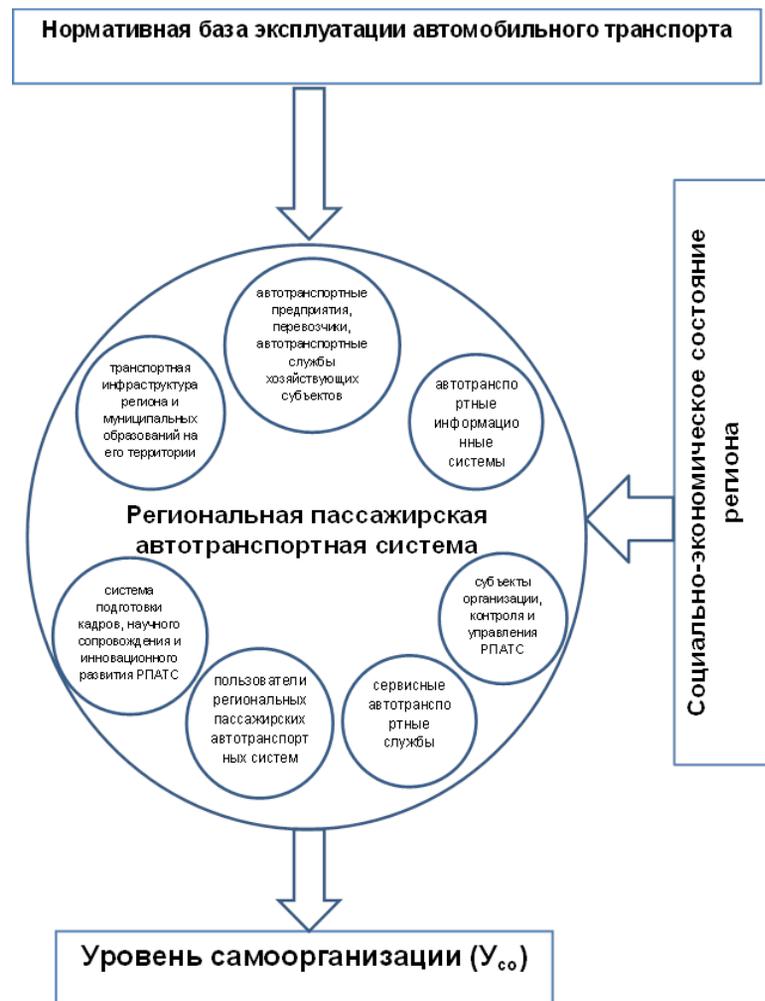


Рисунок 1 – Схема региональной пассажирской автотранспортной системы  
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Scheme of the regional passenger motor transport system  
Source: compiled by the authors.

29 декабря 2022 года № 580-ФЗ «Об организации перевозок пассажиров и багажа легковым такси в Российской Федерации, о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации и о признании утратившими силу отдельных положений законо-

дательных актов Российской Федерации». В таблице приведены основные федеральные законы в сфере эксплуатации автомобильного транспорта и их распространённость на виды перевозок пассажиров.

Таблица  
**Основные федеральные законы в сфере эксплуатации автомобильного транспорта и их распространённость на виды перевозок пассажиров**  
 Источник: составлено авторами.

Table  
**The main federal laws in the field of operation of road transport and their prevalence on the types of passenger transportation**  
 Source: compiled by the authors.

№ п/п	Обозначение федерального закона	Вид перевозок пассажиров					
		$A_{б.рег.}$	$A_{б.зак.}$	$A_{б.хс.}$	$Л_{т.}$	$Л_{хс.}$	$Л_{гр.}$
1	196-ФЗ	да	да	да	да	да	да
2	220-ФЗ	да	нет	нет	нет	нет	нет
3	259-ФЗ	да	да	нет	да	нет	нет
4	99-ФЗ	да	да	да	нет	нет	нет
5	580-ФЗ	нет	нет	нет	да	нет	нет

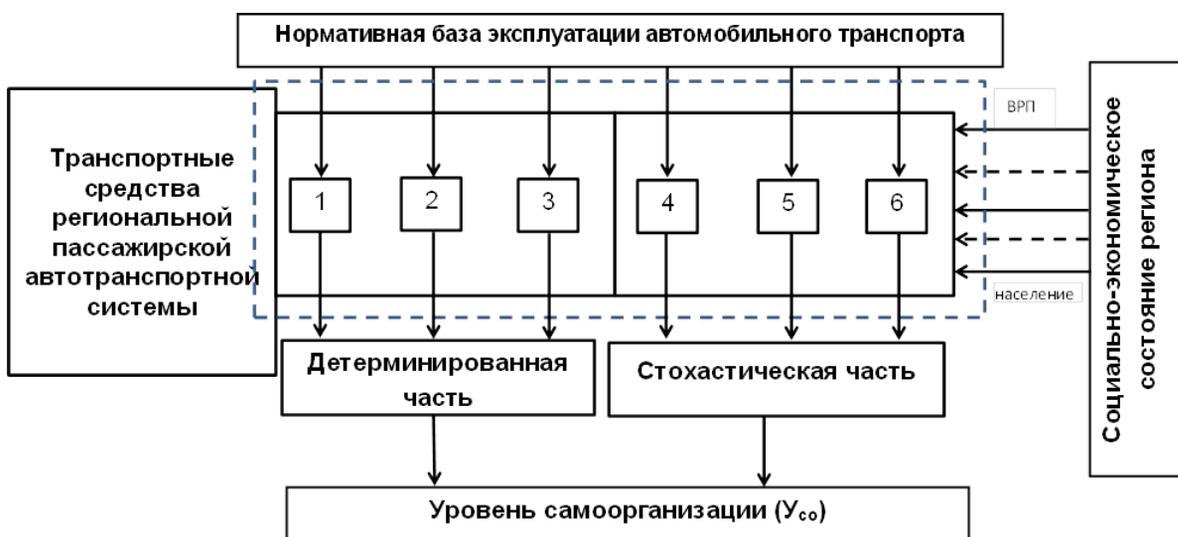


Рисунок 2 – Схема принадлежности категорий транспортных средств детерминированной и стохастической частей  
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Scheme of belonging to the categories of vehicles to deterministic and stochastic parts  
 Source: compiled by the authors.

В таблице применены обозначения:  $A_{б.рег.}$  – перевозки автобусами, троллейбусами, трамваями по регулярным маршрутам;  $A_{б.зак.}$  – перевозки автобусами, работающими по заказам;  $A_{б.хс.}$  – перевозки автобусами, принадлежащими хозяйствующим субъектам, с использованием которых удовлетворяются их транспортные потребности;  $Л_{т.}$  – перевозки легковыми такси;  $Л_{хс.}$  – перевозки легковыми автомобилями, принадлежащими хозяйствующим субъектам, с использованием которых удовлетворяются их транспортные потребности;  $Л_{гр.}$  – перевозки

легковыми автомобилями, принадлежащими гражданам, на которых удовлетворяются их транспортные потребности. Слово «да» означает распространение действия федерального закона, слово «нет» означает не распространение федерального закона.

Анализ данных таблицы свидетельствует о том, что нормативная база регулирует перевозки пассажиров всеми видами подвижного состава. Однако степень такого регулирования различна. Наибольшее регулирование отмечается при перевозках пассажиров автобусами.

Такие перевозки отнесены к детерминированной части. Наименьшее регулирование – при перевозках легковыми автомобилями, принадлежащими гражданам, на которых удовлетворяются их транспортные потребности, а также легковыми автомобилями, принадлежащими хозяйствующим субъектам, с использованием которых удовлетворяются их транспортные потребности. Такие перевозки осуществляются по индивидуальным маршрутам. По такому же типу маршрутов выполняются перевозки пассажиров легковыми такси. На этом основании такие перевозки отнесены к стохастической части.

Основываясь на результатах анализа, можно утверждать, что перевозки пассажиров автомобильным транспортом совершаются в рамках одной из двух конкурирующих частей. Соотношение количественных показателей этих частей отражает уровень самоорганизации РПАТС. В качестве количественных показателей принято количество подвижного состава в регионе, осуществляющего приведённые виды перевозок. На рисунке 2 приведена схема принадлежности категорий транспортных средств детерминированной и стохастической частей.

На рисунке обозначены: 1 – количество автобусов, троллейбусов, трамваев в регионе, осуществляющих перевозки по регулярным маршрутам ( $K_{аб.рег.}$ ); 2 – количество автобусов в регионе, работающих по заказам ( $K_{аб.зак.}$ ); 3 – количество автобусов в регионе, принадлежащих хозяйствующим субъектам, с использованием которых удовлетворяются их транспортные потребности ( $K_{аб.хс.}$ ); 4 – количество легковых такси в регионе ( $K_{лт.}$ ); 5 – количество легковых автомобилей, принадлежащих хозяйствующим субъектам, с использованием которых удовлетворяются их транспортные потребности ( $K_{л.хс.}$ ); 6 – количество легковых автомобилей в регионе, принадлежащих гражданам, на которых удовлетворяются их транспортные потребности ( $K_{л.гр.}$ ).

Основываясь на приведённых доводах, можно утверждать, что количество  $K_{пасс.}$  подвижного состава в региональной пассажирской автотранспортной системе будет включать две основные группы. Детерминированная часть объединяет парк  $K_{дет.}$  автобусов, троллейбусов и трамваев. Стохастическая часть объединяет парк  $K_{ст.}$  легковых автомобилей.

$$K_{пасс.} = K_{дет.} + K_{ст.}, \quad (1)$$

$$K_{дет.} = K_{аб.рег.} + K_{аб.зак.} + K_{аб.хс.}, \quad (2)$$

$$K_{ст.} = K_{лт.} + K_{л.хс.} + K_{л.гр.}, \quad (3)$$

$$K_{пасс.} = K_{аб.рег.} + K_{аб.зак.} + K_{аб.хс.} + K_{лт.} + K_{л.гр.}, \quad (4)$$

Уровень самоорганизации определяют по формуле

$$Y_{со} = \frac{K_{ст.}}{K_{дет.}}, \quad (5)$$

Информационной базой для определения  $Y_{со}$  являются открытые базы о пассажирских автотранспортных средствах в регионах, например Реестр муниципальных маршрутов городов, Реестр межмуниципальных маршрутов регулярных перевозок и официальный сайт Росстата.

С учётом структурных частей системы математическая формулировка уровня самоорганизации  $Y_{со}$  отражена зависимостью

$$Y_{со} = A_I \Phi_I + A_{II} \Phi_{II} + A_{III} \Phi_{III} + A_{IV} \Phi_{IV} + A_V \Phi_V + A_{VI} \Phi_{VI} + A_{VII} \Phi_{VII}, \quad (6)$$

где  $A_I \dots A_{VII}$  – весовые коэффициенты значимости структурных частей региональной пассажирской автотранспортной системы;

$\Phi_I \dots \Phi_{VII}$  – обобщённая количественная характеристика структурных частей региональной пассажирской автотранспортной системы, согласно пояснениям к рисунку 1.

Целевая функция показателя  $Y_{со}$  состоит в установлении его оптимальных значений с учётом особенностей региона. Зависимостью (6) и сформулированной целевой функцией в общем виде сформулирована задача дальнейших исследований.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Первые результаты оценивания состояния РПАТС приведены на рисунках 3, 4, 5, 6. В них содержатся установленные зависимости количества автобусов и легковых автомобилей в субъектах РФ от валовых региональных продуктов (ВРП) и численности населения.

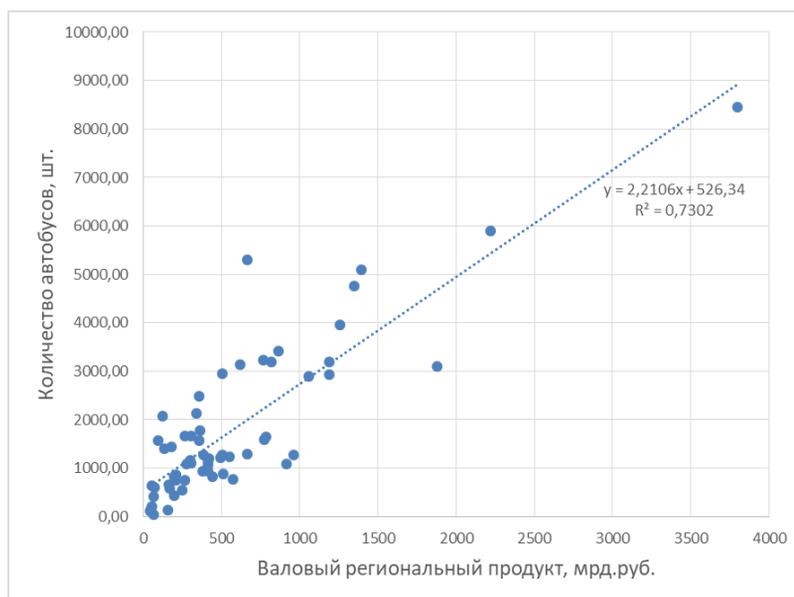


Рисунок 3 – Зависимость количества автобусов по субъектам Российской Федерации от ВРП  
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Dependence of the number of buses in the constituent entities of the Russian Federation on GRP  
Source: compiled by the authors.

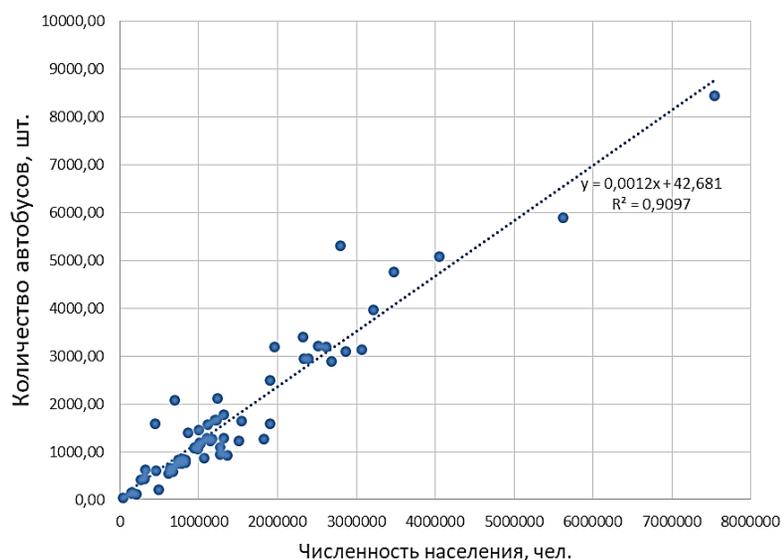


Рисунок 4 – Зависимость количества автобусов по субъектам Российской Федерации от населения  
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Dependence of the number of buses in the constituent entities of the Russian Federation on the population  
Source: compiled by the authors.

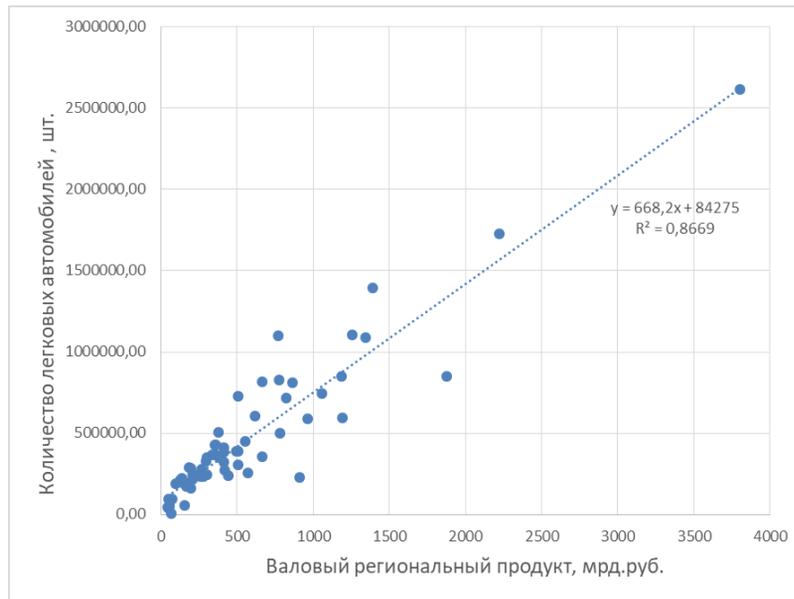


Рисунок 5 – Зависимость количества легковых автомобилей по субъектам Российской Федерации от ВРП  
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Dependence of the number of passenger cars in the constituent entities of the Russian Federation on GRP  
Source: compiled by the authors.

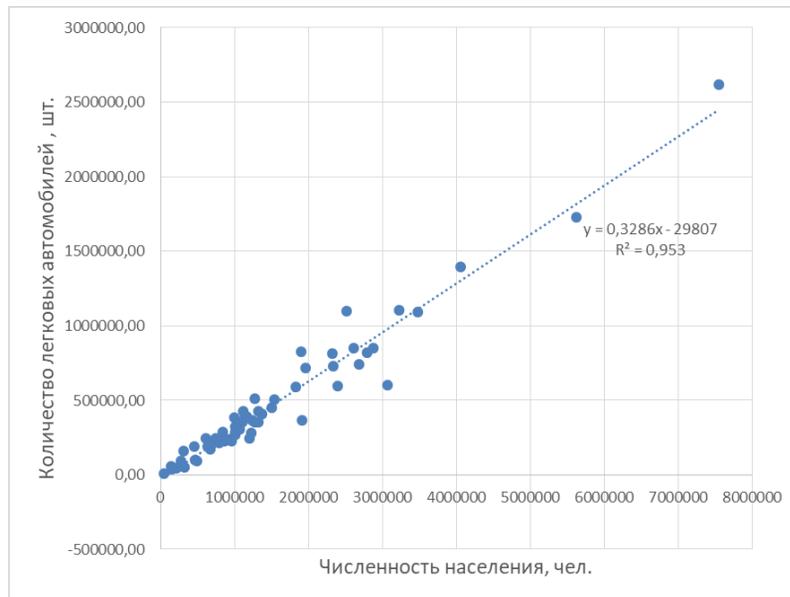


Рисунок 6 – Зависимость количества легковых автомобилей по субъектам Российской Федерации от населения  
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Dependence of the number of cars in the constituent entities of the Russian Federation on the population  
Source: compiled by the authors.

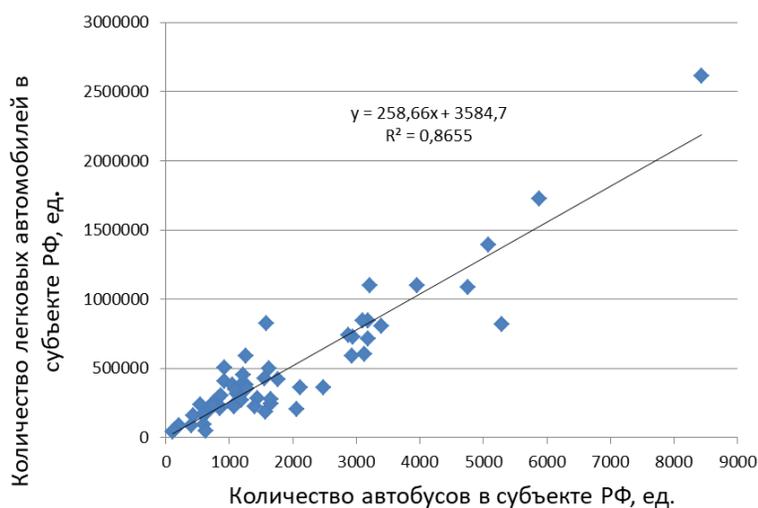


Рисунок 7 – Зависимость количества легковых автомобилей от количества автобусов в субъектах РФ  
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Dependence of the number of cars on the number of buses in the constituent entities of the Russian Federation  
Source: compiled by the authors.

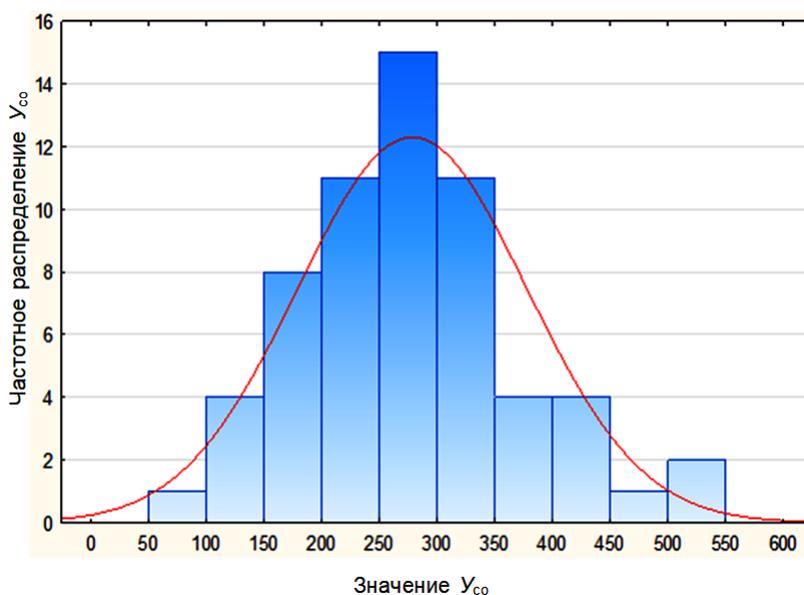


Рисунок 8 – Частотное распределение показателя  $Y_{oo}$  в регионах страны  
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Dependence of the number of cars on the number of buses in the constituent entities of the Russian Federation  
Source: compiled by the authors.

На рисунке 7 приведена зависимость количества легковых автомобилей от количества автобусов в регионах. Установленные зависимости имеют высокую степень верификации и указывают на высокую связь исследуемых видов подвижного состава с социально-экономическим состоянием регионов и количеством населения в них.

Рисунок 8 информирует о частотном распределении показателя  $Y_{oo}$  в регионах страны. Распределение подчинено нормальному закону. Минимальное значение показателя  $Y_{oo}$  составило 74, наибольшее – 543, при математическом ожидании – 277 легковых автомобилей на один автобус.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимым условием изучения современного состояния организации и технологии перевозок пассажиров автомобильным транспортом стала необходимость локализации изучения в рамках определённой системы. Введённое понятие региональной пассажирской автотранспортной системы является платформой, на базе которой появилась возможность системного рассмотрения современного состояния отрасли, определения эффективных путей её развития с учётом социально-экономического состояния регионов и количества населения в нём. Рассмотрение системы в рамках настоящей статьи следует отнести к уровню постановки задач дальнейшего исследования.

Региональный уровень системы имеет достаточно развитую и доступную информационную базу для определения её состояния и установления количественных характеристик. Разработанная методика количественной оценки базируется на энтропийном подходе, позволяющем определить уровень самоорганизации системы и относящим способы удовлетворения транспортного спроса к детерминированной или стохастической частям. Математическая формулировка уровня самоорганизации проста, что является её достоинством. Этот показатель определяется отношением количества легковых автомобилей к количеству автобусов, троллейбусов и трамваев в регионе. Значения показателей для регионов страны находятся в пределах от 74 до 543 при среднем значении 277. Это свидетельствует о различной развитости структурных частей РПАТС, в том числе об эффективности системы управления.

Первые результаты исследования системы позволили выявить высокое влияние валовых региональных продуктов и количества населения в регионах на количество автобусов и легковых автомобилей в них.

Практическая значимость состоит в дальнейшей разработке инструментария оценки состояния региональных пассажирских автотранспортных систем.

Направления дальнейших исследований связаны с определением влияния структурных частей на уровень самоорганизации системы, построением на этой основе эффективных региональных стратегий развития пассажирского автомобильного транспорта.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Любимов И.И., Якунин Н.Н., Якунина Н.В. Анализ моделей взаимодействия субъектов пассажирских автомобильных перевозок // Вестник СибАДИ. 2022;19(6):878–889. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-878-889>.
2. Клепцова Л.Н., Желтышев В.Б., Подчалина М.К. Контроллинговый подход к совершенствованию логистической системы региональных междугородных пассажирских автоперевозок // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2010. № 6 (82). С. 159–162.
3. Макарова И.В., Мавляудинова Г.Р., Мухаметдинов Э.М., Габсалихова Л.М. Перспективы создания единого транспортного пространства России за счет совершенствования системы автомобильных перевозок // Мир транспорта и технологических машин. 2022. № 3-2 (78). С. 133–142. DOI: 10.33979/2073-7432-2022-2(78)-3-133-142.
4. Волчок Ю.Г. О перспективах формирования системы управления единым транспортным пространством евразийского экономического сообщества // Интеграл. 2012. № 4. С. 65–67.
5. Козлов П.А., Тушин Н.А., Колокольников В.С. Проблема организации единой транспортной системы // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2018. № 3. С. 748–755. DOI: 10.25559/SITITO.14.201803.748-755.
6. Комов М.С. Теоретические подходы к интеграции национальных транспортных комплексов в единую транспортную систему интеграционного объединения // Финансовая экономика. 2022. № 3. С. 146–148.
7. Азаренкова З.В. Интермодальные транспортные системы (итс) как единый комплекс // Градостроительство. 2022. № 1-2 (77-78). С. 19–22.
8. Архипов А.Е., Григорьев Е.А. Единая транспортная система России: истоки формирования, тенденции развития, резервы повышения эффективности // Проблемы современной экономики. 2021. № 1 (77). С. 120–123.
9. Феклин Е.В. Оперативное управление системой технического обслуживания и ремонта автобусного парка // Вестник СибАДИ. 2022. 19(4) С.560–568. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-560-568>.
10. Якунин Н.Н., Якунина Н.В., Фролов О.Ю., Хасанов И.Х. Методика определения структуры специалистов с автотранспортным образованием в регионе // Вестник СибАДИ. 2022. 19(3). С. 398–410. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-398-410>.
11. Якимов М.Р. Подходы к формированию эффективной маршрутной сети крупных городов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3 (55). С. 107–113.
12. Say V., Gorelova D., Yakimov M. Economic and mathematical model of substantiation of organizational network elements. Transportation Research Procedia. 12. Sep. "12th International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability, TITDS 2021" 2022. С. 36-45.
13. Янучкова О.Е. Повышение безопасности дорожного движения в условиях профессионального подбора водителей с учетом психофизиологических качеств // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2022. № 6. С. 135–145, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-6-135>.
14. Агуреев И.Е., Ахромешин А.В. Подходы к формализации понятия транспортного поведения населения городских агломераций // Интеллект.

Инновации. Инвестиции. 2021. № 2. С. 60–70. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-2-60.

15. Солодкий А.И. Развитие интеллектуальных транспортных систем в России: проблемы и пути их решения. Новый этап // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2020. № 6. С. 10–19. DOI: 10.25198/2077-7175-2020-6-10.

16. Фадеев А.И., Ильянков А.М., Укадеров В.В. Распределение корреспонденций по сети в задачах проектирования перевозок городским пассажирским транспортом общего пользования // Вестник СибАДИ. 2023. 20(3). С.362–386. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-362-386>.

17. Петров С.А., Евтюков А.И. Концептуальные смыслы энтропийного анализа состояния безопасности дорожного движения в разномасштабных автотранспортных системах // Мир транспорта и технологических машин. 2022№3 – 4(78). С. 55-62. doi:10.33979/2073-7432-2022-4(78)-3-55-62.

18. Петров А. И. Энтропия системного управления безопасностью дорожного движения: методика и практика использования // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2023. № 4. С. 72–82.

19. Dahim M. Enhancing the development of sustainable modes of transportation in developing countries: Challenges and opportunities. *Civil Engineering Journal (Iran)*. 2021; 7(12): 2030-2042.

20. Olowosegun A., Moyo D., Gopinath D. Multicriteria evaluation of the quality of service of informal public transport: An empirical evidence from Ibadan, Nigeria. *Case Studies on Transport Policy* 2021; 9 (4):1518-1530.

21. Ivanova N.A., Chirikanova E.A., Ulitskaya N.M., Dvoryanchikova A.A. Digital Transportation Technologies for Formation of Bus Routes in the Conditions of a Megapolis. *Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex*, TIRVED 2021 - Conference Proceedings.

22. Oveshnikova L.V., Sibirskaya E.V., Slepneva G.D., Lebedinskaya O.G. (2021). Spatio-temporal analysis of the development of the transport system: Russian and foreign experience. *IBIMA Business Review* 2020,515342.

23. Rohit M.H. An IoT based System for Public Transport Surveillance using real-Time Data Analysis and Computer Vision. Proceedings of 2020 3rd International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications, ICAECC 2020 9339485.

24. Ke X., Lin J.Y., Fu C., Wang Y. Transport infrastructure development and economic growth in China: Recent evidence from dynamic panel system-GMM analysis. *Sustainability (Switzerland)*. 2020; 12(14): 5618.

25. Taylor Z., Ciechański A. Ownership transformation and fdi among national carriers operating road passenger transport services in the visegrád group (V4) Countries. *Geograficky Casopis*. 2020; 72(1): 81-102.

## REFERENCES

1. Lyubimov I.I., Yakunin N.N., Yakunina N.V. Analysis for models of interaction between road passenger transport operators. *The Russian Automobile*

*and Highway Industry Journal*. 2022;19(6):878-889. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-878-889>

2. Klepcova L.N., Zheltyshev V.B., Podchalina M.K. Kontrollingovyy podhod k sovershenstvovaniyu logisticheskoy sistemy regional'nyh mezhdugorodnyh passazhirskih [Controlling approach to improving the logistics system of regional intercity passenger road transportation]. *Vestnik kuzbasskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*. 2010;6 (82):159-162. (in Russ.)

3. Makarova I.V., Mavlajutdinova G.R., Muhametdinov Je.M., Gabsalihova L.M. Perspektivy sozdaniya edinogo transportnogo prostranstva Rossii za schet sovershenstvovaniya sistemy avtomobil'nyh perevozok [Prospects for creating a common transport space in russia by improving the system of road transportation]. *World of transport and technological machines*. 2022; 3-2 (78):133-142. (in Russ.) DOI:10.33979/2073-7432-2022-2(78)-3-133-142

4. Volchok Ju.G. O perspektivah formirovaniya sistemy upravleniya edinyim transportnym prostranstvom evrazijskogo jekonomicheskogo soobshhestva [On the prospects for the formation of a management system for the common transport space of the Eurasian economic community]. *Integral*. 2012;4: 65-67. (in Russ.)

5. Kozlov P.A., Tushin N.A., Kolokol'nikov V.S. Problema organizacii edinoj transportnoj sistemy [Problem of common transport system organization]. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie*. 2018; 3: 748 – 755. (in Russ.) DOI: 10.25559/SITITO.14.201803.748-755

6. Komov M.S. Teoreticheskie podhody k integracii nacional'nyh transportnyh kompleksov v edinuju transportnuju sistemu integracionnogo ob'edinenija [Theoretical approaches to the integration of national transport complexes into a unified transport system of the integration association]. *Finansovaja jekonomika*. 2022; 3:146-148. (in Russ.)

7. Azarenkova Z.V. Intermodal'nye transportnye sistemy (its) kak edinyj kompleks [Intermodal transport systems (ITS) as a single complex]. *Gradostroitel'stvo*. 2022; 1-2 (77-78): 19-22. (in Russ.)

8. Arhipov A.E., Grigor'ev E.A. Edinaja transportnaja sistema rossii: istoki formirovaniya, tendencii razvitiya, rezervy povysheniya jeffektivnosti [Unified transport system of Russia: origins of formation, development trends, reserves for increasing efficiency]. *Problemy sovremennoj jekonomiki*. 2021;1 (77):120-123. (in Russ.)

9. Feklin E.V. Operational management of the bus fleet maintenance and repair system. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022;19(4):560-568. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-560-568>

10. Yakunin N.N., Yakunina N.V., Frolov O.Yu., Khasanov I.K. Determination method for structuring specialists skilled in motor transport in the region. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022;19(3):398-410. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-398-410>

11. Jakimov M.R. Podhody k formirovaniyu jeffektivnoj marshrutnoj seti krupnyh gorodov [Approaches to the formation of an effective route network in large cit-

ies]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija*. 2022;3 (55):107-113. (in Russ.)

12. Say V., Gorelova D., Yakimov M. Economic and mathematical model of substantiation of organizational network elements. *Transportation Research Procedia*. 12. Ser. «12th International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability, TITDS 2021» 2022. C. 36-45.

13. Januchkova O.E. Povyshenie bezopasnosti dorozhnogo dvizhenija v uslovijah professional'nogo podbora voditelej s uchetom psihofiziologicheskikh kachestv [Improving road safety in the context of professional selection of drivers taking into account psychophysiological qualities]. *Intellekt. Innovacii. Investicii*. 2022; 6: 135–145. (in Russ.) <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-6-135>.

14. Agureev, I. E., Akhromeshin, A. V. (2021) [Approaches to formalizing the concept of transport behavior of the population of urban agglomerations]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 2, pp. 60–70. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-2-60.

15. Solodkij A.I. Razvitie intellektual'nyh transportnyh sistem v Rossii: problemy i puti ih reshenija. Novyj jetap [Development of intelligent transport systems in Russia: problems and ways to solve them. New stage]. *Intellekt. Innovacii. Investicii*. 2020; 6:10–19. (in Russ.) DOI: 10.25198/2077-7175-2020-6-10.

16. Fadeev A.I., Iliankov A.M., Ukaderov V.V. Correspondence distribution over a network in designing public urban passenger transportation tasks. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023;20(3):362-386. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-362-386>. EDN: YNNWNU

17. Petrov S.A. Evtjukov A.I. Konceptual'nye smysly jentropijnogo analiza sostojanija bezopasnosti dorozhnogo dvizhenija v raznomasshtabnyh avtotransportnyh sistemah [Conceptual meanings of entropy analysis of the state of road safety in multi-scale road transport systems]. *World of transport and technological machines*. 2022; 3 – 4(78): 55-62. doi:10.33979/2073-7432-2022-4(78)-3-55-62. (in Russ.)

18. Petrov A. I. Jentropija sistemnogo upravlenija bezopasnost'ju dorozhnogo dvizhenija: metodika i praktika ispol'zovanija [Entropy of systemic road safety management: methodology and practice of use]. *Intellekt. Innovacii. Investicii*. 2023; 4: 72 – 82. (in Russ.)

19. Dahim M. Enhancing the development of sustainable modes of transportation in developing countries: Challenges and opportunities. *Civil Engineering Journal (Iran)*. 2021; 7(12): 2030-2042.

20. Olowosegun A., Moyo D., Gopinath D. Multi-criteria evaluation of the quality of service of informal public transport: An empirical evidence from Ibadan, Nigeria. *Case Studies on Transport Policy* 2021; 9 (4):1518-1530.

21. Ivanova N.A., Chirikanova E.A., Ulitskaya N.M., Dvoryanchikova A.A. Digital Transportation Technologies for Formation of Bus Routes in the Conditions of a Megapolis. Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex, TIRVED 2021 - Conference Proceedings.

22. Oveshnikova L.V., Sibirskaya E.V., Slepneva G.D., Lebedinskaya O.G. (2021). Spatio-temporal

analysis of the development of the transport system: Russian and foreign experience. *IBIMA Business Review* 2020,515342.

23. Rohit M.H. An IoT based System for Public Transport Surveillance using real-Time Data Analysis and Computer Vision. *Proceedings of 2020 3rd International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications, ICAECC 2020 9339485*.

24. Ke X., Lin J.Y., Fu C., Wang Y. Transport infrastructure development and economic growth in China: Recent evidence from dynamic panel system-GMM analysis. *Sustainability (Switzerland)*. 2020; 12(14): 5618.

25. Taylor Z., Ciechański A. Ownership transformation and fdi among national carriers operating road passenger transport services in the visegrAd group (V4) Countries. *Geograficky Casopis*. 2020; 72(1): 81-102.

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Якунина Н. В. Сбор данных.*

*Якунин Н.Н. Составление статьи, окончательное утверждение версии для публикации, итоговая переработка статьи.*

*Любимов И. И. Концепция и дизайн работы, анализ и интерпретация данных, составление статьи, итоговая переработка статьи.*

## COAUTHORS' CONTRIBUTION

*Natalia N. Yakunina . Data collection.*

*Nikolai N. Yakunin. Drafting the article; Final approval of the version for publication, final revision of the article.*

*Igor I. Lyubimov. Concept or design of the work; analysis and interpretation of the data; drafting of the article, final revision of the article.*

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Якунин Николай Николаевич – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой автомобильного транспорта, член-эксперт Общественного совета при Министерстве транспорта Российской Федерации, SPIN-код: 7171-9493.*

*Якунина Наталья Владимировна – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры автомобильного транспорта, SPIN-код: 8344-8385.*

*Любимов Игорь Ильич – канд. техн. наук., доц., доц. кафедры автомобильного транспорта, SPIN-код: 4217-9610.*

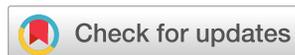
## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Nikolai N. Yakunin – Dr. of Sci., Professor, Head of the Motor Transport Department, expert-member of the Public Council under the Ministry of Transport of the Russian Federation, Orenburg State University, SPIN-код: 7171-9493.*

*Natalia V. Yakunina – Dr. of Sci., Associate Professor, Professor of the Motor Transport Department, Orenburg State University, SPIN-код: 8344-8385.*

*Igor I. Lyubimov – Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor of the Motor Transport Department, Orenburg State University, SPIN-код: 4217-9610.*

Научная статья  
УДК 656.135.2  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-762-772>  
EDN: KPMQMV



## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ СТРАНЫ И ЕЕ РЕГИОНОВ ПОСРЕДСТВОМ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ

И. Н. Пугачев<sup>1\*</sup>, А. В. Казарбин<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Тихоокеанский государственный университет (ТОГУ),  
г. Хабаровск, Россия

[ipugachev64@mail.ru](mailto:ipugachev64@mail.ru), <http://orcid.org/0000-0003-0345-4350>  
[kazarbin@rambler.ru](mailto:kazarbin@rambler.ru), <http://orcid.org/0009-0000-4614-1552>

\*ответственный автор

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Предпосылкой исследования проблемы стала «Стратегия пространственного развития страны на период до 2024 года», предложенная президентом РФ, основу которой составляют транспортные инфраструктуры по видам транспорта, обеспечивающие связанность поселений, требующие поэтапной модернизации, кадрового, технического и технологического обеспечения, цифровизации и интеграции в одну экосистему цифровых сервисов как по отдельным видам транспорта, так и в совокупности по типу «единого окна» государства и бизнеса при выполнении всех перевозок. Предметом исследования явилась цифровая трансформация транспортной сферы на примере автомобильно-дорожного комплекса как наиболее востребованного и восприимчивого, по нашему мнению, к цифровой экономике.

**Материалы и методы.** В настоящее время большое значение приобретают совместимость, координация работы и взаимодействие различных видов транспорта при выполнении мультимодальных перевозок грузов и пассажиров с использованием цифровых технологий и платформенных решений. Другими словами, должна быть создана единая цифровая платформа транспортного комплекса, являющаяся системной основой информационных взаимодействий и объединяющая все существующие и планируемые информационные и цифровые решения на основе согласованных принципов, правил и стандартов.

**Результаты.** Приведенный в статье неполный перечень объектов цифровой трансформации по своему большому разнообразию необходимых к использованию на транспорте систем свидетельствует о ее масштабах и адаптации для нужд транспорта уже имеющихся достижений и новых технических решений в различных областях. На текущем этапе для решения стоящих задач требуется кооперация отраслевых научных организаций с учетом основных направлений их деятельности, действующего научно-технического и кадрового потенциала, интегрированность с институтами РАН, научными, проектными организациями и промышленными предприятиями передовых высокотехнологичных и наукоемких отраслей, с международным научным сообществом.

**Заключение.** Предложенные в статье методы и проводимые мероприятия позволят обеспечить максимальную эффективность и единство основных принципов функционирования и развития систем обеспечения мобильности во всех регионах и городах Российской Федерации, обеспечат ускоренный переход к цифровой экономике и достижение технологического суверенитета нашей страны.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** транспортная инфраструктура, национальные проекты, цифровое взаимодействие видов транспорта, космический мониторинг и логистика перевозок, научно-образовательная политика в подготовке кадров

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

© Пугачев И. Н., Казарбин А. В., 2023



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Статья поступила в редакцию 18.09.2023; одобрена после рецензирования 01.11.2023; принята к публикации 20.12.2023.

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: Пугачев И. Н., Казарбин А. В. Совершенствование транспортной системы страны и ее регионов, посредством цифровой трансформации транспортной отрасли России // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6 (94). С. 762-772. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-762-772>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-762-772>

EDN: KPMQMV

## IMPROVEMENT COUNTRY'S TRANSPORT SYSTEM AND ITS REGIONS THROUGH DIGITAL TRANSFORMATION OF THE RUSSIAN TRANSPORT INDUSTRY

Igor N. Pugachev<sup>1\*</sup>; Aleksei V. Kazarbin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal State Budgetary Institution of Science

Khabarovsk Federal Research Center

Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (KHFITS FEB RAS),

Khabarovsk, Russia

<sup>2</sup>Pacific State University (TOGU),

Khabarovsk, Russia

[ipugachev64@mail.ru](mailto:ipugachev64@mail.ru), <http://orcid.org/0000-0003-0345-4350>

[kazarbin@rambler.ru](mailto:kazarbin@rambler.ru), <http://orcid.org/0009-0000-4614-1552>

\*corresponding author

### ABSTRACT

**Introduction.** The prerequisite for the study of the problem was the Strategy for the spatial development of the country for the period until 2024, proposed by the President of the Russian Federation, the basis of which is transport infrastructure by mode of transport, ensuring the connectivity of settlements, requiring phased modernization, personnel, technical and technological support, digitalization and integration into one ecosystem of digital services both for individual modes of transport and in aggregate as a 'single window' for the state and business for all transportation. The subject of the research was the digital transformation of the transport sector using the example of the automobile and road complex as the most in demand and, in our opinion, receptive to the digital economy.

**Materials and methods.** Currently, compatibility, coordination and interaction of various modes of transport are becoming important when performing multimodal transportation of goods and passengers using digital technologies and platform solutions. In other words, a unified digital platform of the transport complex must be created, which is a systemic basis for information interactions and unites all current and planned information and digital solutions based on agreed principles, rules and standards

**Results.** The incomplete list of objects of digital transformation given in the article, due to its wide variety of systems necessary for use in transport, indicates its scale and adaptation to the needs of transport of existing achievements and new technical solutions in various fields. At the current stage, in order to solve the current problems, cooperation of industry scientific organizations is required, taking into account the main directions of their activities, current scientific, technical and personnel potential, integration with institutes of the Russian Academy of Sciences, scientific, design organizations and industrial enterprises of advanced high-tech and knowledge-intensive industries, with international scientific research community.

**Conclusion.** The methods and activities proposed in the article will ensure maximum efficiency and unity of the basic principles of the functioning and development of mobility systems in all regions and cities of the Russian Federation, will ensure an accelerated transition to the digital economy and the achievement of technological sovereignty of our country.

© Pugachev I. N., Kazarbin A. V., 2023



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

**KEYWORDS:** *transport infrastructure; national projects, digital interaction of modes of transport; space monitoring and transportation logistics; scientific and educational policy in personnel training*

**The article was submitted 18.09.2023; approved after reviewing 01.11.2023; accepted for publication 20.12.2023.**

**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.* Pugachev I. N., Kazarbin A.V. Improvement of country's transport system and its regions through the digital transformation of the Russian transport industry. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (6): 762-772. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-762-772>

## ВВЕДЕНИЕ

Распоряжением Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р утверждена Транспортная Стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом до 2035 года. Стратегическая цель реализации мероприятий Стратегии – удовлетворение спроса экономики и общества на конкурентоспособные и качественные транспортные услуги.

Для осуществления миссии Стратегия предусматривает реализацию четырех долгосрочных целей развития транспортной системы:

1. Повышение пространственной связанности и транспортной доступности территорий.
2. Повышение мобильности населения и развитие внутреннего туризма.
3. Увеличение объема и скорости транзита грузов и развитие мультимодальных логистических технологий.
4. Цифровая трансформация отрасли и ускоренное внедрение новых технологий.

Все четыре цели крайне актуальны, особенно для Дальнего Востока. В связи с угрозой экономической блокады России со стороны Европейского союза (ЕС) из-за Украины Правительство РФ приняло решение укрепить восточный вектор международного сотрудничества со странами АТР, увеличив экспортно-импортные поставки по международным транспортным коридорам (МТК). Предпосылки формирования и потенциальные возможности развития МТК уже заложены в функционирующих внутренних транспортных коридорах (ВТК), проходящих в широтных направлениях по территории России [1].

Стратегия приоритетного развития транспортных коридоров в регионах Дальнего Востока, имеющих географические преимущества и перспективы реализации экспортно-импортных и транзитных перевозок грузов по внутренним и международным транспортным коридорам, обеспечивающим консолидированные и устойчивые грузопотоки в транспортно-логи-

стических цепочках, в складывающейся сегодня мировой геополитике приобретает особую значимость.

Существующая опорная транспортная сеть по видам транспорта должна обеспечивать связанность территорий РФ и требует снятия на ней существующих инфраструктурных ограничений в связи с необходимостью повышения эффективности и конкурентоспособности перевозок грузов как на внутреннем, так и на внешних рынках при встраивании транспортной системы РФ в МТК.

Российские участки МТК, их узлы и пункты пропуска через Государственную границу РФ не имеют достаточной пропускной способности, что не позволяет в полной мере реализовать экспортный и транзитный потенциал страны. При этом низкие темпы внедрения современных транспортно-логистических и цифровых технологий, отсутствие сети крупных мультимодальных транспортно-логистических центров создают риск существенного технологического отставания транспортной системы РФ от уровня развитых стран [2, 3, 4].

Развитие транспортной инфраструктуры на российском Дальнем Востоке, ее стыковка с транспортной системой азиатско-тихоокеанского региона (АТР) в сложившихся геополитических условиях является одним из необходимых условий интеграции России в мировую экономику. Дальневосточный федеральный округ является воротами России в страны Азиатско-Тихоокеанского региона.

Стратегическое развитие пропускной и провозной способности транспортных коридоров России в границах Дальневосточного федерального округа предусматривает строительство основных объектов транспортной инфраструктуры и внедрение новых технологических решений по видам транспорта [5, 6].

Предпосылкой исследования проблемы стала «Стратегия пространственного развития страны на период до 2024 года», предложенная президентом РФ, основу которой составляют транспортные инфраструктуры по видам

транспорта, обеспечивающие связанность поселений, требующие поэтапной модернизации, кадрового, технического и технологического обеспечения, цифровизации и интеграции в одну экосистему цифровых сервисов как по отдельным видам транспорта, так и в совокупности по типу «единого окна» государства и бизнеса при выполнении всех перевозок. Объектом исследований стала отрасль транспорта. Предметом исследований явилась цифровая трансформация транспортной сферы на примере автомобильно-дорожного комплекса как наиболее востребованного и восприимчивого, по нашему мнению, к цифровой экономике.

Цель исследования – развитие методов повышения эффективности функционирования транспортной системы и качества транспортно-логистических услуг посредством цифровой трансформации автомобильно-дорожного комплекса. Задачами исследования стали вопросы внедрения цифровых сервисов в процессы оказания транспортных услуг в электронной форме (создание единой цифровой интегрированной платформы мультимодальных грузовых и пассажирских перевозок, что позволит выбрать для грузоотправителя оптимальный маршрут перевозки любыми видами транспорта, для пассажира приобрести единый билет в любой комбинации, с гарантированным уровнем комфорта и безопасности, с учетом лояльности для пассажиров); решение проблем текущего состояния транспортной отрасли РФ по средствам ее цифровизации.

К научной новизне работы следует отнести разработки по «сквозной» аналитике, предполагающей не только взаимную интеграцию разрозненных коммуникационных каналов в бесшовную систему непрерывного коммуникационного взаимодействия, но и объединение цифровых сервисных служб единым архитектурным решением. Постепенно цифровые платформы и интернет-площадки вытесняют традиционные сервисы благодаря формированию единого информационного пространства, созданию удобного интерфейса и операционной гибкости. Широко востребованы цифровые платформы на основе технологий распределенных реестров (в том числе блокчейна) для осуществления сделок и оформления грузовых перевозок. Интернет вещей в логистике объединяет данные и устройства в единую среду, позволяя отслеживать движение грузов на всех этапах цепочки поставок, а также совмещать различные виды транспорта в зависимости от типа товара, дорожной ситуации и т.п. В отрасли ежедневно генерируется

значительный массив данных, использование которых позволяет оптимизировать работу пассажирских и грузовых перевозок. Для этого разрабатываются стандарты сбора, обработки, хранения и передачи данных в интегрированной цифровой среде.

Таким образом, практическая значимость работы заключается в предложенной возможности создания единой цифровой платформы транспортного комплекса, являющаяся системной основой информационных взаимодействий и объединяющая все существующие и планируемые информационные и цифровые решения на основе согласованных принципов, правил и стандартов. Поставленные задачи решались с использованием общенаучных методов познания, таких как обобщение и систематизация научных и статистических данных, далее их сравнительный анализ, синтез, применение системного и функционального подходов, а обработка данных велась с использованием методов экономического анализа, общей теории статистики.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Из всех статусных нацпроектов, по нашему мнению, ключевой, приоритетной и востребованной во всех сферах социально-экономической деятельности является национальная программа «Цифровая экономика РФ», утвержденная распоряжением Правительства РФ от 28 июля 2017 г. № 1632-р., поскольку цифровая трансформация способствует развитию во всех отраслях, позволяет стимулировать экономическое развитие страны, а также повысить качество жизни населения. В основе программного документа лежит тезис, определяющий, что цифровая экономика представляет собой хозяйственную деятельность, в которой ключевым фактором производства становятся данные в цифровой форме. Это позволяет фактически формировать информационное пространство с учетом характеристик транспортных инфраструктур, спроса потребителей транспортных услуг и предложений перевозчиков. Целевым результатом функционирования цифровой транспортной экономики должно стать соблюдение баланса между спросом и предложением транспортных услуг и логистики на основе космического мониторинга перевозок с предоставлением сервисных услуг пользователям транспорта. В настоящее время большое значение приобретают совместимость, координация работы и взаимодействие различных видов транспорта при выполнении мультимодальных перевозок

грузов и пассажиров с использованием цифровых технологий и платформенных решений. Для этого Минтранс России предусмотрел в составе нацпрограммы «Цифровая экономика РФ» ведомственный проект «Цифровой транспорт и логистика», задачей которого является создание и развитие единого мультимодального цифрового транспортного и логистического пространства на территории России на основе отечественных разработок. Аппаратно-программный комплекс единой цифровой платформы транспортного комплекса РФ позволит оптимизировать грузовые и пассажирские перевозки, получать все необходимые документы в электронном виде, интегрировать сервисы и массивы данных.

Цифровая трансформация транспортной отрасли страны/региона призвана обеспечить реализацию ключевых задач по обеспечению связанности территорий, повышению безопасности и эффективности перевозок, снижению экологической нагрузки, а также совершенствованию качества предоставляемых услуг.

Под цифровой трансформацией понимается глубокая реорганизация, реинжиниринг процессов с широким применением цифровых инструментов в качестве механизмов их исполнения, которая приводит к существенному (в разы) улучшению характеристик процессов (сокращению времени выполнения, исчезновению целых групп подпроцессов, сокращению ресурсов, затрачиваемых на выполнение процессов и т.д.) и/или появлению принципиально новых их качеств и свойств (принятие решений в автоматическом режиме без участия человека и т.д.) [12].

Цифровая оптимизация мультимодальных прямых смешанных (комбинированных) грузовых перевозок с участием нескольких видов транспорта через транспортно-логистические узлы, в том числе в трансграничном сообщении, требует унификации и интеграции цифровой телеметрической платформы на основе бортовых компьютеров для совместимости, доверия, взаимодействия и координации работы видов транспорта в логистических бизнес-процессах, что позволит упорядочить работу и ответственность операторов единой перевозки. Создание единой цифровой интегрированной платформы мультимодальных пассажирских перевозок позволит выбрать для пассажира оптимальный маршрут перевозки любыми видами транспорта и в любой комбинации, приобрести единый билет с гарантированным уровнем комфорта и безопасности с учетом лояльности для пассажиров.

Высшим достижением автопрома в реализации цифровой трансформации стало изменение структуры производства автотранспортных средств (АТС) с акцентом на производство беспилотных АТС. Мировая практика производства и тестирования движения беспилотных АТС определила пять уровней автоматизации (автономности) движения транспортных средств, требования к инновационной модернизации транспортной инфраструктуры, обеспечивающей проезд беспилотных АТС.

Использование беспилотных транспортных средств и технологий идентификации пассажиров общественного транспорта с автоматической оплатой проезда путём снятия денег с электронных кошельков лежит в основе цифровой трансформации городского общественного пассажирского транспорта, который оборудуется аппаратурой спутникового навигационного мониторинга, обеспечивающего диспетчеризацию и регулярность перевозок, а также интерактивность движения транспортных средств на маршрутах для мобильных цифровых сервисов (смартфонов и планшетов) пассажиров, что дает возможность пассажирам спланировать поездки. При этом предлагается повсеместно внедрить транспортные карты и их валидацию (возможность пользоваться при пересадках единой картой) [13].

Альтернативой общественному пассажирскому транспорту в цифровом контуре становятся системы индивидуального заказа «Яндекс. Такси» и каршеринг. Любой тип каршеринга представляет собой альтернативу глобальной автомобилизации, которая сегодня уже переходит в стадию заката в связи с растущим бременем ответственности и затрат на владение, открывая эру беспилотного транспорта с повсеместным внедрением интеллектуальных транспортных систем. Космическая группировка в составе АО «ГЛОНАСС» обеспечивает мониторинг автотранспорта по всем индикаторам подключенных автомобилей, контурную цифровизацию автотранспорта и эффективность взаимодействия участников перевозочного процесса. За рубежом растет спрос на «Мобильность как услуга» (Mobility-as-a-Service, MaaS) – развитие гибких транспортных систем и снижение негативного влияния на окружающую среду за счет стыковки спроса и предложения на транспортные услуги. Данная концепция предполагает предоставление комплексной услуги, предусматривающей подключение к сервисам транспортной системы напрямую, возможность раннего планирования и прогнозирования ус-

ловий поездки и пересадок в режиме реального времени.

Цифровая трансформация объектов автомобильно-дорожной инфраструктуры предусматривает внедрение новых технических требований и стандартов проектирования, строительства, обустройства и эксплуатацию автомобильных дорог на основе цифровых технологий [7, 8, 9, 10, 11, 11].

Особыми вопросами стратегического развития транспорта Дальнего Востока являются вопросы инновационного подхода к стратегическому развитию автомобильно-дорожного комплекса в части организации и безопасности дорожного движения (БДД). Ключевой задачей организации и БДД является предупреждение ДТП, снижение аварийности, травматизма и сохранения жизни людей. Развитие объектов автомобильно-дорожной инфраструктуры, в соответствии с нацпроектами, в транспортной сфере определяет особенности организации и БДД в городской среде [17, 18, 19, 20, 21].

В марте 2023 г. Министерство транспорта РФ обнародовала Концепцию цифровой трансформации в области организации дорожного движения (ОДД)<sup>1</sup>. Цифровая трансформация в ОДД позволит перейти от управления потоком к индивидуальным управляющим воздействиям, таким как повышение равномерности движения потока посредством «внутренних агентов» в потоке; формирование групп для безопасного проезда регулируемых перекрестков; директивное распределение по оптимальным маршрутам; направление на заранее забронированное парковочное место; кооперация при маневрировании и проезде нерегулированных перекрестков; гибкая приоритезация участников дорожного движения мерами регулирования, а не путем физического выделения инфраструктуры; перейти от контроля в точках, где установлены камеры наблюдения и другие датчики, к повсеместному и совместному контролю всех участников движения, приближению к оптимальному (теоретическому пределу эффективности) использованию ресурсов УДС [26].

Цифровизация грузовых автоперевозок базируется на регистрации в грузовом цифровом контуре загруженности и дорожного трафика грузового подвижного состава, перевозящего тяжеловесные, крупногабаритные и особо

опасные грузы, а также на интерактивности движения автотранспортных средств, выполняющих терминальные перевозки грузов в магистральных внутренних и международных сообщениях по паспортизированным транспортным коридорам. Логистическая доставка мелких партий грузов легкими коммерческими автомобилями в условиях городов и агломераций определяется цифровым взаимодействием отправителей и получателей грузов. При этом электронный документооборот совмещается в едином грузовом цифровом контуре [14, 15, 16].

Сегодня ставится вопрос о создании цифрового инструмента контроля всей транспортной системы Российской Федерации из единого центра управления транспортным комплексом и системы моделирования транспортных потоков с применением технологий искусственного интеллекта и больших данных. Иными словами, требуется создание единого цифрового контура, единого центра управления транспортным комплексом, по транспортным объектам страны, для всех видов транспорта [22, 23, 24, 26].

В этой связи интересны разработки по «сквозной» аналитике, предполагающей не только взаимную интеграцию разрозненных коммуникационных каналов в бесшовную систему непрерывного коммуникационного взаимодействия, но и объединение цифровых сервисных служб единым архитектурным решением. Одним из таких решений на региональном уровне можно считать разработку (<https://education.roadadb.ru/home/users>), выполненную группой компаний «АЗИМУТ-Прогресс», по транспортной инфраструктуре ДФО (рисунки 1, 2).

Результатом проведения цифровой трансформации в ОДД станет значительное повышение эффективности использования ресурса пропускной способности сети дорог; кардинальное уменьшение количества нарушений правил дорожного движения и рисков возникновения ДТП и в перспективе полностью реализовать концепцию нулевой смертности на дорогах. Будут созданы принципиально новые процессы и механизмы управления всеми элементами транспортной системы с помощью данных в цифровой форме, интегрированных в мировую транспортную систему.

<sup>1</sup> ОАО «НИИАТ» провело Научно-практическую конференцию «Планирование городских транспортных систем: качество, доступность, эффективность». 14 марта 2023. <https://www.niiat.ru/information/novosti/oao-niiat-provelo-nauchno-prakticheskuyu-konferenciyu-planirovanie-gorodskih-transportnyh-sistem-kachestvo-dostupnost-effektivno/>

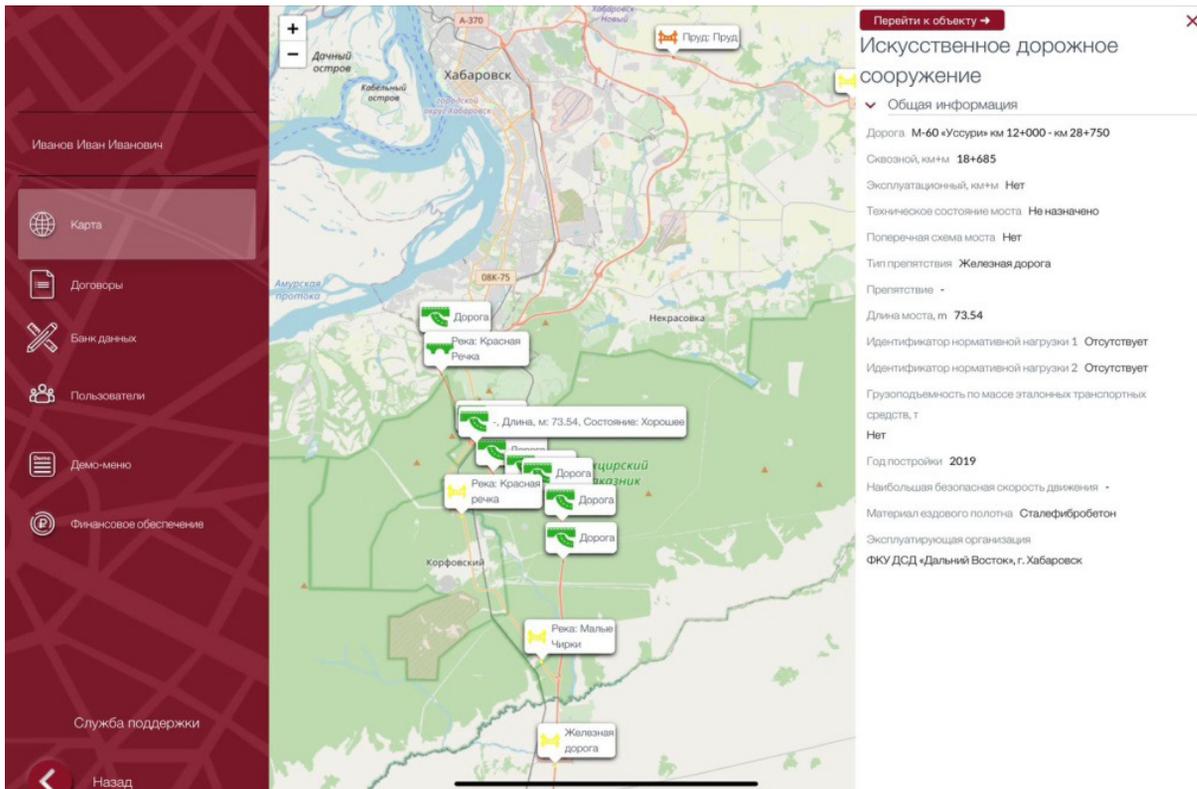


Рисунок 1 – Интерфейс программы (параметры искусственного дорожного сооружения)  
 Источник: группа компаний «АЗИМУТ-Прогресс», <https://education.roadb.ru/auth/map>

Figure 1 – Program interface (artificial road structure parameters)  
 Source: AZIMUT-Progress companies group, <https://education.roadb.ru/auth/map>



Рисунок 2 – Интерфейс программы (титовая страница)  
 Источник: группа компаний «АЗИМУТ-Прогресс», <https://education.roadb.ru/auth/map>

Figure 2 – Program interface (Title page)  
 Source: AZIMUT-Progress companies group, <https://education.roadb.ru/auth/map>

Другими словами, должна быть создана единая цифровая платформа транспортного комплекса, являющаяся системной основой информационных взаимодействий и объединяющая все существующие и планируемые информационные и цифровые решения на основе согласованных принципов, правил и стандартов [1, 5].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Приведенный неполный перечень объектов цифровой трансформации по своему большому разнообразию необходим к использованию на транспорте систем свидетельствует о ее масштабах и адаптации для нужд транспорта уже имеющихся достижений и новых технических решений в различных областях. На текущем этапе для решения стоящих задач требуется кооперация отраслевых научных организаций с учетом основных направлений их деятельности, действующего научно-технического и кадрового потенциала, интегрированность с институтами РАН, научными, проектными организациями и промышленными предприятиями передовых высокотехнологичных и наукоемких отраслей, с международным научным сообществом.

Каждое из вышеназванных в перечне объектов цифровой трансформации высоко значимых для транспорта научно-технических направлений может быть охарактеризовано отдельно и содержит в себе много конкретных задач, без решения которых успешное системное и эффективное функционирование транспорта будет неполным.

Сложившаяся на сегодня ситуация как никогда предоставляет транспортной науке возможности реализовать свой потенциал, ибо в кардинальном обновлении транспорта страны должны быть воплощены именно перспективные технические решения, эффективность которых должна быть высокой на протяжении как минимум ближайших 15 лет.

Основным ядром транспортной науки сегодня являются транспортные технические вузы. Однако их потенциал используется далеко не в полной мере. Это негативно сказывается на многих аспектах вузовской деятельности и прежде всего – на качестве подготовки инженеров, так как высокое качество учебного процесса могут обеспечить только те преподаватели, которые активно занимаются научной работой [27].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цифровая трансформация транспортной системы страны призвана обеспечить реализацию

ключевых задач по обеспечению связанности ее территорий. Предложенные в статье методы и проводимые мероприятия позволят обеспечить максимальную эффективность и единство основных принципов функционирования и развития систем обеспечения мобильности во всех регионах и городах Российской Федерации, обеспечат ускоренный переход к цифровой экономике и достижение технологического суверенитета нашей страны. По оценкам ИСИЭЗ НИУ ВШЭ, цифровая трансформация обеспечит дополнительный рост производительности труда на транспорте и в логистике на 20,04% до 2030 г. (накопленным итогом).

Благодаря цифровизации транспортная инфраструктура России становится более простой и доступной. Российская транспортная индустрия может стать достаточно серьезным источником внутреннего и внешнего дохода страны.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пугачев И.Н., Куликов Ю.И. Формирование транспортно-логистических кластеров как механизм интеграции России со странами АТР. Транспорт Российской Федерации. 2012. № 2 (39). С. 17–19. EDN:PAOANH.
2. Gorev A., Popova O., Solodkij A. Demand-responsive transit systems in areas with low transport demand of "Smart City". Transportation Research Procedia. 14. Сер. "14th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities, OTS 2020" Том 50. 2020:160-166. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.020>
3. Kerimov M., Evtiukov S., Marusin A. Model of multi-level system managing automated traffic enforcement facilities recording traffic violations. Transportation Research Procedia. 14. Сер. "14th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities, OTS 2020" Том 50. 2020: 242-252. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.030>
4. Lomakin D., Novikov A., Eremin S. Design concept of hierarchical system for assessing traffic safety in regions. Transportation Research Procedia. 14. Сер. "14th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities, OTS 2020" Том 50. 2020:373-380. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.044>
5. Пугачёв И. Н., Маркелов Г. Я., Бурков С. М. Формирование ИТС. Методика исследования инфраструктуры на примере города Хабаровска (монография). Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. 126 с. EDN: TUZRXF
6. Zhankaziev S., Vorob'Yov A., Morozov D. Principles of creating range for testing technologies and technical solutions related to intelligent transportation systems and unmanned driving. Transportation Research Procedia. 14. Сер. "14th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities, OTS 2020" Том 50. 2020: 757-765. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.091>

7. Лавриненко П. А., Янков К. В. Перспективы развития железнодорожного транспорта Азиатской России в условиях экономических санкций // ЭКО. 2022. № 9. С. 34-45.

8. Король Р. Г., Числов О. Н. Транспортно-логистическая архитектура мультимодальных перевозок Амурского бассейна // Известия Транссиба. 2022. № 3(51). С. 145–155.

9. Пугачёв И. Н., Куликов Ю. И., Маркелов Г. Я. Инновационные подходы в решении проблем развития городского транспорта (на примере г. Хабаровска) // Грузовое и пассажирское автохозяйство. 2013. № 11. С. 38—43. EDN: REZTSB

10. Король Р. Г. Организация сетевого взаимодействия приграничных терминалов-сателлитов для обслуживания внешнеторговых грузопотоков Дальневосточного региона // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4(63). С. 5–14.

11. Исмаилова Д. М., Магометов М. А., Курбанова У. А. Перспективы развития региональных транспортно-логистических центров в условиях активного развития международных транспортных коридоров // Вопросы устойчивого развития общества. 2020. № 1. С. 360–366.

12. Стратегия цифровой трансформации: написать, чтобы выполнить / под ред. Е. Г. Потаповой, П. М. Потеева, М. С. Шклярчук. М.: РАНХиГС, 2021. 184 с. <https://storage.strategy24.ru/files/news/202102/ff00a177b3fa0bb25513e8e59ad097d5.pdf>

13. Пугачёв И. Н., Володькин П. П. Прогнозирование развития системы городского пассажирского транспорта в условиях крупного города // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2010. № 1 (16). С. 91–98. EDN: LKDRWL

14. Anisimov V., Bogdanova L., Morozova O., Shkurnikov S., Nesterova N. Multimodal transport network of the far Eastern Federal District of Russia. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. T. 130 LNCE. pp. 459-468.

15. Нестерова Н. С., Едигарян А. Р., Гончарук С. М. Методика формирования региональной мультимодальной транспортной сети и её элементов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 4 (40). С. 220–225.

16. Chen Ch., A. A. Минальд, Р. П. Богуш, Ма G., Weichen Y., Абламейко С. В. Обнаружение и классификация транспортных средств на снимках сверхвысокого разрешения с помощью нейронных сетей // Журнал прикладной спектроскопии. 2022. Т. 89, № 2. С. 275–282.

17. Головин О. К. Системный анализ и моделирование объектов, процессов и явлений транспортной инфраструктуры в технических системах управления // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20, № 6-2 (86). С. 301–310.

18. Филиппова Н. А., Мушта Б. М., Сидоренко А. В. Анализ развития навигационной системы диспетчерского управления грузовым транспортом // Синергия Наук. 2019. № 36. С. 734–751.

19. Зацерковный А.В., Нурминский Е.А. Нейросетевой анализ транспортных потоков городских

агломераций на основе данных публичных камер видеонаблюдения // Компьютерные исследования и моделирование. 2021. Т. 13, № 2. С. 305–318.

20. Zatserkovnyy A., Nurminski E. Identification of Location and Camera Parameters for Public Live Streaming Web Cameras. Mathematics. 2022. 10. 3601. <https://doi.org/10.3390/math10193601>

21. Pugachev I., Kulikov Y., Cheglov V. Features of traffic organization and traffic safety in cities // XIV International Conference 2020 SPbGASU «Organization and safety of traffic in large cities». Transportation Research Procedia. 2020. Volume 50. Pp. 766-772. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.089>

22. Karelina E.A., Baykov F.Y. Formation of transnational competitive advantages of global digital platforms. 2022 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH). 2022. pp. 96-100. <https://doi.org/10.1109/EMCTECH55220.2022.9934044>.

23. Baykov F.Y., Karelina E.A. Differentiation of traditional business models and transnationalization models on global digital platforms. 2022 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH). 2022. pp. 34-37. <https://doi.org/10.1109/EMCTECH55220.2022.9934060>.

24. Evtuykov S., Marusin A., Novikov A., Shevtsova A. Solutions to the main transportation problems in the Arctic zone of the Russian Federation. Transportation Research Procedia. 2021. Volume 57. International Conference on Arctic transport accessibility: networks and systems), ATA-2021, 2-4 June's 2021, St. Petersburg, Russia. 2021: 154-162. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.037>

25. Karelina E., Ptitsyn D., Podgornyy A., Marusin A., Evtuykov S. Formal strategy for solving problems of management and organization of processes in the transport and logistics systems of the Arctic region. Transportation Research Procedia. 2021. Volume 57. International Conference on Arctic transport accessibility: networks and systems), ATA-2021, 2-4 June's 2021, St. Petersburg, Russia. 2021: 277-284. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.052>

26. Prihodko V., Vlasov V., Tatashev A., Filippova N. Influence of climatic factors on the implementation of intelligent transport system technologies in the regions of the far north and the Arctic. Transportation Research Procedia. 2021. Volume 57. International Conference on Arctic transport accessibility: networks and systems), ATA-2021, 2-4 June's 2021, St. Petersburg, Russia. 2021: 495-501. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.077>

27. Куликов Ю.И., Пугачев И.Н. Интерактивные методы обучения студентов по дисциплинам профессионального цикла // Проблемы высшего образования. 2013. № 1. С. 198–200. EDN: PLVOZI

## REFERENCES

1. Pugachev I.N., Kulikov Ju.I. Formirovanie transportno-logisticheskikh klasterov kak mehanizm integracii Rossii so stranami ATR [Formation of transport and logistics clusters as a mechanism for the development of Russia with changes in the Asia-Pacific re-

gion]. *Transport Rossijskoj Federacii*. 2012; 2 (39):17-19. EDN: PAOANH. (In Russ.)

2. Gorev A., Popova O., Solodkij A. Demand-responsive transit systems in areas with low transport demand of "Smart City". *Transportation Research Procedia*. 14. Cep. "14th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities, OTS 2020" Tom 50. 2020:160-166. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.020>

3. Kerimov M., Evtiukov S., Marusin A. Model of multi-level system managing automated traffic enforcement facilities recording traffic violations. *Transportation Research Procedia*. 14. Cep. "14th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities, OTS 2020" Tom 50. 2020:242-252. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.030>

4. Lomakin D., Novikov A., Eremin S. Design concept of hierarchical system for assessing traffic safety in regions. *Transportation Research Procedia*. 14. Cep. "14th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities, OTS 2020" Tom 50. 2020:373-380. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.044>

5. Pugachjov I. N., Markelov G. Ja., Burkov. S. M. *Formirovanie ITS. Metodika issledovanija infrastruktury na primere goroda Habarovska (monografija)* [Methodology for studying employed people using the example of the city of Khabarovsk (monograph)]. Habarovsk: Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2013: 126. EDN: TUZ-RXF (in Russ.)

6. Zhankaziev S., Vorob'Yov A., Morozov D. Principles of creating range for testing technologies and technical solutions related to intelligent transportation systems and unmanned driving. *Transportation Research Procedia*. 14. Cep. "14th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities, OTS 2020" Tom 50. 2020: 757-765. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.091>

7. Lavrinenko P. A., Yankov K. V. Perspektivy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta Aziatskoj Rossii v uslovijah jekonomicheskikh sankcij [Prospects for the development of railway transport in Asian Russia under the conditions of economic sanctions]. *ECO*. 2022; 9: 34-45. (in Russ.)

8. Korol' R.G., Chislov O.N. Transportno-logisticheskaja arhitektura mul'timodal'nyh perevozok [Transport and logistics architecture of multimodal transportation in the Amur basin]. *Amurskogo bassejna Izvestija Transsiba*. 2022; №3(51):145-155. (in Russ.)

9. Pugachjov I.N., Kulikov Ju.I., Markelov G.Ja. Innovacionnye podhody v reshenii problem razvitiya gorodskogo transporta (na primere g. Habarovska). [Innovative approaches to solving problems of urban transport development (based on the Khabarovsk principle)]. *Gruzovoe i passazhirskoe avtohozjajstvo*. 2013;11: 38-43. EDN: REZTSB. (in Russ.)

10. Korol' R.G. Organizacija setevogo vzaimodejstvija prigranichnyh terminalov-satellitov dlja obsluzhivaniya vneshnetorgovyh gruzopotokov Dal'nevostochnogo regiona [Organization of network interaction of border satellite terminals for servicing foreign trade cargo flows of the Far Eastern region]. *Vestnik Sibirsk-*

*ogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija*. 2022;4(63):5-14. (in Russ.)

11. Ismailova D.M., Magomedova M.A., Kurbanova U.A. Perspektivy razvitiya regional'nyh transportno-logisticheskich centrov v uslovijah aktivnogo razvitiya mezhdunarodnyh transportnyh koridorov [Prospects for the development of regional transport and logistics centers in the conditions of active development of international transport corridors]. *Voprosy ustojchivogo razvitiya obshhestva*. 2020; 1: 360-366. (in Russ.)

12. *Strategija cifrovoj transformacii: napisat', chtoby vypolnit'* [Digital Transformation Strategy: Write to Customize]. pod red. E. G. Potapovoj, P. M. Poteeva, M. S. Shkljaruk. Moscow, RANHiGS, 2021: 184. <https://storage.strategy24.ru/files/news/202102/ff00a177b3fa0bb25513e8e59ad097d5.pdf> (in Russ.)

13. Pugachjov I.N., Volod'kin P.P. Prognozirovanie razvitiya sistemy gorodskogo passazhirskogo transporta v uslovijah krupnogo goroda [Forecasting the development of the urban passenger transport system in a large city]. *Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2010; 1 (16): 91-98. EDN: LKDRWL. (in Russ.)

14. Anisimov V., Bogdanova L., Morozova O., Shkurnikov S., Nesterova N. Multimodal transport network of the far Eastern Federal District of Russia. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. T. 130 LNCE. pp. 459-468.

15. Nesterova N.S., Edigarjan A.R., Goncharuk S.M. Metodika formirovanija regional'noj mul'timodal'noj transportnoj seti i ejo jelementov [Methodology of a regional emerging multimodal transport network and its elements]. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie*. 2013; 4 (40): 220-225. (in Russ.)

16. Chen Ch., A.A. Minal'd, R.P. Bogush, Ma G., Weichen Y., S.V. Ablamejko Obnaruzhenie i klassifikacija transportnyh sredstv na snimkah sverhvysokego razreshenija s pomoshh'ju nejronnyh setej [Detection and classification Methodological tools on super-high resolution images using neural networks]. *Zhurnal prikladnoj spektroskopii*. 2022; T. 89. No 2: 275-282. (in Russ.)

17. Golovin O.K. Sistemnyj analiz i modelirovanie ob'ektov, processov i javlenij transportnoj infrastruktury v tehniceskich sistemah upravlenija [System analysis and modeling of objects, processes and application of transport activities in the field of technical and computer management]. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. 2018; T. 20. No 6-2 (86): 301-310. (in Russ.)

18. Filippova N.A., Mushta B.M., Sidorenko A.V. Analiz razvitiya navigacionnoj sistemy dispatcher-skogo upravlenija gruzovym transportom [Analysis of the development of the navigation system for dispatching cargo transport]. *Sinergija Nauk*. 2019; 36: 734-751. (in Russ.)

19. Zacerkovnyj A.V., Nurminskij E.A. Nejrosetevoj analiz transportnyh potokov gorodskih aglomeracij na osnove dannyh publicznyh kamer videobzora [Neural network analysis Methodological flows of average agglomerations based on data from public video surveillance cameras]. *Komp'yuternye issledovanija i modelirovanie*. 2021; T. 13, № 2: 5-318. (in Russ.)

20. Zatserkovnyy A., Nurminski E. Identification of Location and Camera Parameters for Public Live Streaming Web Cameras. *Mathematics*. 2022. 10. 3601. <https://doi.org/10.3390/math10193601>

21. Pugachev I., Kulikov Y., Cheglov V. Features of traffic organization and traffic safety in cities // XIV International Conference 2020 SPbGASU «Organization and safety of traffic in large cities». *Transportation Research Procedia*. 2020; 50: 766-772. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.089>

22. Karelina E.A., Baykov F.Y. Formation of transnational competitive advantages of global digital platforms. 2022 *International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*. 2022: 96-100. <https://doi.org/10.1109/EMCTECH55220.2022.9934044>.

23. Baykov F.Y., Karelina E.A. Differentiation of traditional business models and transnationalization models on global digital platforms. 2022 *International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*. 2022: 34-37. <https://doi.org/10.1109/EMCTECH55220.2022.9934060>.

24. Evtyukov S., Marusin A., Novikov A., Shevtsova A. Solutions to the main transportation problems in the Arctic zone of the Russian Federation. *Transportation Research Procedia*. 2021. Volume 57. *International Conference on Arctic transport accessibility: networks and systems*, ATA-2021, 2-4 June's 2021, St. Petersburg, Russia. 2021: 154-162. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.037>

25. Karelina E., Ptitsyn D., Podgornyy A., Marusin A., Evtyukov S. Formal strategy for solving problems of management and organization of processes in the transport and logistics systems of the Arctic region. *Transportation Research Procedia*. 2021. Volume 57. *International Conference on Arctic transport accessibility: networks and systems*, ATA-2021, 2-4 June's 2021, St. Petersburg, Russia. 2021: 277-284. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.052>

26. Prihodko V., Vlasov V., Tatashev A., Filippova N. Influence of climatic factors on the implementation of intelligent transport system technologies in the regions of the far north and the Arctic. *Transportation Research Procedia*. 2021. Volume 57. *International*

*Conference on Arctic transport accessibility: networks and systems*, ATA-2021, 2-4 June's 2021, St. Petersburg, Russia. 2021: 495-501. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.077>

27. Kulikov Ju.I., Pugachev I.N. Interaktivnye metody obuchenija studentov po disciplinam professional'nogo cikla [Interactive methods of teaching students in professional disciplines]. *Problemy vysshego obrazovanija*. 2013; 1:198-200. EDN: PLVOZI. (in Russ.)

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Пугачев И. Н. Генерация идеи исследования; постановка задачи исследования, анализ результатов исследования; написание текста статьи.*

*Казарбин А. В. Выполнение работы по систематизации материала; получение данных для анализа; анализ результатов исследования и подготовка данных; написание текста статьи.*

## COAUTHORS' CONTRIBUTION

*Igor N. Pugachev. Research ideas development; research problem statement, research results analysis; writing the text of the article.*

*Aleksei V. Kazarbin. Work on the systematization of the material; obtaining data for analysis; research results and data preparation analysis; writing the text of the article.*

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Пугачев Игорь Николаевич – д-р техн. наук, доц., зам. руководителя ХФИЦ ДВО РАН, SPIN-код: 1856-1556.*

*Казарбин Алексей Владимирович – канд. физ-мат. наук, доц. кафедры физики, SPIN-код: 6381-8482.*

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Igor N. Pugachev – Dr. of Sc., Associate Professor, Head of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, SPIN-код: 1856-1556.*

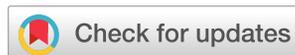
*Aleksei V. Kazarbin – Cand. Of Sci., Associate Professor, Associate Professor of the Physics Department, SPIN-код: 6381-8482.*

**РАЗДЕЛ III.  
СТРОИТЕЛЬСТВО  
И АРХИТЕКТУРА**



**PART III.  
CONSTRUCTION  
AND ARCHITECTURE**

Научная статья  
УДК 625.7.004.9  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-774-785>  
EDN: DOFECF



## УРОВНИ ПРОРАБОТКИ МОДЕЛИ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНА СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ НА СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

**Т.В. Боброва\*, Е.А. Покалюхина**

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

*[bobrova.tv@gmail.com](mailto:bobrova.tv@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-0292-4421>*

*[lenny3109@mail.ru](mailto:lenny3109@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0292-4421>*

*\*ответственный автор*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Проанализирован опыт российских компьютерных компаний в области технологий информационного моделирования (ТИМ) в строительстве. Обращено внимание на роль стандартизации и классификации строительной информации (КСИ) для кодирования элементов цифровой информационной модели (ЦИМ) на этапах организационного проектирования и календарного планирования. Отмечена специфика линейных объектов относительно уровня проработки элементов модели и их атрибутивных характеристик на разных уровнях планирования.

**Модели и методы.** Обоснована необходимость индивидуального подхода к декомпозиции элементов дорожной конструкции с учетом комплекса природных и техногенных факторов. На разных стадиях проектирования организации строительства дороги календарный график представлен с разной степенью детализации в зависимости от целей проектирования и имеющейся информации об объекте. Определены параметры специализированных потоков линейного объекта, ограничения и критерии оптимальности календарного плана на стадии проектирования организации строительства (ПОС). Повышен уровень проработки элементов модели на стадии производства работ подрядной организацией (ППР). Разработанный алгоритм формирования графика комплексного потока представлен в виде блок-схемы и ЦИМ.

**Результаты.** Использование метода рассмотрено на примерах структурирования элементов объекта и технологических процессов на стадии ППР с учетом разных вариантов и схем организации работы специализированных потоков. Результаты проектирования представлены в виде расчетной матрицы, циклограммы и графика Ганта в программе MS Project

**Обсуждение и заключение.** Проработка базовой информации для модели календарного плана строительства автомобильной дороги на разных этапах проектирования представлена в интегрированной среде общих данных. Обосновано применение линейного дорожного районирования в качестве метода декомпозиции линейного объекта на стадиях САПР, ПОС и ППР. Структурными элементами проектирования на заключительной стадии (ППР) приняты линейные проектно-технологические модули (ЛПТМ) и специализированные потоки, сформированные на основе карт трудовых процессов подрядной организации.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** автомобильная дорога, модель календарного плана, стадии проектирования, структурирование информации, уровень детализации линейного объекта, среда общих данных

**БЛАГОДАРНОСТЬ:** авторы выражают благодарность рецензентам статьи за проделанную работу.

**Статья поступила в редакцию 16.11.2023; одобрена после рецензирования 27.11.2023; принята к публикации 20.12.2023.**

**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:* Боброва Т.В., Покалюхина Е.А. Уровни проработки модели календарного плана строительства автомобильной дороги на стадиях проектирования // *Вестник СибАДИ*. 2023. Т. 20, № 6 (94). С. 774-785. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-774-785>

© Боброва Т.В., Покалюхина Е.А., 2023



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-774-785>  
EDN: DOFECF

## DEVELOPMENT LEVELS FOR TIME PLANNING MODEL OF ROAD CONSTRUCTION AT DESIGN STAGE

**Tatiana V. Bobrova\***, **Elena A. Pokalyukhina**  
Siberian State Automobile and Highway University,  
Omsk, Russia

[bobrova.tv@gmail.com](mailto:bobrova.tv@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-0292-4421>,  
[lenny3109@mail.ru](mailto:lenny3109@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0292-4421>

\*corresponding author

### ABSTRACT

**Introduction.** The experience of Russian computer companies in the field of information modelling technologies (IMT) in construction is analyzed. The attention to the role of standardization and classification of construction information (CSI) for coding elements of the digital information model (DIM) at the stages of organizational design and calendar planning is drawn. The specificity of linear objects with respect to the level of elaboration of model elements and their attribute characteristics at different planning levels is noted.

**Models and methods.** The necessity of an individual approach to the decomposition of road structure elements taking into account the complex of natural and man-made factors is substantiated. At different stages of designing the organization of road construction, the timetable with different degrees of detail depending on the design objectives and available information about the object is presented. The parameters of specialized flows of a linear object, limitations and criteria for the optimality of the calendar plan at the design stage of the construction organization (CO) are determined. The level of elaboration of the model elements at the stage of work production by the contracting organization has been increased. The developed algorithm for forming a complex flow graph in the form of a flowchart and a DIM is presented.

**Results.** The use of the method is considered on the examples of structuring the elements of the object and technological processes at the stage of work production by the contracting organization, taking into account different options and schemes for organizing the work of specialized streams. The design results are presented in the form of a calculation matrix, a cyclogram and a Gantt graph in the MS Project program.

**Discussion and conclusion.** The development of the basic information for the model of the calendar plan for the construction of a road at different stages of design in an integrated general data environment is presented. The use of linear road is justified. zoning as a method of decomposition of a linear object at the stages of CAD, POS and work production by the contracting organization. The structural elements of the design at the final stage (work production by the contracting organization) are linear design and technological modules and specialized flows formed on the basis of maps of labor processes of the contracting organization.

**KEYWORDS:** highway, calendar plan model, design stages, information structuring, level of detail of a linear object, general data environment

**ACKNOWLEDGEMENT:** the authors express their gratitude to the reviewers of the article for the work done.

The article was submitted 16.11.2023; approved after reviewing 27.11.2023; accepted for publication 20.12.2023.

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.* Bobrova T.V., Pokalyukhina E.A. Development levels for time planning model of road construction at design stages. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2023; 20 (6): 774-785. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-774-785>

© Bobrova T. V., Pokalyukhina E. A., 2023



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

## ВВЕДЕНИЕ

Цифровая трансформация обозначена в качестве основного стратегического направления в развитии строительной отрасли Российской Федерации на ближайшее десятилетие<sup>1</sup>. Точкой отсчета назван 2022 г., хотя крупные компании-лидеры строительной отрасли начали эту работу гораздо раньше и уже накопили определённый опыт, который можно анализировать. По данным зарубежных и отечественных авторов технологии информационного моделирования (ТИМ, BIM) способны управлять графиком строительства, организовывать строительный надзор, способствовать обеспечению безопасных условий труда, наглядность контроля хода работ [1, 2, 3, 4, 5].

Специалисты НИУ МГСУ проанализировали ситуацию и в 2022 г. представили отчет «Результаты исследования проблем внедрения ТИМ в инвестиционно-строительных проектах российских компаний»<sup>2</sup>. Отмечая положительные тенденции и заинтересованность участников строительной деятельности, авторы отчета обобщили наиболее существенные препятствия на пути к комплексному внедрению ТИМ:

- неподготовленность основных участников инвестиционной деятельности и контрагентов к взаимодействию с использованием новых технологий моделирования и управления;
- нехватка кадров с достаточным уровнем и набором компетенций для реализации целей цифровой трансформации;
- разрозненность и несогласованность существующих информационных систем, государственных стандартов и нормативной базы.

С 2023 г. отмечена активизация российских компьютерных компаний в области информационных технологий, особенно в условиях импортозамещения отечественными программными продуктами. Проводится много обучающих вебинаров в Интернете для специалистов строительной отрасли разного уровня с целью повышения компетентности и заинтересованности работников, широко демонстрируются возможности и результаты использования новых технологий, касающиеся, в том числе организации совместной работы над проектом в среде общих данных (СОД).

Среди отечественных компаний, работающих активно в области BIM-технологий и реализующих комплексный подход к цифровизации строительной отрасли, можно отметить следующих вендоров: *Renga*, *Model Studio CS*, *Nano CAD*, *Credo Dialogue*, *IndorCad*, Адепт, *Spider*, «Проектные практики».

Интересен опыт Консалтинговой компании «Айбим»<sup>3</sup>, которая, сопровождая внедрение технологий цифровой трансформации в пионерные строительные и девелоперские проекты на протяжении более десятилетия, разработала детальную карту IT решений на основе интеграции программного обеспечения, оптимизации функциональных связей организационных структур, стандартизации нормативных данных и документооборота. Интеграционный принцип основан на научном системном подходе, который разрабатывался в нашей стране на первом этапе внедрения автоматизированных систем в строительстве (1970–1990 годы) [6, 7]. По разным причинам, включая недостаточную инструментальную базу, этот этап не был реализован в полной мере, но даже в тех условиях обеспечивал эффективность отдельных инженерных и экономических решений в строительстве. На базе опыта, накопленного строительной индустрией в предшествующие годы, можно прогнозировать, что использование современных разработок на российских WEB-платформах для профессионального многоуровневого управления проектами будет успешным.

В то же время нужно отметить, что успехами цифровизации не ограничиваются реальные результаты строительной деятельности. Проектирование сооружений и реализация проектных решений постоянно нуждаются в научных подходах, инновационных инженерных решениях, которые необходимо встраивать в общую систему любой цифровой трансформации.

Большая работа была проведена и проводится в настоящее время по стандартизации и классификации строительных нормативных документов в соответствии с требованиями SMART (англ. *Standards Machine Applicable, Readable and Transferable* – стандарты, применимые для машин, читаемые машинами и передаваемые на машины). Приказом Фе-

<sup>1</sup> Режим доступа: Распоряжение Правительства РФ от 31.10.2022 N 3268-р (дата обращения: 27.10.2023 )

<sup>2</sup> Режим доступа: [https://mgsu.ru/news/2022/Otchet\\_rez\\_issled\\_problem\\_TIM.pdf](https://mgsu.ru/news/2022/Otchet_rez_issled_problem_TIM.pdf) (дата обращения: 27.10.2023)

<sup>3</sup> Режим доступа: <https://bim-info.ru/> (Дата обращения: 27.10.2023)

дерального агентства по техническому регулированию и метрологии утверждён предварительный национальный стандарт ПНСТ 864-2023 «Умные (SMART) стандарты. Общие положения»<sup>4</sup>. Вопросы стандартизации оказались тесно связанными не только с системами автоматизации проектирования (САПР). На этапах организационного проектирования и календарного планирования классификаторы строительной информации (КСИ) востребованы для кодирования объектов цифровой информационной модели (ЦИМ) и текстов конструктивных и технологических требований.

Как считают эксперты<sup>5</sup>, не устранены недостатки в вопросах взаимосвязи отдельных элементов объекта даже в известном программном комплексе «CADLib Модель и Архив», разработанном компанией «СиСофт Девелопмент»<sup>6</sup>. Например, по данным экспертизы, при описании структуры здания «ступеньки не всегда знают, что являются частью лестничного марша, поручень лестницы вообще чувствует свою независимость, арматурная сетка ведет себя так, будто никому ничего не должна...». В качестве правильного семантического описания элемента здания приводится следующее: железобетонная свая относится к глобальной группе «строительные конструкции» и является частью «фундамента». Коды и связи элементов объекта, присвоенные на стадии проектирования ЦИМ, должны использоваться далее на всех стадиях организационного проектирования и календарного планирования.

Ещё одним важным понятием информационного моделирования, связанным с процессом решения основных проектных задач, включая планирование, является уровень детализации или уровень проработки элементов модели (*LOD – Level of Development*). *LOD* определяет перечень элементов модели и их атрибутивные характеристики, достаточные для принятия решений участниками проекта на каждом из уровней жизненного цикла (ЖЦ) объекта<sup>7</sup>.

Для комплексной автоматизации процесса календарного планирования строительства

используют программы, учитывающие специфику строительных объектов: *Microsoft Project Professional*, *Oracle Primavera*, *Project Spider*, *Plan-R* и другие. Данные программные продукты могут использоваться для проектирования календарных графиков как для площадочных, так и линейных объектов. К тому же именно эти программные комплексы, встроенные в интегрированные системы ТИМ, получили достаточно широкое распространение в отечественных бизнес-структурах и в проектных организациях независимо от отраслевой принадлежности.

При строительстве площадочных объектов промышленного и гражданского строительства выработаны определенные подходы к структурным декомпозициям элементов сооружений на модули и виды работ (СДР или *WBS*), которые необходимо выполнить в процессе планирования.

*BIM*-технологии в дорожной отрасли имеют свои специфические особенности, связанные прежде всего с линейным характером объекта. Ведущие ученые и практики в своих публикациях отразили достаточно полную картину истории становления и развития базовых автоматизированных систем в проектировании и строительстве отечественных автомобильных дорог, обозначили перспективы формирования национальной цифровой платформы транспортной инфраструктуры России, представили первоочередные задачи, которые, по их мнению, необходимо решить для полноценного внедрения этой технологии на всех стадиях жизненного цикла (ЖЦ) автомобильных дорог [8, 9, 10]. Учитывая современные подходы к *SMART*-стандартам, в дорожной отрасли уже ведется и будет продолжаться большая работа в этом направлении.

При строительстве автомобильных дорог основой структурной декомпозиции объекта служат конструктивные элементы: земляное полотно, слои дорожной одежды, искусственные сооружения, обустройство дороги и другие элементы, в зависимости от уровня *LOD*. Учитывая неравномерность распределения

<sup>4</sup> Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1303488720> (дата обращения: 17.11.2023)

<sup>5</sup> Кутузова О. Через тернии к... автоматической экспертизе цифровой информационной модели. <https://www.nanocad.ru/press/technical-articles/cherez-ternii-k-avtomaticheskoy-ekspertize-tsifrovoy-informatsionnoy-modeli/> (дата обращения: 13.10.2023).

<sup>6</sup> Режим доступа: <https://stroimprosto-msk.ru/digital/organizations/ao-sisoft-development/> (дата обращения: 27.10.2023)

<sup>7</sup> Бенклян С. Уровни детализации элементов информационной модели здания. [http://isicad.ru/ru/articles.php?article\\_num=17329](http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=17329). (дата обращения: 06.11.2023).

объемов по длине дороги, разные конструктивные решения, технологические особенности работы комплексов машин, климатические факторы и т.д., для разработки информационной модели организации строительных работ на линейном объекте необходимо прежде всего обосновать структуру элементов и процессов модели для разных стадий ЖЦ и уровней проектирования.

Практически все разработанные программы календарного планирования в своей основе опираются на диаграмму Ганта и разные формы представления графиков на основе её расчета в автоматическом режиме. Вопрос заключается в том, является ли исходная диаграмма Ганта оптимальным графиком производства работ, какой метод строительства принят в проекте, по какому принципу определены ресурсные и фронтальные связи? Эти вопросы должны быть четко сформулированы на подготовительном этапе до ввода исходных данных в программу расчета календарного графика.

Целью данной работы является:

- обоснование научного подхода к декомпозиции элементов модели автомобильной дороги на разных стадиях проектирования организации строительства с учетом специфики линейного объекта;
- математическая подготовка и структурирование информации для оптимизации календарного планирования в компьютерной среде.

## МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

Строительство дорог осуществляют в основном поточным методом с выделением отдельных участков для не поточного (последовательного) выполнения работ. Базовой моделью для отображения графика неритмичного строительного потока является циклограмма. Основой для формирования оптимальных планов являются математические модели разных типов [11, 12, 13]. Для расчета параметров комплексного линейного потока

используют матрично-сетевой метод, метод непрерывного использования ресурсов или фронта работ [14].

При проектировании дорожных конструкций прежде всего необходимо учитывать влияние природной среды, поэтому наиболее важными первичными условиями обоснования декомпозиции объекта является грунтовое основание, на котором строится дорога, и климатические факторы на территории. На разных стадиях ЖЦ линейного объекта исходными данными для проектирования дорожных конструкций и определения сроков строительства служат нормативные документы, учитывающие деление территорий на дорожно-климатические зоны<sup>89</sup>, районирование территорий на подзоны и районы на основе более углубленного изучения факторов природной среды [15], а также результаты инженерно-изыскательских работ.

Э.К. Кузахметова в работах [16, 17] обосновывает необходимость нового индивидуального подхода к проектированию земляного полотна дорог, учитывающего в полной мере особенности инженерно-геологических, гидрологических и топографических условий местности на протяжении линейного объекта<sup>10</sup>. Методы геоинформатики и таксономического анализа, предложенные в работе [18], позволяют выполнить линейное дорожное районирование (ЛДР), разделяя проектируемое земляное полотно на характерные участки с относительно однородными параметрами природной среды на основе инженерно-изыскательских работ по трассе дороги (линейно-дорожные комплексы – ЛДК).

В работах [19, 20] этот процесс определен как пространственная вертикальная декомпозиция дорожной конструкции на линейные проектно-технологические модули (ЛПТМ) и сосредоточенные проектно-технологические модули (СПТМ). В качестве СПТМ рассматривают участки с существенным изменением технологии и объемов линейных работ, а также участки с искусственными сооружениями

<sup>8</sup> ПНСТ 542-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Правила проектирования. М.: Стандартинформ. 2021. 153 с. <https://protect.gost.ru/v.aspx?control=8&baseC=6&page=7&month=6&year=2021&search=&RegNum=1&DocOnPageCount=15&id=230356> (Дата обращения 30.06.2023).

<sup>9</sup> ОДМ 218.3.1.005-2021 Проектирование нежестких дорожных одежд. Методические рекомендации по расчету параметров напряженно-деформированного состояния многослойных конструкций при воздействии колесных нагрузок. (Дата обращения 27.10.2023).

<sup>10</sup> Кузахметова Э. К. Усовершенствование методологии индивидуального проектирования сооружений в сложных условиях с учетом техногенного воздействия // Пути к конкурентоспособным и инновационным решениям по строительству зданий и сооружений транспортной инфраструктуры: сборник докладов участников 1-й научно-практической конференции с международным участием, Москва, 05 декабря 2020 года. М.: Российский университет транспорта, 2021. С. 54–64. EDN CKGXXW.

Таблица  
Структурирование базовой информации для календарного планирования линейных работ  
Источник: составлено авторами.

Table  
Structuring of basic information for the scheduling of linear works  
Source: Compiled by the authors.

№	Стадия ЖЦ объекта / документ	Структурная декомпозиция линейного объекта	Декомпозиция процесса строительства	База для планирования
1	Предварительное планирование / Техническое задание	Горизонтальная: земляное полотно, слои дорожной одежды. Вертикальная: в рамках климатической зоны, подзоны	Комплексный поток, технологический (специализированный поток)	Объекты аналоги; предварительные проектные объемы
2	Проектирование / ПОС	По элементам дорожной конструкции. Территориальное районирование по геокомплексам: зона, подзона, район, ЛДР	Комплексный поток, технологический (специализированный поток)	Исходные данные по объёмам проектной модели; типовые технологические карты, ГЭСН. Стандартный календарь
3	Строительство / ППР	Линейное дорожное районирование. Формирование ЛПТМ, СПТМ по уточненным элементам дорожной конструкции, сменная захватка специализированного потока	Потоки: комплексный, специализированный, рабочий (на основе операционного анализа)	Уточнённые согласованные данные по объёмам работ; карты трудовых процессов подрядчика. Рабочий календарь подрядной организации, учет факторов сезонности

В соответствии со структурной декомпозицией линейного объекта длина общего фронта работ на каждом линейном конструктивном элементе дороги  $L_j$ , как правило, совпадает с длиной объекта (дороги)  $L_D$  и определяется соотношением

$$L_j = \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K l_{kpj} + \sum_{r=1}^R l_{rj}, \quad (1)$$

где  $l_{kpj}$  – протяженность  $k$ -го участка  $p$ -го ЛПТМ на  $j$ -м конструктивном элементе при  $p = 1, 2, \dots, P$ ;  $k = 1, 2, \dots, K$ , км;  $j = 1, 2, \dots, J$ ;  $l_{rj}$  – протяженность сосредоточенного участка  $r$ -го типа на  $j$ -м конструктивном слое, при  $r = 1, 2, \dots, R$ , км.

Выполнение работ на СПТМ не включают в линейную модель специализированного потока. Однако при расчёте графика строительства на уровнях проекта организации строительства (ПОС) и проекта производства работ (ППР) определяют сроки, ранее которых, до подхода специализированных линейных отрядов, все работы на СПТМ должны быть завершены.

На каждом этапе жизненного цикла проекта строительства дороги календарный график представляют с разной степенью детализации в зависимости от целей проектирования и имеющейся информации об объекте (таблица).

ЦИМ календарного планирования основана на ряде предпосылок, обеспечивающих взаимосвязь элементов строительного процесса по ресурсам и фронту работ.

Продолжительность работы  $i$ -го отряда на  $k$ -м участке модуля  $p$ -го типа  $j$ -го конструктивного слоя, во временных единицах измерения, установленных в компьютерной программе для проекта, определяют по формуле

$$\tau_{kpij} = Q_{kpij} / M_{pij}, \quad (2)$$

где  $Q_{kpij}$  – объём готовой продукции  $i$ -го отряда на  $k$ -м участке модуля  $p$ -го типа  $j$ -го конструктивного слоя в нормативных ед. измерения вида работ;  $M_{pij}$  – производительность  $i$ -го отряда на  $p$ -м модуле  $j$ -го конструктивного слоя, в нормативных ед. изм. продукции / в ед. времени, установленных в проекте (часы, дни).

Непрерывность работы  $i$ -го линейного отряда на  $k$ -х участках одного модуля  $p$ -го типа на  $j$ -м конструктивном элементе определяется условием

$$t_{kpij}^{\text{кон}} + \tau_{k,(k+1)pij}^{\text{дисл}} = t_{(k+1)pij}^{\text{нач}}, \quad (3)$$

где  $t_{kpij}^{\text{кон}}$  – время окончания работы  $i$ -го отряда на  $k$ -м участке модуля  $p$ -го типа  $j$ -го конструктивного элемента, ед. изм. проектного времени;  $t_{(k+1)pij}^{\text{нач}}$  – время начала работы  $i$ -го отряда на  $(k+1)$ -м участке модуля  $p$ -го типа  $j$ -го конструктивного элемента, ед. проектного времени;  $\tau_{k,(k+1)pij}^{\text{дисл}}$  – время передислокации  $i$ -го отряда с  $k$ -го участка модуля  $p$ -го типа  $j$ -го конструктивного элемента на  $(k+1)$  участок модуля  $p$ -го типа  $j$ -го конструктивного элемента, ед.

изм. проектного времени (в частных случаях время передислокации можно не учитывать).

При разработке ПОС составы специализированных отрядов, их производительности и параметры принимают на основе типовых технологических карт<sup>11</sup> или Государственных элементных сметных норм (ГЭСН)<sup>12</sup> для соответствующего вида работ и принятой технологии. При рабочем проектировании на стадии ППР для формирования составов отряда и оптимизации сменной захватки используют карты трудовых процессов с учетом парка машин подрядчика. Сменные графики работы машин на захватках удобно разрабатывать и оптимизировать в MS Project при часовой шкале времени [21].

Объединение специализированных потоков (СП) в комплексный поток осуществляют с использованием расчетных организационно-технологических параметров линейных специализированных потоков:  $\tau_{ij}^{\text{разв}}$  – время развертывания  $i$ -го специализированного потока на  $j$ -м конструктивном элементе, дни;  $\tau_{ij}^{\text{сверт}}$  – время свёртывания  $i$ -го специализированного потока на  $j$ -м конструктивном элементе, дни;  $\tau_{j,(j+1)}^{\text{тех}}$  – нормативное время технологического перерыва между готовностью  $j$ -го конструктивного элемента к перекрытию  $(j+1)$ -м элементом (слоем дорожной конструкции), дни;  $\tau_{j,(j+1)}^{\text{резерв}}$  – резерв времени на случай непредвиденных задержек в работе предшествующего потока, 1-2 дня.

При работе одного специализированного отряда на каждом конструктивном элементе возможны следующие варианты организации работ:

#### 1-й вариант

Конструктивный элемент не разделен на модули и участки ( $P = 1, K = 1$ ), то есть длительность строительства слоя зависит только от общего объема линейных работ на конструктивном элементе и расчетной производительности отряда (2).

#### 2-й вариант:

На всех участках разных ЛПТМ будет работать один специализированный отряд, переходящий последовательно с участков одного модуля на участки другого модуля (с изменением производительности отряда на разных ЛПТМ).

Длительность работы  $i$ -го отряда на  $j$ -м конструктивном слое при таком варианте организации работ определится как время завершения линейных работ поточным методом на всех участках и модулях конструктивного слоя

$$T_j = \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \tau_{kpij} + \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \tau_{k,(k+1)pj}^{\text{дисл}} \quad (4)$$

Датой начала строительства  $D_c^{\text{нач}}$  считают дату начала работы первого отряда на первом участке первого модуля первого слоя конструкции ( $i=1, j=1, k=1, p=1$ ). Завершение работы на последнем  $P$ -м модуле  $J$ -го слоя дорожной конструкции соответствует сроку завершения строительства объекта  $D_c^{\text{кон}}$ , ед. изм. проектного времени.

Целевая функция модели  $F$  (продолжительность строительства, рабочие дни) с учетом заданных ограничений является оптимальной и рассчитывается по формуле

$$F = D_c^{\text{кон}} - D_c^{\text{нач}} \rightarrow \min. \quad (5)$$

Блок-схема алгоритма расчета комплексного линейного потока представлена на рисунке 1. Тип временной связи между смежными специализированными потоками в составе комплексного устанавливаются исходя из соотношения времени работы этих потоков на  $j$ -м и  $(j+1)$ -м конструктивных элементах по формулам, приведённым в блоках 7 и 8 (рисунок 1).

Наиболее характерными для дорожного строительства являются методы, реализующие принцип непрерывности использования ресурсов (формула 3).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

При формировании плана на уровне ППР, имеющего наиболее высокий уровень проработки элементов модели ( $LOD$ ), рассмотрим варианты комбинированного метода организации работ, когда строительство одного конструктивного слоя осуществляют несколько специализированных отрядов (потоков). Каждый отряд закреплен за участками ЛПТМ одного типа. При этом возможны две схемы организации работ:

<sup>11</sup> Технологические карты на устройство земляного полотна и дорожной одежды. Введены в действие распоряжением Минтранса России от 23.05.2003 г. № ОС-468-р. Изд-во РОСАВТОДОР. М., 2004. 357с.

<sup>12</sup> Государственные элементные сметные нормы +(ГЭСН), утв. приказами Минстроя России №№ 871/пр – 876/пр от 26.12.2019 г. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/trades/view.gesn-2020.php> (дата обращения: 27.09.2022).

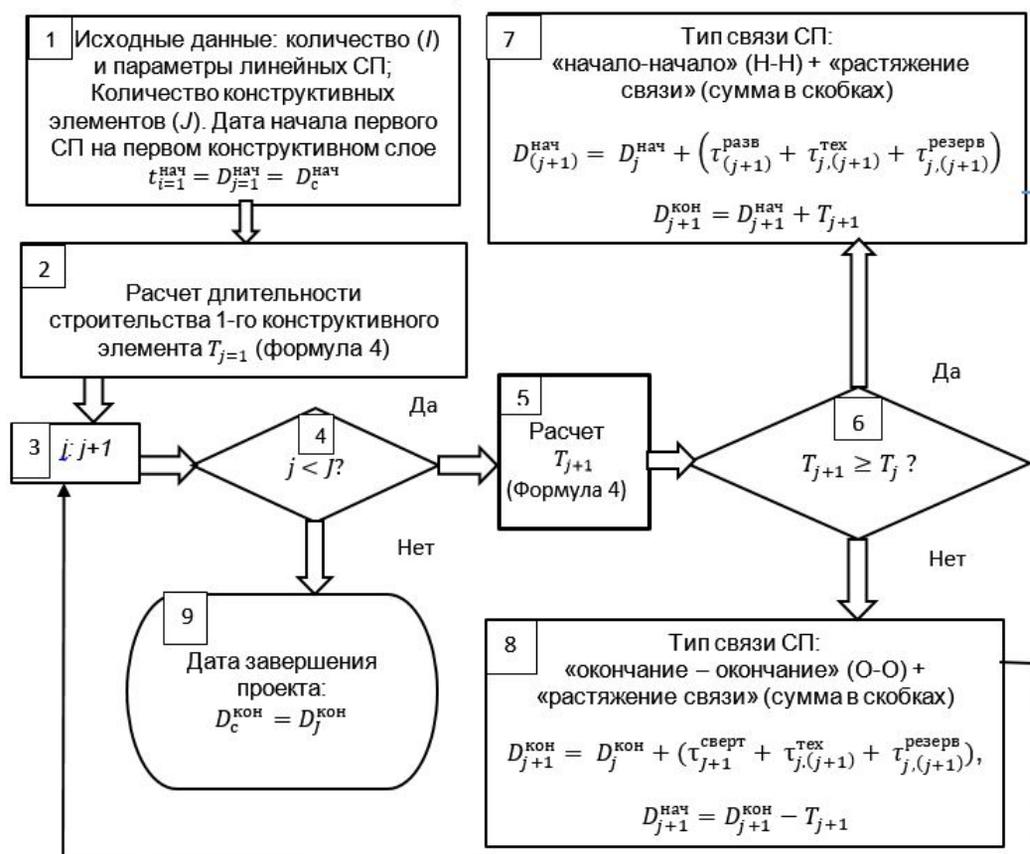


Рисунок 1 – Формирование графика комплексного потока в программе календарного планирования проекта  
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Formation of the integrated flow schedule in the project calendar planning program  
 Source: Compiled by the authors.

#### 1-я схема

Каждый отряд (кроме первого) начинает работу на рассредоточенных участках ЛПТМ своего типа после завершения работы предыдущего отряда на другом типе ЛПТМ (последовательный метод). Длительность строительства  $j$ -го слоя конструкции определится как сумма продолжительностей работы всех отрядов на этом конструктивном элементе дороги.

#### 2-я схема

Специализированные отряды для разных ЛПТМ  $j$ -го конструктивного слоя работают параллельно (параллельно-поточный метод). Такая схема организации работ особенно характерна для строительства земляного полотна в сложных условиях, обеспечивая сокращение сроков строительства и повышение эффективности.

При организации работы специализированных потоков по 2-й схеме (параллельно-поточный метод) параметры потоков на отдельных участках линейного объекта устанавливают на основе специальных алгоритмов расчета

матриц, учитывающих непрерывность работы потоков с возможным совмещением работы отрядов на разных конструктивных элементах [13]. Продолжительности работы специализированных отрядов на каждом отдельном участке по фронту работ  $\tau_{ijpk}$  определяют по формуле (2). Тип связи между потоками на смежных конструктивных элементах по каждому участку отдельно устанавливают по аналогии с зависимостями, сформулированными для связи СП применительно к комплексному дорожному потоку (см. рисунок 1).

При условии  $\tau_{i(j+1)pk} \geq \tau_{ijpk}$  связь между потоками устанавливают «начало – начало» (Н - Н) + «растяжение связи» (см. рисунок 1, блок 7).

При условии  $\tau_{i(j+1)pk} < \tau_{ijpk}$  связь между потоками устанавливают «окончание – окончание» (О-О) + «растяжение связи» (см. рисунок 1, блок 8).

Далее рассмотрен пример расчета матрицы, в котором строительство земляного полотна ведут два специализированных от-

ряда параллельно-поточным методом на закреплённых участках ЛПТМ, на строительстве подстилающего слоя основания работает один специализированный отряд. Для лучшей наглядности принята связь О-О для всех участков по фронту работ, а для «растяжения связи –  $\tau_{\text{растяж}}$ » только время свёртывания потока. Эти допущения не меняют общего подхода к расчету матрицы. Для пояснения деталей расчета и более удобного графического отображения его результатов перейдём в систему координат с порядковым обозначением участков (1, 2, ..., n, ..., N).

$t_{ijn}^{HB}$		$t_{ijn}^{OB}$
$t_{ijn}^H$		$t_{ijn}^O$
	$\tau_{ijn}$	

Рисунок 2 – Обозначения параметров потока  
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Designations of flow parameters\*  
Source: compiled by the authors.

На рисунке 2 в ячейке матрицы на  $n$ -м участке приведены следующие обозначения расчетных параметров потоков:  $t_{ijn}^{HB}$ ,  $t_{ijn}^H$  – соответственно возможное и расчетное начало работы  $i$ -го отряда на  $n$ -м участке  $j$ -го конструктивного слоя, дни;  $t_{ijn}^{OB}$ ,  $t_{ijn}^O$  – соответственно возмож-

ное и расчетное окончание работы  $i$ -го отряда на  $n$ -м участке  $j$ -го конструктивного слоя, дни;  $\tau_{ijn}$  – длительность работы  $i$ -го отряда на  $n$ -м участке  $j$ -го конструктивного слоя, дни.

На рисунке 3 представлен пример расчета матрицы с заданными выше условиями по формулам:

$$t_{ijn}^{HB} = \max \left\{ t_{(j-1)n}^O + \tau_{\text{растяж}} - \tau_{ijn} \right\} \quad (6)$$

$$t_{ijn}^{OB} = t_{ijn}^{HB} + \tau_{ijn}, \quad (7)$$

$$\tau_{\text{растяж}} = \tau_{j-1}^{\text{сверт}} + t_{j,(j-1)}^{\text{техн}} + \tau_{j,(j-1)}^{\text{резерв}}. \quad (8)$$

Обратный ход расчета потока по матрице обеспечил непрерывность работы специализированного отряда по строительству слоя основания (подстилающий слой) на участках дороги. Оптимальная продолжительность проекта при заданных условиях проектирования составила 40 дней. На рисунке 4 представлен график работы потоков, рассчитанных по матрице (рисунок 3) в виде графика Ганта в программе MS Project.

Структурная декомпозиция проекта в таблице MS Project представлена в виде 4-уровневой системы: проект – конструктивный элемент – номер ЛПТМ – номер участка на ЛПТМ. На рисунке 5 по матрице (см. рисунок 3) в программе MS Excel выполнено построение циклограммы работы трех специализированных потоков.

$\tau_{ijn}$ , дни		ЛПТМ - участки (р.к); в скобках - порядковый номер участка (1, 2, ..., n, ..., N)									
		1.1 (1)	2.1 (2)	2.2 (3)	1.2 (4)	2.3 (5)					
Специализированный поток (i) Конструктивный элемент (j)	Земляное полотно: 1-й поток на первом конструктивном элементе (ij) при i=1, j=1	0	10				10	15			
		10		0		0		5		0	
	Земляное полотно: 2-й поток на первом конструктивном элементе (ij) при i=2, j=1	0	0	0	12	12	27			27	33
		0		12		15		0			6
	Время развёртывания (свёртывания), потока на подстилающем слое (дни)		3		3		3		3		3
Подстилающий слой: 1-й поток на втором конструктивном слое (ij) при i=1, j=2		8	13	13	21	22	30	30	35	35	40
		9	14	14	22	22	30	30	35	35	
		5		8		8		5			5

Рисунок 3 – Матрица расчета потоков при параллельно-поточном методе организации работ на строительстве земляного полотна  
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Flow calculation matrix for the parallel-flow method of organizing work on the construction of the roadbed  
Source: compiled by the authors.



## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Khodabandelu, A. Agent-based modeling and simulation in construction / A. Khodabandelu, J. W. Park // *Automation in Construction*. 2021. Vol. 131. P. 103882. DOI 10.1016/j.autcon.2021.103882.
2. Doukari O. Automatic generation of building information models from dig-itized plans / O. Doukari, D. Greenwood // *Automation in Construction*. 2020. Vol. 113. P. 103129. DOI 10.1016/j.autcon.2020.103129.
3. Возгомент Н. В. Современные вызовы и перспективы развития BIM-моделирования в России в эпоху цифровизации // *E-Management*. 2020. Т. 3, № 3. С. 20–27. DOI 10.26425/2658-3445-2020-3-3-20-27.
4. BIM-integrated construction safety risk assessment at the design stage of building projects / Y. Lu, P. Gong, Y. Tang [et al.] // *Automation in Construction*. 2021. Vol. 124. P. 103553. DOI 10.1016/j.autcon.2021.103553.
5. Digital twin and its implementations in the civil engineering sector / F. Jiang, L. Ma, T. Broyd, K. Chen // *Automation in Construction*. 2021. Vol. 130. P. 103838. DOI 10.1016/j.autcon.2021.103838. EDN HXUUWO.
6. Глушков В. М.Ю., Михалевич В. С. Кибернетика. Вопросы теории и практики. М. Наука, 1986. 448 с.
7. Гусаков А.А. Системотехника строительства / Рос. АН. Совет по комплекс. проблеме «Кибернетика». 2-е изд., перераб. и доп. М., Стройиздат, 1993. 368 с.
8. Сковрцов А.В. Общая среда данных как ключевой элемент информационного моделирования автомобильных дорог // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2015. № 2(5). С. 37–41. DOI: 10.17273/С.
9. Бойков В.Н., Сковрцов А. В., Сарычев Д.С. Цифровая автомобильная дорога как отраслевой сегмент цифровой экономики // *Транспорт Российской Федерации*. 2017. №2(75). С. 56–60.
10. Бойков В.Н., Сковрцов А.В. InfraBIM для автомобильных дорог // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2019. № 1(12). С. 4–9. DOI: 10.17273/CADGIS.2019.1.1.
11. Солодкий А.И., Карпов Б.Н. Календарное планирование строительства и ремонта автомобильных дорог. М. Транспорт, 1988. 120 с.
12. Classification of network schedules as part of construction organization projects and works production projects / S. S. Dontsov, S. K. Zhetpysbaev, A. E. Mazhitova [et al.] // *Вестник Торайгыров университета. Экономическая серия*. 2022. No. 2. P. 35-44. DOI 10.48081/DLJR6812. EDN GZFEJG.
13. Construction schedule planning for railway station facilities / V. Z. Velichkin, M. V. Petrochenko, E. B. Zavodnova, A. Yu. Gorodishenina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans 2020)*, Irkutsk, 11–13 ноября 2020 года. Vol. 1151. Irkutsk: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012012. EDN GULUTG.
14. Величкин В. З., Петроченко М. В., Птухина Матрично-сетевая модель планирования сложных

комплексов работ // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. 2019. № 669. С. 13–17. EDN ZVYJMD.

15. Efimenko V., Efimenko S., Sukhorukov A., Features of road-climatic of territories MATEC Web of Conferences, Vol. 143, 01012 (2018).

16. Кузахметова Э. К. Строительство автомобильных дорог из местных слабых грунтов // *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2019. № 2(88). С. 25–28. EDN TMEQJA.

17. Кузахметова Э.К. К новой нормативной базе для современных дорог // *ДОРОГИ. Инновации в строительстве* № 83. 2020. [http://www.techinformpress.ru/images/stories/pdf/new\\_journal/83.pdf](http://www.techinformpress.ru/images/stories/pdf/new_journal/83.pdf)

18. Bobrova, T. Linear structure taxonomy with the account of environmental polystructures impact / T. Bobrova, V. Vorobyev // *MATEC Web of Conferences* 216, 01003 (2018). URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821601003>

19 Дубенков, А. А. Особенности структурно-модульного проектирования организации строительства дорог на многолетнемерзлых грунтах / А. А. Дубенков, Т. В. Боброва, М. С. Перфильев // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2014. – № 6(47). – С. 168-181. – EDN TBZNIN.

20. Боброва Т.В. Совершенствование организационно-технологического проектирования линейных транспортных объектов на основе моделирования их пространственной декомпозиции / Т.В. Боброва, А.А. Дубенков, И.В. Тытарь // *Системы. Методы. Технологии*. 2016. № 4. С.169–175. [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_27517937\\_48597390.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_27517937_48597390.pdf).

21. Боброва Т.В. Актуализация параметров информационной модели дорожно-строительного потока при разработке проекта производства работ. *Научный рецензируемый журнал "Вестник СибАДИ"*. 2022;19(6):916-927. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-916-927>

## REFERENCES

1. Khodabandelu A., Park J. W. Agent-based modeling and simulation in construction. *Automation in Construction*. 2021. Vol. 131. P. 103882. DOI 10.1016/j.autcon.2021.103882.
2. Doukari O., Greenwood D. Automatic generation of building information models from dig-itized plans. *Automation in Construction*. 2020. Vol. 113. P. 103129. DOI 10.1016/j.autcon.2020.103129.
3. Vozgoment N.V. Modern challenges and prospects for the development of BIM-modeling in Russia in the age of digitalization. *E-Management*. 2020;3(3):20-27. (In Russ.) <https://doi.org/10.26425/2658-3445-2020-3-3-20-27>
4. Lu Y., Gong P., Tang Y. [et al.] BIM-integrated construction safety risk assessment at the design stage of building projects. *Automation in Construction*. 2021. Vol. 124. P. 103553. DOI 10.1016/j.autcon.2021.103553.
5. Jiang F., Ma L., Broyd T., Chen K. Digital twin and its implementations in the civil engineering sector. *Automation in Construction*. 2021; Vol. 130: P. 103838. DOI 10.1016/j.autcon.2021.103838. EDN HXUUWO.

6. Glushkov V. M., Mikhalevich V. S. *Kibernetika voprosy teorii i praktiki* [Cybernetics. Questions of theory and practice]. Moscow, Nauka, 1986: 448. (In Russ.)
7. Gusakov A. A. *Sistemotekhnika stroitel'stva* [Construction System Engineering]. Ros. AN. Sovet po kompleks, probleme "Kibernetika". 2-e izd., pererab. i dop. Moscow, Strojizdat, 1993: 368. (In Russ.)
8. Skvorcov A.V. Obshhaya sreda danny'kh kak klyuchevoj e'lement informacziionnogo modelirovaniya avtomobil'ny'kh dorog [Common Data Environment as a Key Element of Highway Information Modeling]. *SAPR i GIS avtomobil'ny'kh dorog*. 2015; 2(5):37–41. (In Russ.) DOI: 10.17273/C.
9. Bojkov V.N., Skvorcov A.V., Sary'chev D.S. Czifrovaya avtomobil'naya doroga kak otraslevoj segment czifrovoj e'konomiki [Digital Highway as an Industry Segment of the Digital Economy]. *Transport Rossijskoj Federaczii*. 2017; 2(75): 56-60. (In Russ.)
10. Bojkov, V.N. Skvorcov, A.V. InfraBIM dlya avtomobil'ny'kh dorog [InfraBIM for Highways]. *SAPR i GIS avtomobil'ny'kh dorog*. 2019;1(12): 4-9. (In Russ.) DOI:10.17273/CADGIS.2019.1.1.
11. Solodkij A.I., Karpov B.N. Kalendarnoe planirovanie stroitel'stva i remonta avtomobil'ny'kh dorog [Road Construction and Repair Schedule]. Moscow: Transport, 1988:120. (In Russ.)
12. Dontsov S. S., Zhetpysbaev S. K., Mazhitova A. E. Classification of network schedules as part of construction organization projects and works production projects. *Vestnik Torajgy'rov universiteta*. E'konomicheskaya seriya. 2022; 2: 35-44. (In Russ.) DOI 10.48081/DLJR6812. EDN GZFEJG.
13. Construction schedule planning for railway station facilities / V. Z. Velichkin, M. V. Petrochenko, E. B. Zavodnova, A. Yu. Gorodishenina. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans 2020), Irkutsk, 11–13 November 2020 goda. Vol. 1151. Irkutsk: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012012. EDN GULUTG.
14. Velichkin V. Z., Petrochenko M. V., Ptukhina I. S. Matrichno-setevaya model' planirovaniya slozhny'kh kompleksov rabot [Matrix-network model of complex work complex planning]. *Trudy' Voенно-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhajskogo*. 2019; 669: 13-17. (In Russ.) EDNZVYJMD.
15. Efimenko V., Efimenko S., Sukhorukov A. Features of road-climatic of territories. *MATEC Web of Conferences*, Vol. 143, 01012 (2018).
16. Kuzakhmetova E. K. Stroitel'stvo avtomobil'ny'kh dorog iz mestny'kh slaby'kh gruntov []. *Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli*. 2019; 2(88): 25-28. EDN TMEQJA.
17. Kuzakhmetova E. K. K novej normativnoj baze dlya sovremenny'kh dorog. *DOROGI. Innovaczii v stroitel'stve*. 2020;83. Available at: [http://www.techinform-press.ru/images/stories/pdf/new\\_journal/83.pdf](http://www.techinform-press.ru/images/stories/pdf/new_journal/83.pdf)
18. Bobrova T., Vorobyev V. Linear structure taxonomy with the account of environmental polystructures impact. *MATEC Web of Conferences* 216, 01003 (2018). Available at: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821601003>
19. Dubenkov A. A., Bobrova T. V., Perfil'ev M. S. Osobennosti strukturno-modul'nogo proektirovaniya organizaczii stroitel'stva dorog na mnogoletnemerzly'x gruntax. [Features of structural and modular design of the organization of road construction on permafrost soils] *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2014; 6(47):168-181. (In Russ.) EDN TBZNIN.2120
20. Bobrova T.V., Dubenkov A.A., Ty'tar I.V. Sovershenstvovanie organizaczionno-tekhnologicheskogo proektirovaniya linejny'kh transportny'kh ob'ektov na osnove modelirovaniya ikh prostranstvennoj dekompoziczii [Improvement of organizational and technological design of linear transport objects based on modeling of their spatial decomposition]. *Sistemy'. Metody'. Tekhnologii*. 2016; 4: 169-175. [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_27517937\\_48597390.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_27517937_48597390.pdf).
21. Bobrova T.V. Updating parameters of an information model for road construction flow in work development project. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022;19(6):916-927. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-916-927>

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

Боброва Т.В. Формулирование цели и задач исследования, математическая постановка задач календарного планирования для уровней ПОС и ППР.

Покалюхина Е.А. Анализ источников, формирование вариантов организации работ, алгоритмы и расчет циклограмм, реализация расчетов в MS Project.

## COAUTHORS' CONTRIBUTION

Tatiana V. Bobrova. The purpose and objectives of the study statement, mathematical formulation of calendar planning tasks for the levels of POS and work production by the contracting organization.

Elena A. Pokalyukhina. Analysis of sources, formation of work organization options, algorithms and calculation of cyclograms, implementation of calculations in MS Project.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Боброва Татьяна Викторовна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Проектное управление и информационное моделирование в строительстве», SPIN-код: 8670-8576.

Покалюхина Елена Александровна – инженер, кафедра «Проектное управление и информационное моделирование в строительстве», SPIN-код: 3159-0150.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatyana V. Bobrova – Dr. of Sciences, Professor, the Project Management and Information Modelling in Construction Department, SPIN-код: 8670-8576.

Elena A. Pokalyukhina – Engineer, the Project Management and Information Modelling in Construction Department, SPIN-код: 3159-0150.

Научная статья  
УДК 625.711  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797>  
EDN: UTSJKO



## ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЛЕДОВЫХ АВТОЗИМНИКОВ С ПОМОЩЬЮ АРМИРОВАНИЯ И МОДИФИКАЦИИ ЛЬДА

Г.Ю. Гончарова<sup>1</sup>, В.В. Сиротюк<sup>2\*</sup>, О.В. Якименко<sup>2</sup>, П.В. Орлов<sup>2</sup>, Р.Е. Долгодворов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет),

г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),

г. Омск, Россия

<sup>3</sup>ООО «Газпромнефть НТЦ»,

г. Тюмень, Россия

[galinagoncharova@mail.ru](mailto:galinagoncharova@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4270-819X>;

[sirvv@yandex.ru](mailto:sirvv@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2254-8803>;

[olgayakimenko@yandex.ru](mailto:olgayakimenko@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5088-5519>;

[orlov-pv@mail.ru](mailto:orlov-pv@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9363-0735>;

[dolgodvorov.re@gazpromneft-ntc.ru](mailto:dolgodvorov.re@gazpromneft-ntc.ru)

\*ответственный автор

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Природные процессы, связанные с оттаиванием вечной мерзлоты, и сопутствующие им риски техногенных катастроф в последние годы неуклонно возрастают. Одновременно открывается новое пространство возможностей по развитию территорий, формированию новых маршрутов транспортировки грузов как транзитом, так и непосредственно в регионы Арктики. Возрастает количество потребителей, повышаются требования к экономической эффективности транспортной инфраструктуры и требования к материалам для ее строительства и содержания.

**Материалы и методы.** Водный лёд – одна из самых распространённых в северной природе субстанций, а опыт его использования в качестве строительного материала уходит вглубь веков. При этом применение водного льда до настоящего времени не имеет альтернативы при строительстве сезонных ледовых дорог и переправ, в том числе для решения задач нефтегазодобывающих компаний. Возможностям применения современных материалов, изменяющих свойства водного льда и конструктивно-технологических решений для увеличения грузоподъемности и безопасности ледовых переправ и продления сроков эксплуатации автозимников, посвящена данная статья.

**Результаты.** Экспериментально-теоретические исследования, испытания на полигоне, опытно-производственные испытания на ледовых переправах показали возможность значительно повысить грузоподъемность и безопасность движения транспорта при армировании льда. Введение модификаторов водного льда совместно с его армированием существенно улучшают физико-механические свойства водного льда.

**Заключение.** Изложено представление авторов о возможностях значительного увеличения несущей способности ледового покрова на автозимниках, безопасности движения транспорта, продления сроков их эксплуатации при комбинированном применении специальных армирующих материалов и химических модификаторов водного льда. Раскрыты причины ограниченного применения рекомендаций, предложенных авторами.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Арктика, автозимники, ледовые переправы, повышение грузоподъемности, армирование, модифицирующие соединения, структура льда, полимерные связующие

© Гончарова Г.Ю., Сиротюк В.В., Якименко О.В., Орлов П.В., Долгодворов Р.Е., 2023



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Статья поступила в редакцию 22.11.2023; одобрена после рецензирования 18.12.2023; принята к публикации 20.12.2023.

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: Гончарова Г. Ю., Сиротюк В. В., Якименко О. В., Орлов П. В., Долгодворов Р. Е. Повышение несущей способности и безопасности ледовых автозимников с помощью армирования и модификации льда // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6 (94). С. 786-797. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797>

EDN: UTSJKO

## LOAD-BEARING CAPACITY AND SAFETY FOR WINTER ROADS IMPROVEMENT USING REINFORCEMENT AND ICE MODIFICATION

Galina Y. Goncharova<sup>1</sup>, Viktor V. Sirotiuk<sup>2\*</sup>, Olga V. Yakimenko<sup>2</sup>, Pavel V. Orlov<sup>2</sup>, Roman E. Dolgodvorov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University (national Research University), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

<sup>3</sup>ООО Gazpromneft STC, Tyumen, Russia

[galinagoncharova@mail.ru](mailto:galinagoncharova@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4270-819X>;

[sirvv@yandex.ru](mailto:sirvv@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2254-8803>;

[olgayakimenko@yandex.ru](mailto:olgayakimenko@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5088-5519>;

[orlov-pv@mail.ru](mailto:orlov-pv@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9363-0735>;

[dolgodvorov.re@gazpromneft-ntc.ru](mailto:dolgodvorov.re@gazpromneft-ntc.ru)

\*corresponding author

### ABSTRACT

**Introduction.** The natural processes associated with the thawing of permafrost and the accompanying risks of man-made disasters have been steadily increasing in recent years. At the same time, a new space of opportunities opens up for the development of territories, the formation of new cargo transportation routes, both in transit and directly to the Arctic regions. The number of consumers is increasing, the requirements for the economic efficiency of transport infrastructure and the requirements for materials for its construction and maintenance are increasing.

**Materials and methods.** Water ice is one of the most widespread substances in the northern nature, and the experience of its use as a building material goes back centuries. At the same time, the use of water ice still has no alternative in the construction of seasonal ice roads and crossings, including for solving the tasks of oil and gas companies. This article is devoted to the possibilities of using modern materials that change the properties of water ice and structural and technological solutions to increase the carrying capacity and safety of ice crossings and extend the service life of winter trucks.

**Results.** Experimental and theoretical studies, tests at the landfill, pilot production tests at ice crossings have shown the possibility to significantly increase the carrying capacity and safety of the transport when reinforcing ice. The introduction of water ice modifiers together with its reinforcement significantly improve the physical and mechanical properties of water ice.

**Conclusion.** The authors' idea of the possibilities of a significant increase in the bearing capacity of the ice cover on winter roads, traffic safety, prolongation of their service life with the combined use of special reinforcing materials and chemical modifiers of water ice is presented. The reasons for the limited use of the recommendations proposed by the authors are disclosed.

© Goncharova G. Y., Sirotiuk V. V., Yakimenko O. V., Orlov P. V., Dolgodvorov R. E., 2023



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

**KEYWORDS:** Arctic, winter trucks, ice crossings, lifting capacity, reinforcement, modifying compounds, ice structure, polymer binders

**The article was submitted 22.11.2023; approved after reviewing 18.12.2023; accepted for publication 20.12.2023.**

**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.* Galina Y. Goncharova, Viktor V. Sirotiuk, Olga V. Yakimenko, Pavel V. Orlov, Roman E. Dolgodvorov Load-bearing capacity and safety for winter roads improvement reinforcement and ice modification. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2023; 20 (6): 786-797. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797>

## ВВЕДЕНИЕ

Арктика находится в поле пристального внимания руководства России. В 2020 г. был принят ряд важных документов стратегического и долгосрочного планирования, определяющих государственную политику развития Арктической зоны. Важнейшей проблемой при реализации поставленных в этих документах задач является логистика на северных территориях. На текущий период ежегодно в России официально организуются и функционируют в зимний период более 1000 ледовых автозимников и переправ общей протяжённостью, измеряемой тысячами километров. Их грузоподъёмность в первую очередь определяется толщиной и структурой льда, которая зависит от температуры воздуха и воды. ГОСТ Р 58948–2020<sup>1</sup> требует для пропуска через переправу машин массой 20 т толщину льда не менее 55–65 см, а массой 40 т – 75–100 см. Обычно продолжительность действия переправ составляет не более 2–4 месяцев.

В ближайшей перспективе альтернативы автозимникам и ледовым переправам не прослеживаются:

- воздушный транспорт очень дорог, требует строительства аэродромов и не может обеспечить необходимый грузооборот;

- водный транспорт ограничен временем навигации на северных реках в 2–4 месяца и требует дополнительной доставки грузов до объектов другими видами транспорта;

- строить постоянные дороги и мосты экономически неоправданно из-за их значительной протяжённости, неразвитости транспортной сети арктических регионов и отсутствия баз строительной индустрии; срок окупаемости подобных транспортных объектов лежит за пределами их срока службы.

Исследования сезонной эксплуатации ле-

довой дороги Оулу-Хайлуото (Финляндия) с 1974 по 2009 г. показали, что год от года наблюдается явный тренд более позднего начала допуска к движению транспорта (по допустимой национальными стандартами толщине льда), который составляет 0,67 дня/год, а ежегодная максимальная толщина льда снижается приблизительно на 0,55 см/год [1]. Возрастание влияния изменения климатических условий на зимние дороги в первую очередь относится к ледовым переправам как к «слабейшим» звеньям автомобильных зимников [2].

Поэтому дальнейшее развитие сети временных дорог, ледовых автозимников и переправ с повышением их грузоподъёмности, безопасности и сроков функционирования является актуальной задачей.

**Цель данной публикации:** ознакомление научной общественности и специалистов дорожной отрасли с результатами и направлениями исследований учёных МГТУ им. Н.Э. Баумана и СибАДИ по проблеме повышения несущей способности и безопасности ледовых автозимников.

Сама идея усиления ледовых переправ и автозимников не нова. Со времён освоения Сибири и организации почтовой службы в России «приписные» крестьяне пытались усиливать ледяные пороги по рекам хворостом, жердями, брёвнами, досками; «сохраняли» лёд, покрывая его соломой, опилками и т.п.

Вопросы физико-механических свойств льда, проблемы расчета ледяного покрова и увеличения его грузоподъёмности изучаются более 100 лет. Этим вопросам посвящены работы Г.А. Авсюка, С.А. Арцыбашева, С.А. Бернштейна, Г.Р. Брегмана, И.П. Бутягина, Н.Н. Бычковского, В.М. Бузника, Б.П. Вейнберга, К.Ф. Войтковского, С.С. Голушкевича, Г.Ю. Гончаровой, А.Д. Дмитриева, А.М. Елистратовой, Н.Н. Зубова, Б.Д. Кар-

<sup>1</sup> ГОСТ Р 58948–2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Дороги автомобильные зимние и ледовые переправы. Технические правила устройства и содержания». Дата введения 2020-11-01.

ташкина, С.В. Изюмова, К.Н. Коржавина, М.М. Корунова, А.Н. Крылова, С.В. Крылова, Б.Г. Коренева, Г.Л. Кузуба, А.М. Кулижникова, В.В. Лаврова, П.И. Лебедева, Б.В. Прокуракова, Д.В. Панфилова, В.Н. Пинегана, И.С. Песчанского, Б.А. Савельева, В.В. Сиротюка, Д.Е. Хейсина, А.Ф. Хренова, П.А. Шуйского, О.В. Якименко, Г.Н. Яковлева и многих других.

Вопросам усиления ледового покрова посвящены десятки изобретений и патентов. В настоящее время рассматриваемым вопросам посвящены публикации зарубежных авторов, например [3, 4, 5, 6].

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На рисунке 1 представлена классификация способов увеличения несущей способности ледового покрова и продления сроков эксплуатации переправ.

В настоящее время появились новые материалы, методы и конструктивно-тех-

нологические решения в области ледовых технологий. Тем не менее стандарт РФ – ГОСТ Р 58948–2020<sup>2</sup> рекомендует только два старинных метода усиления ледовых переправ: искусственное намораживание льда и устройство деревянных настилов из брёвен и досок.

Одним из относительно новых конструктивно-технологических решений, повышающих грузоподъёмность и безопасность ледовых автозимников, является метод армирования ледяного покрова геосинтетическими материалами [7, 8, 9]. Суть его заключается во вмораживании в ледовый покров по мере его формирования специальных геосеток и георешеток. Армирующие материалы воспринимают растягивающие напряжения, возникающие в ледяном покрове от воздействия транспортных и термических нагрузок.

Кроме экспериментально-теоретических исследований (рисунок 2) проведены испытания армированного ледового покрова на полигоне (рисунки 3,4, 5).



Рисунок 1 – Классификация способов увеличения несущей способности ледового покрова и продления сроков эксплуатации переправ  
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Classification of ways to increase the bearing capacity of the ice cover and extend the service life of crossings  
Source: compiled by the authors.

<sup>2</sup> ГОСТ Р 58948–2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Дороги автомобильные зимние и ледовые переправы. Технические правила устройства и содержания». Дата введения 2020-11-01.

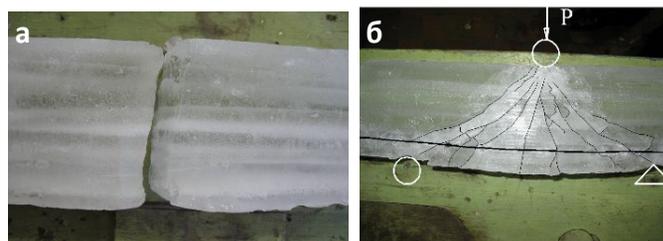


Рисунок 2 – Характер разрушения:  
 а – неармированный образец; б – армированный образец  
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Nature of destruction: a – non-reinforced sample; b – reinforced sample  
 Source: compiled by the authors.

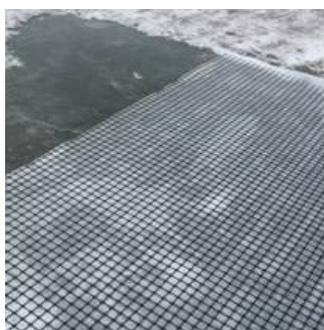


Рисунок 3 – Укладка геокомпозита (геосетка + геотекстиль)  
 и поливка участка водой для намораживания льда («верхнее» армирование)  
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Laying geocomposite (geogrid + geotextile)  
 and watering the site with water for freezing ice ("upper" reinforcement)  
 Source: compiled by the authors.



Рисунок 4 – Погружение геокомпозита в «лайну» и протаскивание его подо льдом  
 капроновыми тросами («нижнее» армирование)  
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Immersion of the geocomposite in the 'lane' and dragging  
 it under the ice with nylon cables ('lower' reinforcement)  
 Source: compiled by the authors.



Рисунок 5 – Испытание опытного участка на полигоне колесной и гусеничной техникой  
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Testing of the pilot site at the landfill with wheeled and tracked vehicles  
Source: compiled by the authors.

Осуществлено строительство и испытания армированных участков ледовых переправ

на р. Иртыш в Омской обл. (рисунок 6) и на р. Пеза (Архангельская обл.).



Рисунок 6 – Укладка геосинтетики зимой и извлечение её весной  
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Laying geosynthetics in winter and extracting it in spring  
Source: compiled by the authors.

На основании полного цикла испытаний и анализа полученных результатов предложена уточнённая формула для определения требуемой толщины армированного ледового покрова  $h$  (см) для данной нагрузки  $P$  (т)

$$h = 11n\sqrt{P}/K_{арм}$$

где  $n$  - коэффициент, учитывающий интенсивность движения (см. таблицу В.1 ГОСТ Р 58948–2020);  $K_{арм}$  – коэффициент, учитывающий наличие армирующей прослойки (таблица).

Таблица  
Значение коэффициента армирования  $K_{арм}$   
Источник: составлено авторами

Table  
The value of the reinforcement coefficient  $K_{арм}$   
Source: compiled by the authors

Прочность геосетки (георешётки), кН/м	Относительная деформация при разрыве, %, не более	$K_{арм}$ при верхнем/нижнем армировании
20	3	1,10/1,15
	8	1,05/1,10
60	3	1,20/1,30
	8	1,15/1,20
100	3	1,30/1,50
	8	1,25/1,40

Если принять, что требуемая толщина неармированного льда для нагрузки 40 т составляет примерно 60 см (см. таблицу 12 ГОСТ Р 58948–2020), то посредством армирования эта толщина может уменьшиться до 40 см. За сутки зимой толщина ледяного покрова может увеличиваться примерно на 2 см. Следовательно, армированную переправу можно вводить в эксплуатацию на 10 суток раньше, а закрывать на 5-10 суток позднее.

Значительные изменения природных прочностных и деформативных свойств водного льда даёт применение композиционных методов<sup>3</sup> [10, 11]. Для усиления несущей способности ледового покрытия предлагается одновременно вносить в микродозах модифицирующие соединения и армирующие элементы нового поколения.

Использованию водного льда в качестве удобного доступного и полноценного материала препятствуют его недостаточная прочность и высокая хрупкость. Функциональное назначение ледовых модификаторов – это снижение хрупкости ледовой матрицы за счёт создания демпфирующей прослойки в межкристаллическом пространстве, купирование возникающих трещин и усиление адгезии к армирующим элементам. Выбор армирующих элементов должен производиться в соответствии с современными критериями, разработанными с позиций сопряжения физико-механических

свойств льда и армирующих материалов. По результатам экспериментальных исследований совместное использование обоих механизмов воздействия на свойства ледового композита приводит к эффекту, превышающему сумму воздействий модификации и армирования по отдельности [12, 13]. Оптимальный выбор состава и концентраций вводимых в лёд модификаторов, а также структуры и конфигурации армирующих элементов открывает принципиально новые возможности для использования водного льда в качестве полноценного строительного материала для северных регионов.

В настоящей статье представлены два наиболее перспективных направления, получивших активное развитие изначально в сфере ледовых технологий для спорта высших достижений, а затем и для решения широкого круга задач Арктического региона. Речь идет о модификации свойств ледовых массивов внесением в воду для заливки льда микродоз высокомолекулярных соединений различного функционального назначения.

При кристаллизации разливаемой жидкости искусственно внесённые соединения локализируются в межкристаллическом пространстве и играют роль демпфера между кристаллами, снижая интенсивность межкристаллических взаимодействий (рисунок 7).

<sup>3</sup> Гончарова Г.Ю. [и др.] Лед как материал для Арктики // Сборник докладов конференции «Материалы для технических устройств и конструкций, применяемых в Арктике» (Москва, 26 ноября 2015 г.). М.: ФГУП ВИАМ, 2015. 17 с.

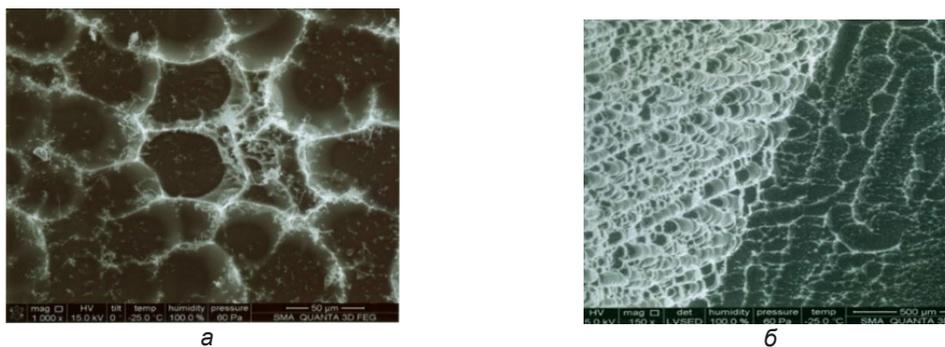


Рисунок 7 – Криомикроскопическое изображение модифицированного льда: а – вид сверху; б – вид сверху и боковой скол  
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Cryomicroscopic image of modified ice: top view (a), top view and side chip (b)  
Source: compiled by the authors.

Как показали исследования последних лет, наиболее эффективно использование модифицирующих соединений одновременно с армированием ледовых структур различными материалами, отобранными в соответствии с разработанными нами критериями, учитывающими возможность их сопряжения с ледовой матрицей и создания композиционного материала со свойствами, существенно отличающимися от естественного льда.

Теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия ледовой матри-

цы с вносимыми упрочняющими материалами показали, что собственная прочность вносимых элементов является далеко не исчерпывающим показателем. Повышенная жёсткость вмораживаемых конструкций не укрепляет ледовое покрытие, а, наоборот, препятствует формированию композиционного материала и провоцирует образование новых концентраторов напряжений и хрупкое разрушение композита (рисунок 8).



а



б

Рисунок 8 – Особенности разрушения армированного льда:  
а – образцы льда, армированные жёсткими металлоконструкциями;  
б – хрупкое разрушение образцов, армированных металлической проволокой  
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Features of reinforced ice destruction:  
Ice samples reinforced with rigid metal structures (a),  
brittle destruction of samples reinforced with metal wire (b)  
Source: compiled by the authors.

Только оптимальное соотношение механических свойств модифицированного льда и армирующих элементов даёт максимальный эффект для композита.

В соответствии с предложенными критериями на первый план выходят и такие свойства материалов, как максимальная адгезия к ледовой матрице, сопряжение физико-механических характеристик (коэффициентов линейного и объёмного расширения), а также максимальное отношение смоченной площади армирующих элементов к их суммарной массе. Последнее соображение особенно актуально как фактор компактности и снижения

суммарного веса армирующих материалов при их транспортировке к месту использования.

Таким образом, можно говорить о смещении вектора в разработке новых упрочнённых композиционных материалов на основе водного льда в сторону волоконных материалов, особенно имеющих фибриллярную структуру. Прочностные характеристики ледовых образцов, изготовленных с использованием модификаторов и армирования, обладают большей прочностью как на растяжение при изгибе, так и на сжатие (рисунок 9).

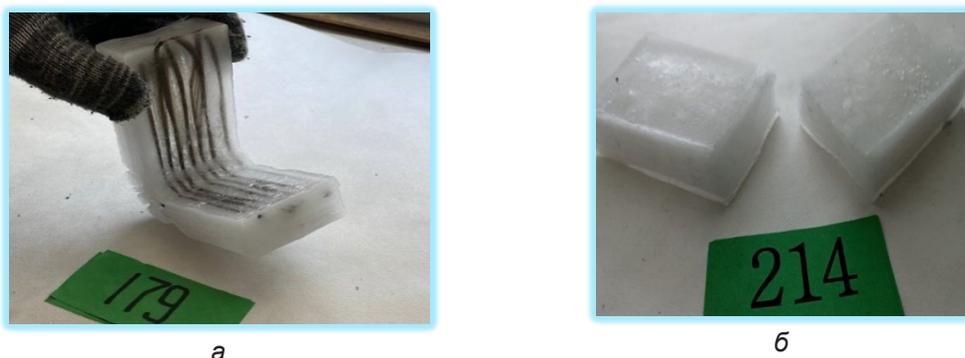


Рисунок 9 – Разрушение модифицированного и чистого льда:  
 а – деформация и пластическое разрушение модифицированного и армированного ледового образца;  
 б – хрупкое разрушение ледового образца из чистой воды  
 Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Destruction of modified and pure ice:  
 Deformation and plastic destruction of a modified and reinforced ice sample (a),  
 brittle destruction of an ice sample from pure water (b)  
 Source: compiled by the authors.

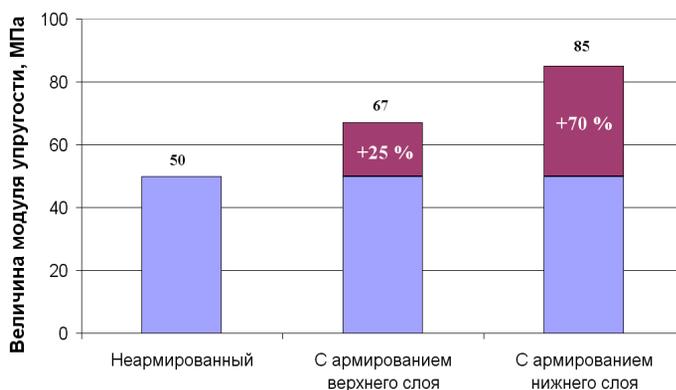


Рисунок 10 – Результаты испытаний на опытных участках  
 Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Test results at experimental sites  
 Source: compiled by the authors.

При этом требуется большая величина работы для их разрушения по сравнению с образцами из чистой воды.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Обобщение результатов испытаний на полигоне и реальной переправе показало существенное (от 25 до 70%) увеличение грузоподъёмности ледового покрова, армированного специальной геосеткой и георешёткой (рисунок 10) и отсутствие раскрытых температурных трещин на нём.

Аналогичные положительные результаты были получены и при армировании ледового покрова на р. Пеза (Архангельская обл.).

При этом «нижнее армирование» обеспечивает расположение арматуры в зоне, наиболее подверженной растягивающим напряжениям от транспортной нагрузки. «Верхнее» – в наибольшей степени воспринимает и компенсирует термические напряжения, препятствуя образованию трещин.

При использовании модификаторов льда его механические свойства существенно улучшаются. Значительно возрастает и позитивный эффект при совместном использовании армирования ледового покрытия. Следует отметить, что рекомендуемые авторами материалы, являясь экологически нейтральными, позволяют армировать и структурировать ледовые покрытия, обладающие требуемым комплексом физико-механических свойств.

После проведения полного цикла испытаний на полигонах и опытных участках будут установлены математические зависимости, позволяющие достоверно регламентировать требуемую толщину ледового покрова при композитном армировании.

На основании изложенного можно предположить, что ледовые переправы могут быть открыты при существенно меньшей толщине льда (чем требуется по ГОСТ Р 58948–2020) и эксплуатироваться более длительное время. При этом даже при значительной деформации они сохраняют несущую способность, обеспечивая тем самым безопасность движения по такому льду (защита от провалов автомобилей на переправах), что нехарактерно для природного льда и чрезвычайно актуально при формировании ледовых переправ.

## ВЫВОДЫ

1. Строительству ледовых автозимников в северных, малообжитых регионах РФ пока нет альтернативы. При этом становится всё более актуальным увеличение грузоподъёмности и безопасности ледовых дорог.

2. Основной документ, нормирующий все вопросы по проектированию, строительству и содержанию ледовых автозимников (ГОСТ Р 58948–2020), предлагает конструктивно-технологические решения и материалы, не учитывают современные научные достижения в области улучшения физико-механических свойств льда, не позволяют в полной мере решать проблему повышения их грузоподъёмности, продления сроков эксплуатации переправ и обеспечения их безопасности.

3. Целесообразность применения армирующих лёд некоторых видов геосеток и плоских георешёток для увеличения грузоподъёмности и безопасности ледовых автозимников доказана многолетними экспериментально-теоретическими исследованиями, испытаниями на полигоне и на двухэксплуатируемых ледовых переправах. Однако эти конструктивно-технологические решения не могут найти широкого применения ввиду отсутствия соответствующей нормативной базы и методики технико-экономического обоснования целесообразности дополнительных затрат на усиление ледовых автозимников.

4. Исследования по применению модифицирующих добавок для уменьшения хрупкости и повышения прочности водного льда, а также комбинация модификаторов и некоторых армирующих элементов дают обнадеживающие результаты. Эти исследования необходимо продолжить: апробировать результаты лабораторных исследований на полигонах, а также проработать вопросы практического применения и технологичности предлагаемых способов улучшения физико-механических свойств водного льда непосредственно на ледовых переправах.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kiani S. et al. Effects of recent temperature variability and warming on the Oulu-Hailuoto ice road season in the northern Baltic Sea // *Cold Regions Science and Technology*. 2018. Т. 151. Р. 1-8.
2. Barrette P.D., Charlebois L., Butt B. Reinforcement of ice covers for transportation: Material investigation and preliminary laboratory testing. – National Research Council Canada= Conseil national de recherches Canada, 2019.
3. Thompson Towell K.L. et al. Construction and structural analysis of an arched cellulose reinforced ice bridge for transportation infrastructure in cold regions // *Cold Reg. Sci. Technol.* Elsevier, 2022. Vol. 198. P. 103508.
4. Pronk A. et al. The 2017–18 design and construction of ice composite structures in Harbin // *Structures*. Elsevier, 2019. Vol. 18. P. 117–127.

5. Lou X., Wu Y. Influence of temperature and fiber content on direct shear properties of plain ice and fiber-reinforced ice // *Cold Reg. Sci. Technol.* Elsevier, 2022. Vol. 194. P. 103458.

6. Timco G.W., Weeks W.F. A review of the engineering properties of sea ice // *Cold Reg. Sci. Technol.* Elsevier, 2010. Vol. 60, № 2. P. 107–129.

7. Якименко О.В., Матвеев С.А., Сиротюк В.В. Исследование напряженного состояния и расчёт несущей способности армированной ледяной плиты // *Вестник СибАДИ.* 2014. 3(37). С.63–67.

8. Якименко О.В., Сиротюк В.В. Усиление ледовых переправ геосинтетическими материалами: монография. Омск: СибАДИ, 2015. 168 с. 1 эл. опт. диск (CD-ROM): ил., табл. Библиогр.: С. 160–168. Реж. доступа: <http://bek.sibadi.org/fulltext/ESD56.pdf>

9. Якименко О.В., Сиротюк В. В. Опыт армирования ледового покрова на переправах с помощью геосинтетических материалов // *Криосфера Земли.* 2016. Т. 20, № 3. С. 86–94.

10. Сыромятникова А. С. Перспективы применения ледяных композиционных материалов для строительства ледовых переправ // *Арктика: экология и экономика.* 2022. №. 2. 281 с.

11. Vasiliev N.K. et al. A review on the development of reinforced ice for use as a building material in cold regions // *Cold Regions Science and Technology.* 2015. Т. 115. С. 56-63.

12. Buznik V.M. et al. Strengthening of ice with basalt materials // *Cold Regions Science and Technology.* 2022. Т. 196. P. 103490.

13. Buznik V.M. et al. Experimental study of the impact of crystallization parameters on properties of modified and reinforced ice structures intended for sports facilities and the Arctic // *Proceedings of the 25th IIR International Congress of Refrigeration (Montreal, August 24-30, 2019).* Montreal, Quebec, Canada: IIR, 2019. P. 1110-1117.

## REFERENCES

1. Kiani S. et al. Effects of recent temperature variability and warming on the Oulu-Hailuoto ice road season in the northern Baltic Sea. *Cold Regions Science and Technology.* 2018; Т. 151: 1-8.

2. Barrette P.D., Charlebois L., Butt B. Reinforcement of ice covers for transportation: Material investigation and preliminary laboratory testing. *National Research Council Canada=Conseil national de recherches.* Canada, 2019.

3. Thompson Towell K.L. et al. Construction and structural analysis of an arched cellulose reinforced ice bridge for transportation infrastructure in cold regions. *Cold Reg. Sci. Technol.* Elsevier; 2022. Vol. 198: 103508.

4. Pronk A. et al. The 2017–18 design and construction of ice composite structures in Harbin. *Structures.* Elsevier. 2019; Vol. 18: 117–127.

5. Lou X., Wu Y. Influence of temperature and fiber content on direct shear properties of plain ice and fiber-reinforced ice. *Cold Reg. Sci. Technol.* Elsevier, 2022; Vol. 194: 103458.

6. Timco G.W., Weeks W.F. A review of the engineering properties of sea ice. *Cold Reg. Sci. Technol.* Elsevier, 2010; Vol. 60, № 2: 107–129.

7. Yakimenko O.V. Matveev S.A., Sirotyuk V.V. Issledovanie naprjazhennogo sostojanija i raschjot nesushhej sposobnosti armi-rovannoj ledjanoj plity [Investigation of the stress state and calculation of the load-bearing method-news of the reinforced ice plate]. *Vestnik SibADI.* 2014; 3(37): 63-67. (In Russ.)

8. Yakimenko O.V. Sirotyuk V.V. *Usilenie ledovyh pereprav geosinteticheskimi materialami* [Strengthening of ice crossings with geosynthetic materials]: monografija. Omsk: SibADI, 2015: 168. (in Russ.) – 1 jel. opt. disk (CD-ROM): il., tabl. – Bibliogr.: pp. 160-168. Available at: <http://bek.sibadi.org/fulltext/ESD56.pdf>

9. Yakimenko O.V. Sirotyuk V.V. Opyt armirovanija ledovogo pokrova na perepravah s pomoshh'ju geosinteticheskikh materialov [The experience of ice cover formation at crossings using geosynthetic materials]. *Kriosfera Zemli.* 2016; Т. XX, № 3: 86-94. (in Russ.)

10. Syromjatnikova A. S. Perspektivy primenenija ledjanyh kompozicionnyh materialov dlja stroitel'stva ledovyh pereprav [Prospects for the use of ice composite materials for the construction of ice crossings] *Arktika: jekologija i jekonomika.* 2022; 2: 281. (in Russ.)

11. Vasiliev N.K. et al. A review on the development of reinforced ice for use as a building material in cold regions. *Cold Regions Science and Technology.* 2015; Т. 115: 56-63.

12. Buznik V.M. et al. Strengthening of ice with basalt materials. *Cold Regions Science and Technology.* 2022; Т. 196: 103490.

13. Buznik V.M. et al. Experimental study of the impact of crystallization parameters on properties of modified and reinforced ice structures intended for sports facilities and the Arctic. *Proceedings of the 25th IIR International Congress of Refrigeration (Montreal, August 24-30, 2019).* Montreal, Quebec, Canada: IIR, 2019: 1110-1117.

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

Гончарова Г.Ю. *Общее руководство исследованиями, написание статьи.*

Сиротюк В.В. *Общее руководство исследованиями, написание статьи.*

Якименко О.В. *Выполнение исследований, редактирование статьи.*

Орлов П.В. *Постановка цели, задач, координация исследований, участие в написании статьи.*

Долгодворов Р.Е. *Руководство опытно-производственными испытаниями.*

## COAUTHORS' CONTRIBUTION

Galina YI. Goncharova. *General research management, writing an article.*

Viktor V. Sirotyuk. *General research management, writing an article.*

Olga V. Yakimenko. *Performing research, editing the article.*

Pavel V. Orlov. *Purposes and tasks statement, research coordination, participation in writing the article.*

Roman E. Dolgodvorov. *Pilot production tests management.*

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

*Гончарова Галина Юрьевна – проф., д-р техн. наук.*

*Сиротюк Виктор Владимирович – проф., д-р техн. наук, SPIN-код: 2583-7458.*

*Якименко Ольга Владимировна – доц., канд. техн. наук, SPIN-код: 9788-5596.*

*Орлов Павел Викторович – начальник научно-исследовательского отдела, канд. техн. наук, SPIN-код: 2413-6194.*

*Долгодворов Роман Евгеньевич – руководитель по разработке проектов ООО «Газпромнефть НТЦ».*

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*Galina Y. Goncharova – Professor, Dr. of Sci.*

*Viktor V. Sirotiuk –Professor, Dr. of Sci., SPIN-код: 2583-7458.*

*Olga V. Yakimenko –Associate Professor, Cand. of Sci., SPIN-код: 9788-5596.*

*Pavel V. Orlov – Head of the Research Department, Cand. of Sci., SPIN-код: 2413-6194.*

*Roman E. Dolgodvorov – development project manager, ООО Gazpromneft STC.*

Научная статья  
УДК 625.73  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-798-807>  
EDN: UHVRPO



## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦЕОЛИТА ТАТАРСКО-ШАТРАШАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

О.Н. Ильина

Казанский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Казань, Россия  
[ilinaon@inbox.r](mailto:ilinaon@inbox.r), <https://orcid.org/0009-0009-8637-7194>

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Набранная динамика дорожного строительства, активное совершенствование отечественных дорожных конструкций и технологий, модернизация производственной базы позволяет сформировать всеобъемлющий устойчивый транспортный каркас страны, что оказывает импульс всей экономике Российской Федерации. Одним из экономически и технологически выгодных решений для этого является разработка и устройство дорожных конструкций с применением цеолита – пуццолановой добавки. Анализ российских и зарубежных источников свидетельствует о том, что пуццолановые добавки улучшают физико-механические свойства дорожно-строительных материалов. Цель работы – разработка конструкций дорожных одежд с использованием цеолита Татарско-Шатрашанского месторождения. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: разработка дорожно-строительных материалов с применением цеолита, а именно для слоев оснований – местных минеральных материалов, обработанных портландцементом и цеолитом, для слоев покрытий – теплого асфальтобетона с применением цеолита; конструирование и расчет дорожных одежд с применением цеолита Татарско-Шатрашанского месторождения.

**Материалы и методы.** Экспериментальные лабораторные исследования материалов выполнены в соответствии с ГОСТ 23558, ГОСТ Р 70396, ГОСТ Р 58406.8, ГОСТ Р 58406.9, ГОСТ 9128, ГОСТ 12801. Расчет конструкций дорожных одежд осуществлен в программном комплексе Кредо Радон по допускаемому упругому прогибу, сдвигоустойчивости, сопротивлению при изгибе, статической нагрузке, морозоустойчивости, дренающему слою для климатических условий, характерных Республике Татарстан, по ПНСТ 265, ГОСТ Р 58818.

**Результаты.** В результате исследований определены физико-механические показатели образцов дорожно-строительных материалов с использованием цеолита, соответствующие нормативным требованиям. Выполнено конструирование и расчет дорожных одежд с применением цеолита в программном комплексе Кредо Радон. Предложены конструктивные поперечные профили автомобильных дорог IV и V категорий с применением цеолита Татарско-Шатрашанского месторождения. Использование разработанных материалов и дорожных конструкций в настоящее время улучшит экономику, рациональное природопользование региона и в целом даст возможность повысить качество жизни в городах и населённых пунктах.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** цеолит, конструкции дорожных одежд, теплый асфальтобетон, обработанные минеральные материалы

Статья поступила в редакцию 30.11.2023; одобрена после рецензирования 15.12.2023; принята к публикации 20.12.2023.

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: Ильина О.Н. Разработка конструкций дорожных одежд с применением цеолита Татарско-Шатрашанского месторождения // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6 (94). С. 798-807. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-798-807>

© Ильина О.Н., 2023



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-798-807>

EDN: UHVRPO

## DEVELOPMENT OF ROAD PAVEMENT STRUCTURES USING ZEOLITE OF THE TATARSKO-SHATRASHANSKOE DEPOSIT

**Olga N. Ilina**

Kazan State University of Architecture and Engineering,  
Kazan, Russian  
[ilinaon@inbox.ru](mailto:ilinaon@inbox.ru), <https://orcid.org/0009-0009-8637-7194>

### ABSTRACT

**Introduction.** The growing dynamics of road construction, the active improvement of domestic road structures and technologies, and the modernization of the production base will make it possible to form a comprehensive sustainable transport framework for the country, which will provide an impact to the entire economy of the Russian Federation. One of the economically and technologically advantageous solutions for this is the development and construction of road structures using zeolite - pozzolanic additive. The analysis of Russian and foreign sources indicates that pozzolanic additives improve the physical and mechanical properties of road building materials. The purpose of the work is to develop road pavement structures using zeolite from the Tatarsko-Shatrashanskoe deposit. To achieve this purpose, the tasks such as the development of road building materials using zeolite ( local mineral materials treated with Portland cement and zeolite are used for base layers, warm asphalt concrete with zeolite is used for coating layers), the design and calculation of road pavements using zeolite from the Tatarsko-Shatrashanskoe deposit were solved.

**Materials and methods.** The experimental laboratory studies of materials in accordance with GOST 23558, GOST R 70396, GOST R 58406.8, GOST R 58406.9, GOST 9128, GOST 12801 were carried out. The calculation of road pavement structures in the Credo Radon software package for permissible elastic deflection, shear resistance, bending resistance, static load, frost resistance, drainage layer for climatic conditions typical of the Republic of Tatarstan, according to PNST 265, GOST R 58818 was carried out.

**Results.** As a result of the research, the physical and mechanical properties of samples of road building materials using zeolite, which correspond to regulatory requirements were determined. The design and calculation of road pavements using zeolite in the Credo Radon software package was carried out. Structural transverse profiles of highways of categories IV and V using zeolite from the Tatarsko-Shatrashanskoe deposit have been proposed. The use of developed materials and road structures will currently improve the economy, rational environmental management of the region and, in general, provide an opportunity to improve the quality of life in cities and towns by successfully completing the five-year road activity plan.

**KEYWORDS:** zeolite, pavement structures, warm asphalt concrete, treated mineral materials

The article was submitted 30.11.2023; approved after reviewing 15.12.2023; accepted for publication 20.12.2023.

The author has read and approved the final manuscript.

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

For citation. Ilina O.N. Development of road pavement structures using zeolite of the Tatar-Shatrashanskoe deposit. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2023; 20 (6): 798-807. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-798-807>

© Ilina O. N., 2023



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

## ВВЕДЕНИЕ

За последние годы отечественный дорожно-транспортный комплекс сделал значительный шаг вперед: увеличивается дорожная сеть по всей стране, строятся скоростные магистрали, планомерно снижается уровень аварийности, обновляется городской пассажирский транспорт, повышается уровень обучающихся программ высшего и дополнительного образования для профильных специалистов, совершенствуется нормативная база, дорожные конструкции и технологии. Так, за период 2022–2027 годы запланирован ремонт 110 тыс. км дорог, включая 650 мостовых сооружений, строительство и реконструкция более 4 тыс. км автомобильных дорог, ещё 3 тыс. км дорог расширят до четырех полос движения, что позволит сформировать всеобъемлющий устойчивый транспортный каркас страны. А это в свою очередь даст импульс всей экономике Российской Федерации.

Одним из экономически выгодных и технологически возможных решений для достижения указанных целей планирования является разработка и устройство дорожных конструкций с применением цеолита – пуццолановой добавки. Анализ российских и зарубежных источников свидетельствует о том, что пуццолановые добавки улучшают физико-механические свойства дорожно-строительных материалов [1, 2, 3, 4, 5]. Пуццолановые добавки являются минеральными природными добавками вулканического и осадочного происхождения. Такие добавки применяют в составе комплексного вяжущего, что способствует формированию плотной структуры материала, благодаря чему повышается морозостойкость, стойкость к истиранию, а также наряду с повышением прочностных характеристик и устойчивости материала к различным видам коррозии снижается водопроницаемость, что и определяет его высокую долговечность [6, 7, 8, 9, 10]. Цеолиты – это водные каркасные алюмосиликаты щелочных и щелочноземельных металлов. Алюмосиликатный каркас обеспечивает исключительную прочность и стабильность структуры решетки. Структура минерала образуется из тетраэдров, состоящих из оксидов кремния и алюминия. Каркас заряжен отрицательно, а в полостях находят-

ся молекулы воды и положительно заряженные катионы металлов, которые могут участвовать в ионном обмене с внешней средой<sup>1</sup>. Цеолит является «внутренним агентом» по набору прочности бетона, поглощая и удерживая определенное время воду в себе, потом постепенно отдавая ее портландцементу, способствуя его полной гидратации. Это безопасный, эффективный, недорогой и нетоксичный материал.

Одно из крупнейших месторождений цеолитов Российской Федерации – Татарско-Шатрашанское – находится в Республике Татарстан, запасы цеолитсодержащих пород которого оценены по различным категориям в количестве более 100 млн т на площади 450 га. При исследовании месторождения цеолитсодержащих пород определено, что породы представляют собой новый тип цеолитового сырья, принципиально отличный от ранее изученных. Цеолитсодержащие породы Татарско-Шатрашанского месторождения – сложная многокомпонентная система переменного состава. Основные породообразующие компоненты этой системы – клиноптилолит, опал-кристобалит-тридимитовая фаза (ОКТ-фаза), глинистые минералы (монтмориллонит), кальцит и кварц – составляют 90–95% от объема породы<sup>2</sup>. ОКТ-фаза и монтмориллонит наряду с цеолитами являются природными сорбентами и характеризуются физико-химическими свойствами (адсорбционными, катионообменными), которые существенно дополняют и расширяют спектр физико-химических показателей породы и в конечном итоге определяют технологические свойства, качество материалов. Цель работы – разработка конструкций дорожных одежд с применением цеолита Татарско-Шатрашанского месторождения. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: разработка дорожно-строительных материалов, а именно для слоев оснований – минеральных материалов, обработанных портландцементом и пуццолановой добавкой цеолит, для слоев покрытий – теплового асфальтобетона с цеолитом; проектирование и расчет дорожных одежд с применением цеолита Татарско-Шатрашанского месторождения.

<sup>1</sup> Цеолитсодержащие породы Татарстана и их применение. Под ред. А.В. Якимова, А.И. Булова. Казань: изд-во «Фен» АН РТ, 2001, 176 с.

<sup>2</sup> Цеолитсодержащие породы Татарстана и их применение. Там же.

Таблица 1

**Химический состав цеолита**  
Источник: ТУ 2163-001-27860096.

Table 1

**Chemical composition of zeolite**  
Source: TU 2163-001-278600961.

Наименование	Содержание, % масс
$SiO_2$	не менее 50
$SiO_2$ аморфный	не менее 21
$Al_2O_3$	не более 7
$Fe_2O_3$	не более 3
$CaO$	не более 17

Таблица 2

**Основные физико-механические свойства цеолита**  
Источник: ТУ 2163-001-27860096.

Table 2

**Basic physical and mechanical properties of zeolite**  
Source: TU 2163-001-278600961.

Наименование показателей	Значение
Содержание глинистых и пылевидных веществ, % не более	2,5
Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	1,5–2,4
Механическая прочность, МПа	4,0–7,5
Пористость, %	42–60

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные лабораторные исследования минеральных материалов, обработанных портландцементом и цеолитом, выполнены в соответствии с ГОСТ 23558<sup>3</sup>. При проведении работ исследованы свойства и составы данных материалов с применением цеолита, а также определены методики исследований. В качестве минеральной части использован местный щебень М400 фракции 0–20 мм ГОСТ 8267, портландцемент ЦЕМ II 42,5 ГОСТ 31108 в количестве 4–5% от массы щебня, цеолит ТУ 2163-001-27860096<sup>4</sup> фракцией 0–1,25 мм в количестве 5–10% от массы портландцемента, вода техническая ГОСТ 23732 8–10% от массы щебня. Химический состав и основные физико-механические

свойства цеолита представлены в таблицах 1, 2. Изготовление, хранение и испытание образцов обработанных материалов с применением цеолита проводили в соответствии с ГОСТ 10180 [11].

Экспериментальные лабораторные исследования теплого асфальтобетона с применением цеолита Татарско-Шатрашанского месторождения проведены в соответствии с ГОСТ Р 70396–2022<sup>5</sup> (ПНСТ 358–2019<sup>6</sup>), ГОСТ Р 58406.8–2019, ГОСТ Р 58406.9–2019, ГОСТ 9128–2013, ГОСТ 12801–98. Использован природный цеолит фракции 0–0,8мм, количество цеолита подобрано опытным путем с учетом анализа предыдущих исследований [5, 12, 13, 14, 15, 16]. Состав асфальтобетонной смеси по массе составил: щебень М1000 – 42,9%; отсев дробления щебня

<sup>3</sup> ГОСТ 23558–94 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства». М.: Стандартинформ, 2005. 12 с.

<sup>4</sup> ТУ 2163-001–27860096 «Технические условия. Цеолит активированный». Казань. Дата введения: 05 октября 2016.

<sup>5</sup> ГОСТ Р 70396–2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси теплые асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Общие технические условия». М.: Российский институт Стандартизации, 2022.

<sup>6</sup> ПНСТ 358–2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси теплые асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Технические условия». М.: Стандартинформ, 2019.

M1000 – 32,9%; песок природный – 6,3%; минеральный порошок МП – 7,6%; цеолит – 5,5%; битум БНД 70/100 – 4,8% [17]. Расчет конструкций дорожных одежд осуществлен в программном комплексе Кредо Радон по допускаемому упругому прогибу, сдвигоустойчивости, сопротивлению при изгибе, статической нагрузке, морозоустойчивости, дренирующему слою для климатических условий, характерных Республике Татарстан, по ПНСТ 265, ГОСТ Р 58818 (таблица 3). Расчетные модули упругости конструкционных материалов дорожных одежд: песок мелкий 100 МПа, щебень М400 фракции 0–40 мм, обработанный портландцементом 42,5Н 4% и цеолитом ОАО «Цеолиты Поволжья» 5% от массы портландцемента 600 МПа, асфальтобетон крупнозернистый пористый II марки 2000 МПа, теплый асфальтобетон А16В<sub>п</sub> 3000 МПа.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

В результате испытания образцов минеральных материалов, обработанных портландцементом и цеолитом, всех заданных составов были получены показатели прочности на сжатие в возрасте 7 и 28 сут в сухом и водонасыщенном состояниях, плотности и водостойкости; определено их соответствие нормативным требованиям ГОСТ 23558. Введение цеолита в количестве 5–10% позволяет улучшить физико-механические показатели обработанного материала. Так, прочность на сжатие увеличивается в 1,08–1,26 раза, водостойкость повышается с 0,90–0,91 до 0,93–0,95, марка по морозостойкости – с F5 до F15 и F25. Опыт-

но-производственное внедрение результатов исследований осуществлено при устройстве основания толщиной 0,20 м на участке автомобильной дороги – съезд к н.п. Кызыл Яшьлерв Пестречинском районе Республики Татарстан. Производство работ проводилось методом «смешения на дороге» с ведущим механизмом ресайклером CAT RM 500 АО «Татавтодор». При определении способа производства работ определяющим фактором явилось наличие у подрядчика смесительного оборудования в виде ресайклера CAT RM 500 и возможности его доставки. Для осуществления опытно-промышленной проверки результатов исследования определен следующий состав: щебень М 400 фракции 0–40 мм, портландцемент ЦЕМ II 42,5 в количестве 4% от массы щебня, цеолит фракцией 0–1,25мм в количестве 5% от массы портландцемента, вода техническая 8% от массы щебня. Эксплуатация и мониторинг экспериментального участка опытного строительства осуществляется с последующим испытанием образцов материала в соответствии с нормативными требованиями (рисунки 1,2). Получены результаты физико-механических показателей материала, все показатели соответствуют требованиям ГОСТ 23558. При сравнении сметной стоимости традиционного основания автомобильных дорог из привозного щебня М800 и основания из щебня М 400, обработанного комплексным минеральным вяжущим из портландцемента и пуццолановой добавки цеолита, определено, что экономия благодаря применению разработанного материала на 1 км составит 1 819 451 руб. [11].

Таблица 3  
Расчетные характеристики дорожных одежд нежесткого типа  
Источник: ПНСТ 265, ГОСТ Р 58818.

Table 3  
Design characteristics of non-rigid road pavements  
Source: PNST 265, GOST R 58818.

Категория дороги	Тип дорожной одежды	Минимальный требуемый модуль упругости, МПа	Коеф. надежности	Требуемый коэффициент	
				прочности	прочности по критерию сдвигоустойчивости и растяжению при изгибе
IV, IVA-р, IV Б-р	Капитальный	200	0,8–0,9	1,02–1,10	0,87–0,94
IVA-п	Облегченный	150	0,8–0,85	1,02–1,06	0,87–0,90
IVБ-п, V		100	0,77–0,82	0,98–1,02	0,80–0,87
V, VA					



Рисунок 1 – Отбор кернов дорожного основания из щебня М 400, обработанного портландцементом и цеолитом  
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Selection of cores of road base from М 400 crushed stone, processed with portland cement and zeolite  
Source: compiled by the author.



Рисунок 2 – Керны и кубы разработанного материала, подготовленные для испытания  
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Cores and cubes of the developed material, prepared for testing  
Source: compiled by the author.

При приготовлении теплых асфальтобетонных смесей минеральные материалы и битум разогревали до 140 °С. Цеолит и минеральный порошок добавляли без разогрева одновременно с введением битума. По истечении времени после смешения можно было наблюдать действие добавки – активное выделение воды из структуры цеолита и вспенивание битума, что способствует повышению обволакиваемости минеральной части битумным вяжущим. Подобран состав теплой асфальтобетонной

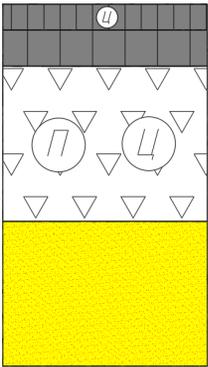
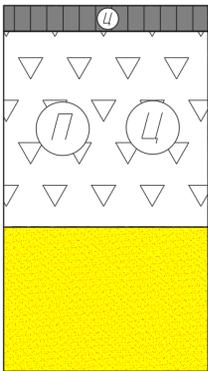
смеси с применением цеолита и определено соответствие исследуемых материалов показателям ГОСТ Р 70396 [17]. Основными преимуществами теплой асфальтобетонной смеси с использованием цеолита перед горячей асфальтобетонной смесью являются: приготовление смеси при пониженных температурах технологических процессов и, соответственно, ресурсосбережение природного газа на 16,8%; повышение ресурса асфальтосмесительных установок при снижении температур и умень-

шение амортизационных расходов; снижение расходов горючих материалов сокращает количество выбросов вредных веществ в окружающую среду; в целом снижение стоимости строительства автомобильных дорог [18,19]. Выполнено сравнение стоимостей исходных материалов для теплой асфальтобетонной смеси с применением цеолита и горячей ас-

фальтбетонной смеси тип Б марки II, исходя из экономии на природном газе и исходных материалах рассчитаны их стоимости материала как на тонну, так и на километр покрытия IV и V категорий, что в целом определяет экономию денежных средств на 1 км для автомобильной дороги IV категории –369 069 руб., V категории 237 258 руб. [17].

Таблица 4  
Варианты конструкций дорожных одежд с применением цеолита  
Источник: составлено автором

Table 4  
Options for road pavement designs using zeolite  
Source: compiled by the author.

Наименование слоев и материалов	Схема конструкции дорожной одежды	По результатам расчетов толщины слоев, см		
		IV категории*	IV категории**	V категории***
1. Теплый асфальтобетон А16В <sub>н</sub>		5	4	4
2. Асфальтобетон крупнозернистый пористый II марки		7	7	-
3. Щебень М400 фракции 0–40 мм, обработанный портландцементом 42,5Н 4% и цеолитом 5% (от массы портландцемента)		20	20	26
4. Песок мелкий		28	27	27

\* Автомобильные дороги с капитальным типом дорожной одежды, требуемый модуль упругости для IV категории – 200 МПа.

\*\* Автомобильные дороги с облегченным типом дорожной одежды, требуемый модуль упругости для IV категории – 150 МПа.

\*\*\* Автомобильные дороги с облегченным типом дорожной одежды, требуемый модуль упругости для V категории – 100 МПа.

Варианты конструкций дорожных одежд с применением цеолита, рассчитанные в программном комплексе Кредо Радон, приведены в таблице 4. Конструктивные поперечные профили автомобильных дорог IV и V категорий с применением цеолита Татарско-Шатрашанского месторождения Республики Татарстан представлены на рисунке 3. Конструкции автомобильных дорог должны быть не только прочными и надежными в эксплуатации, но и экологичными и экономичными, особенно по расходу привозных дорогостоящих материалов и энергоресурсов. В связи с актуальностью задачи реализации федеральных и региональных программ по расширению сети дорог с низкой интенсивностью движения и разработке для них типовых альбомов дорожных

конструкций предложенные конструкции также могут быть применены на автомобильных дорогах с низкой интенсивностью движения: подъезды к животноводческим комплексам, фермерским хозяйствам, сельскохозяйственным угодьям, детским оздоровительным лагерям; распределительные дороги, обеспечивающие связь между подъездами и дорогами более высоких категорий. Технология строительства автомобильных дорог с применением цеолита осуществляется при комплексной механизации всего заданного процесса производства работ с использованием современных высокопроизводительных машин и оборудования (ресайклеры, навесные дорожные фрезы, смесительные установки).

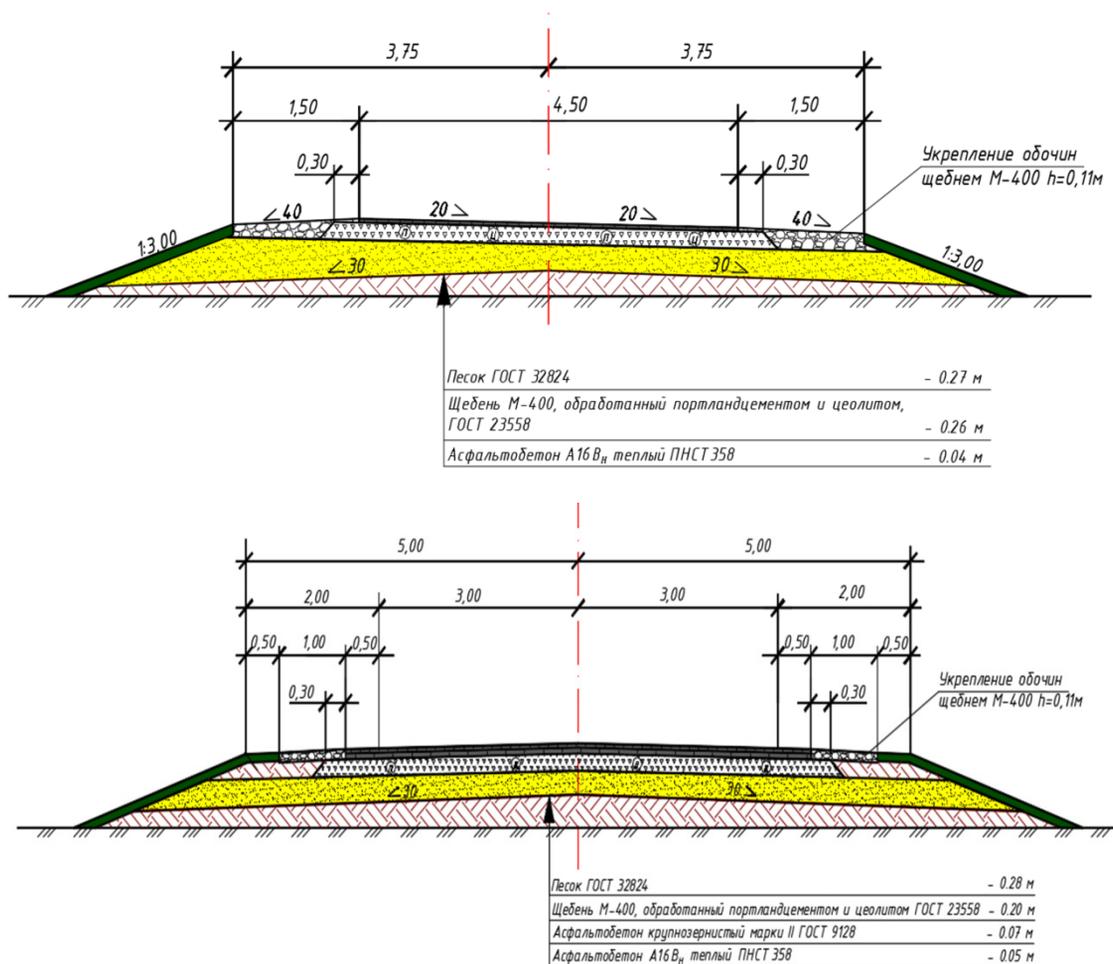


Рисунок 3 – Конструктивные поперечные профили автомобильных дорог с применением цеолита Татарско-Шатрашанского месторождения Республики Татарстан  
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Structural cross-sections of roads using zeolite from the Tatarsko-Shatrashanskoe deposit of the Republic of Tatarstan  
Source: compiled by the author.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны конструкции дорожных одежд автомобильных дорог IV и V категорий с использованием цеолита Татарско-Шатрашанского месторождения Республики Татарстан: в слоях оснований местный обработанный щебень, в слоях покрытий теплый асфальтобетон. Установлено, что введение пуццолановой добавки цеолит позволяет повысить показатели плотности, прочности, водостойкости и морозостойкости материалов. Конструирование и расчет дорожных одежд с применением цеолита выполнен в программном комплексе Кредо Радон по допускаемому упругому прогибу, сдвигоустойчивости, сопротивлению при изгибе, статической нагрузке, морозоустойчивости, дренажирующему слою для климатических условий, характерных Республике Татарстан, по ПНСТ 265, ГОСТ Р 58818. Применение разработанных материалов и дорожных конструкций в настоящее время улучшит экономику, рациональное природопользование региона и в целом даст возможность повысить качество жизни в городах и населённых пунктах. Следующий этап работы направлен на дальнейшее проведение промышленной апробации результатов исследований и мониторинг экспериментальных участков автомобильных дорог.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Морозова Н.Н., Кайс Х.А. Свойства природного цеолита для получения высокопрочного мелкозернистого бетона // Строительные материалы. 2017. № 6. С. 63–68.
2. Николаева Л.А., Копылов В.Е., Буренина О.Н., Попов С.Н., Портягина В.В. Использование модифицированных асфальтобетонов для развития транспортной инфраструктуры горнодобывающих предприятий Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 9. С. 398–404.
3. Mechanical Evaluation of Bottom Ash from Municipal Solid Waste Incineration Used in Roadbase / Q. Tang, F. Gu, H. Chen [etal.] // *Advances in Civil Engineering*. Vol. 2018. URL: <https://doi.org/10.1155/2018/5694908>
4. Marinkovic M., Milovic T., Matic B. Zeolite as additive in warm mix asphalt. V International conference Contemporary achievements in civil engineering 21. Subotica, Serbia. 2017. P. 483-490.
5. Береговая Н.Г., Герасименко В.В., Молчанов С.А., Морозов М.М. Перспективы вторичного использования отработанного цеолита типа NAX Оренбургского газохимического комплекса // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 10. С. 334–336.
6. Пустовгар А.П. Эффективность применения активированных диатомитов в сухих строительных смесях // Строительные материалы. 2006. № 10. С. 62–64.
7. Сатыбалдиев А.К., Ивчин Д.С. Влияние минеральных добавок на свойства портландцемента // Молодой ученый. 2020. № 4 (294). С. 11–14.
8. Морозова Н.Н., Гуляков Е.Г. Свойства бетона на цеолитсодержащем вяжущем // Известия КГАСУ, 2023. №2 (64). С. 27–39. DOI: 10.52409/20731523\_2023\_2\_27, EDN: LCQWVC
9. Коровкин М.О., Короткова А.А., Ерошкина Н.А. Эффективность комплексной минеральной добавки в мелкозернистом самоуплотняющемся бетоне // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 3 (48). С. 114–122.
10. Коваль И.В., Калиновская Н.Н., Аль-Муса-ви К.С. Использование минеральных добавок в технологии монолитного бетона и производстве сборного железобетона // Технологии бетонов. 2020. № 11–12 (172–173). С. 25–31.
11. Ильина О.Н., Силкин В.В. Об устройстве дорожных оснований с применением цеолита // Транспортное строительство. 2022. № 4. С. 10–14.
12. Sol-Sánchez M., Moreno-Navarro F., Rubio-Gámez M. C., Pérez-Mena V., Cabanillas P., “Reuse of Zeolite By-Products Derived from Petroleum Refining for Sustainable Roads”, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2019, Article ID 4256989, 10 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4256989>
13. Jan Mikolaj, Frantisek Schlosser, Lubos Remek, Martin Pitoňák, Juraj Šrámek, “Properties of Asphalt Mixtures Using Reclaimed Asphalt Containing Polymer-Modified Binder and Technico economical Considerations of Their Use”, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2019, Article ID 2030763, 12 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2030763>
14. Zhuolin Li, Junda Ren, Jianping Zhu, Wei Li, Xingsheng Fu, Liying Yang, “Study on the Construction Performance of Zeolite Asphalt Mixture Based on Macro-Micro Scale”, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, Article ID 4137321, 21 pages, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/4137321>
15. Zhanping You, Meor O. Hamzah, Hainian Wang, Aboelkasim Diab, Qingli Dai, “Advanced Pavement Materials for Sustainable Transportation Infrastructure”, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2018, Article ID 3175651, 1 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3175651>
16. Haibin Deng, Deyi Deng, Yinfei Du, Xinmin Lu, “Using Lightweight Materials to Enhance Thermal Resistance of Asphalt Mixture for Cooling Asphalt Pavement”, *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, Article ID 5216827, 10 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5216827>
17. Ильина О.Н., Ильин И.Б., Хусаенов Б.К., Силкин В.В. Теплый асфальтобетон на основе цеолита // Транспортное строительство. 2022. № 2. 2022. С. 21–23.
18. Радовский Б.С. Технология нового теплого асфальтобетона в США // Дорожная техника. 2008. № 8. С. 24–28.
19. Алшахван Аладдин, Калгин Ю.И. Обзор технологий приготовления тёплых асфальтобетонных смесей // Молодой ученый. 2019. № 32 (270). С. 102–107. URL: <https://moluch.ru/archive/270/61981>

## REFERENCES

1. Morozova N.N., Kajs H. A. Svojstva prirodno-geolozicheskogo ceolita dlja poluchenija vysokoprochnogo melkozernistogo betona [Properties of natural zeolite for producing high-strength fine-grained concrete]. *Stroitel'nye materialy*. 2017; 6: 63–68. (In Russ.)
2. Nikolaeva L.A., Kopylov V.E., Burenina O.N., Popov S.N., Portjagina V.V. Ispol'zovanie modifitsirovannykh asfal'tobetonov dlja razvitiya transportnoj infrastruktury gornodobyvajushchih predpriyatij Jakutii [The use of modified asphalt concrete for the development of transport infrastructure of mining enterprises in Yakutia]. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'*. 2014; 9: 398–404. (In Russ.)
3. Mechanical Evaluation of Bottom Ash from Municipal Solid Waste Incineration Used in Road-base / Q. Tang, F. Gu, H. Chen [et al.]. *Advances in Civil Engineering*. 2018. URL: <https://doi.org/10.1155/2018/5694908>
4. Marinkovic M., Milovic T., Matic B. Zeolite as additive in warm mix asphalt. V International conference Contemporary achievements in civil engineering 21. Subotica, Serbia. 2017. P. 483-490.
5. Beregovaja N.G., Gerasimenko V.V., Molchanov S.A., Morozov M.M. Perspektivy vtorichnogo ispol'zovanija otrabotannogo ceolita tipa NAX Orenburgskogo gazohimicheskogo kompleksa [Prospects for the recycling of spent NAX type zeolite from the Orenburg gas chemical complex]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2015; 10: 334-336. (In Russ.)
6. Pustovgar A.P. Jeftektivnost' primenenija aktivirovannykh diatomitov v suhih stroitel'nykh smesjah [Efficiency of using activated diatomites in dry building mixtures]. *Stroitel'nye materialy*. 2006;10: 62-64. (In Russ.)
7. Satybaldiev A.K., Ivchin D.S. Vlijanie mineral'nykh dobavok na svojstva portlandcementsa [The influence of mineral additives on the properties of Portland cement]. *Molodoj uchenyj*. 2020; 4 (294):11-14. (In Russ.)
8. Morozova N.N., Gulyakov E.G. Properties of concrete based on zeolitecontaining binder. *News KSUAE*. 2023; 2 (64): 27-39. (In Russ.) DOI: 10.52409/20731523\_2023\_2\_27, EDN: LCQWVC
9. Korovkin M.O., Korotkova A.A., Eroshkina N.A. Jeftektivnost' kompleksnoj mineral'noj dobavki v melkozernistom samouplotnjajushchemsja betone [Efficiency of a complex mineral additive in fine-grained self-compacting concrete]. *Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo*. 2021;3 (48): 114-122. (In Russ.)
10. Koval' I.V., Kalinovskaja N.N., Al'-Musavi K.S. Ispol'zovanie mineral'nykh dobavok v tehnologii monolitnogo betona i proizvodstve sbornogo zhelezobetona [The use of mineral additives in the technology of monolithic concrete and the production of prefabricated reinforced concrete]. *Tehnologii betonov*. 2020; 11-12 (172-173): 25-31. (In Russ.)
11. Il'ina O.N., Silkin V.V. Ob ustrojstve dorozhnykh osnovanij s primeneniem ceolita [About the construction of road bases using zeolite]. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2022; 4: 10-14. (In Russ.)
12. Sol-Sánchez M., Moreno-Navarro F., Rubio-Gámez M. C., Pérez-Mena V., Cabanillas P., «Reuse of Zeolite By-Products Derived from Petroleum Refining for Sustainable Roads», *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2019, Article ID 4256989, 10 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4256989>
13. Jan Mikolaj, Frantisek Schlosser, Lubos Remek, Martin Pitoňák, Juraj Šrámek, «Properties of Asphalt Mixtures Using Reclaimed Asphalt Containing Polymer-Modified Binder and Technoeconomical Considerations of Their Use», *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2019, Article ID 2030763, 12 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2030763>
14. Zhuolin Li, Junda Ren, Jianping Zhu, Wei Li, Xingsheng Fu, Liying Yang, «Study on the Construction Performance of Zeolite Asphalt Mixture Based on Macro-Micro Scale», *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, Article ID 4137321, 21 pages, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/4137321>
15. Zhanping You, Meor O. Hamzah, Hainian Wang, Aboelkasim Diab, Qingli Dai, «Advanced Pavement Materials for Sustainable Transportation Infrastructure», *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2018, Article ID 3175651, 1 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3175651>
16. Haibin Deng, Deyi Deng, Yinfei Du, Xinmin Lu, «Using Lightweight Materials to Enhance Thermal Resistance of Asphalt Mixture for Cooling Asphalt Pavement», *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, Article ID 5216827, 10 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5216827>
17. Il'ina O.N., Il'in I.B., Husaenov B.K., Silkin V.V. Teplyj asfal'tobeton na osnove ceolita [Warm asphalt concrete based on zeolite]. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2022; 2, 2022: 21-23. (In Russ.)
18. Radovskij B.S. Tehnologija novogo teplogo asfal'tobetona v SShA [Technology of new warm asphalt concrete in the USA. Road equipment]. *Dorozhnaja tehnika*. 2008; 8: 24-28. (In Russ.)
19. Alshahvan, Aladdin, Kalgin Ju. I. Obzor tehnologij prigotovlenija tjoplykh asfal'tobetonnykh smesej [Review of technologies for preparing warm asphalt concrete mixtures] *Molodoj uchenyj*. 2019; 32 (270): 102-107. URL: <https://moluch.ru/archive/270/61981>

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ильина Ольга Николаевна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Автомобильные дороги, мосты и тоннели», SPIN-код: 5666-0966.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Olga N. Ilina – Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor of the Roads, Bridges and Tunnels Department, SPIN code: 5666-0966.

Научная статья  
УДК 624.072.14  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-808-824>  
EDN XVORPP



## ВИБРАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ СТАЛЬНЫХ БАЛОК, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ 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.** Выполнен анализ колебаний строительных конструкций и деталей механизмов. Сформулирована необходимость исследования колебательных процессов и вибрационной надежности стальных балок, предварительно напряженных вытяжкой стенки. Предмет исследования – стальные строительные конструкции. Объектом исследования является стальная биметаллическая балка, предварительно напряженная без затяжек.

**Материалы и методы.** В основу научного поиска приняты основы строительной механики зданий и сооружений – принцип независимости действия сил, дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня, энергетический метод, а также методы определения напряженно-деформированного состояния предварительно напряженных стальных стержней.

**Результаты.** Выполнен сопоставительный анализ вибрационной надежности балок без предварительного напряжения и предварительно напряженных конструкций равной несущей способности. Интегрированием дифференциального уравнения изогнутой оси разрезного стержня определены повороты сечений опорных узлов балок, нагруженных усилиями предварительного напряжения и внешними воздействиями. На основании принципа независимости действия сил определены опорные моменты в жестких опорных узлах конструкций. Разработанные методы напряжения состояния предварительно напряженных стержней положены в основу определения нормальных напряжений в сечениях исследуемых балок. Результирующие напряжения найдены путем алгебраического сложения предварительных напряжений и вызванных внешней нагрузкой. Динамические параметры несущей способности балок определены на основе работ И. М. Рабиновича и В. А. Киселева. Установлена круговая частота колебаний традиционных и предварительно напряженных балок, сформулированы аналитические выражения для определения угловой скорости предварительно напряженных изгибаемых элементов, определены динамические прогибы и коэффициенты конструкций. Установлено, что круговая частота предварительно напряженных балок, шарнирно закрепленных в опорных узлах, по сравнению с круговой частотой обычных балок снижается в 1,4 раза и в 5,6 – в балках с жесткими опорами. Угловая скорость снижается, соответственно, в 1,4 (шарнирные опоры) и 6,8 (жесткие опоры). Прогибы преднапряженных балок снижаются в 1,87 и 11,9 раз. Имеет место значительное снижение напряженного состояния предварительно напряженных конструкций.

**Выводы.** Шарнирно закрепленная традиционная балка, нагруженная внешней и вибрационной нагрузками, в предельном состоянии находится в зоне текучести материала и не удовлетворяет требованиям первого и второго предельного состояния. Такие конструкции обладают самой низкой вибрационной надежностью. Более надежны предварительно напряженные конструкции. При жестких опорных узлах моменты усилий предварительного напряжения совпадают с опорными моментами и создают выгиб, вектор которого направлен в сторону, противоположную вектору прогиба от внешней нагрузки. В предельном состоянии суммарные прогибы оказываются меньше прогибов внешних нагрузок. Напряжения в конструкции снижаются. Поскольку моменты нагрузок и прогибы балок являются исходными пара-

© Кравчук Е. В., Белуцкий И. Ю., Кравчук В. А., 2023



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

метрами для решения задач динамической прочности, можно утверждать о том, что предварительно напряженные балки с жесткими опорными узлами обладают повышенной вибрационной надежностью.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** предварительное напряжение, колебание, круговая частота, угловая скорость, динамические коэффициенты

Статья поступила в редакцию 01.11.2023; одобрена после рецензирования 27.11.2023; принята к публикации 20.12.2023.

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. Вибрационная надежность стальных балок, предварительно напряженных вытяжкой стенки // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6 (94). С. 808-824. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-808-824>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-808-824>

EDN: XVORPP

## VIBRATION RELIABILITY OF STEEL BEAMS PRESTRESSED BY 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>PacificStateUniversity,  
Khabarovsk, Russia

004938@pnu.edu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5419-136>

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.** Vibrations of building structures and mechanism parts were analyzed. The need to investigate the oscillation processes and vibration reliability of steel beams prestressed by web drawing was formulated. The subject of study is structural steel. The object of study is bimetallic steel beam prestressed without rods.

**Materials and methods.** The scientific inquiry is based on the basics of structural mechanics of buildings and structures: superposition principle, differential equation of deflection curve of a bar, energy method, and methods of determination of stress-strain state of prestressed steel bars.

**Results.** A comparative analysis of vibration reliability of non-prestressed beams and prestressed structures of equal bearing capacity was performed. Rotations of the beam supporting nodes loaded by prestressing forces and external impacts were determined by integration of differential equation of deflection curve of a split bar. The support moments in rigid supporting nodes of structures were determined on the basis of superposition principle. The developed methods of stressed condition of prestressed bars are the basis for determination of normal stresses in the sections of beams under study. The resultant stresses were obtained by algebraic addition of prestresses and stresses from external loads. Dynamic parameters of bearing capacity of beams were determined on the basis of works by I.M. Rabinovich and V.A. Kiselev. The oscillation circular frequency of conventional and prestressed beams was established, analytical expressions for determination of angular velocity of prestressed bending elements were formulated, and the dynamic deflections and factors of structures were determined. It is found that the circular frequency of prestressed beams hinged in supporting nodes compared to the circular frequency of conventional beams decreases by a factor of 1.4 and by a factor of 5.6 in beams with rigid supports. Angular velocity decreases by a factor of 1.4 (hinge supports) and 6.8 (rigid supports), respectively. The deflections of prestressed beams are reduced by a factor of 1,87: 11,9. There is a significant reduction in the stressed condition of prestressed structures.

© Kravchuk E. V., Belutskii I. Yu., Kravchuk V. A., 2023



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

**Conclusions.** A hinged traditional beam under external and vibration loads in limit state is in the material yield zone and does not meet the first and second limit state conditions. These structures have the lowest vibration reliability. Prestressed structures are more reliable. With rigid supporting nodes, the moments of prestressing forces coincide with the supporting moments and produce hogging with the vector opposite to the external load deflection vector. In the limit state, total deflections are less than the external load deflections. Stresses in the structure decrease. Since load moments and beam deflections are initial parameters for dealing with dynamic strength tasks, we may state that prestressed beams with rigid supporting nodes have an increased vibration reliability.

**KEYWORDS:** prestressing, alternating voltage, angular frequency, angular velocity, exciting coefficients

The article was submitted 01.11.2023; approved after reviewing 27.11.2023; accepted for publication 20.12.2023.

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. Kravchuk Evgeni. V., Belutsky Igor Yu., Kravchuk Valeri. A. Vibration reliability of steel beams prestressed by drawing. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6>

## ВВЕДЕНИЕ

Без сомнения все строительные конструкции зданий и сооружений находятся под воздействием вибрационных нагрузок различной интенсивности. Пульсационная ветровая нагрузка или воздействие движущегося транспорта в мостовых конструкциях создают в них вибрации, способные достичь предела вибрационных нагрузок, при которых материал конструкций будет находиться в состоянии предела выносливости. За предел выносливости принимается вибрационная прочность металла. Все это возможно при условии, когда материал конструкций будет находиться в состоянии упругопластического деформирования. При упругой работе стали предел выносливости не наступит.

Все исследования, касающиеся определения частоты колебаний, круговой частоты, угловой скорости или динамических прогибов направлены на установление предельных параметров динамической прочности конструкций.

Цель работы – исследование динамических параметров вибрационной надежности стальных балок, предварительно напряженных вытяжкой стенки при различных закреплениях их опорных узлов.

Российские и зарубежные ученые ведут интенсивную работу по изучению проблем колебательных процессов в строительных конструкциях или механизмах.

Большую работу в этом направлении выполняют ученые Санкт-Петербургского архитектурно-строительного университета. Итерационный метод определения спектра частот свободных колебаний прямоугольных панелей

предложен в работе [1]. Метод вычисления частот собственных колебаний упругих стержней прямым интегрированием дифференциального уравнения изгиба изложен в работе [2]. Задача поиска свободных изгибных колебаний тонкостенного подземного газопровода с учетом влияния грунта решена в работе [3]. Расчет сооружений с динамическим гасителем колебаний по акселерограммам проектных землетрясений предложен в работе [4]. Исследование спектра свободных колебаний тонких упругих оболочек рассмотрено в статье [5]. Определение частот собственных колебаний складчатых пологих оболочек выполнено в работе [6]. Влияние внутреннего рабочего давления на частоты свободных колебаний криволинейных участков полиэтиленовых трубопроводов описано в [7].

В Московском государственном строительном университете (МГСУ) предложены общие рекомендации по проектированию и эксплуатации зданий и сооружений, подвергающихся динамическим воздействиям [8]. Частоты собственных поперечных колебаний и максимальные прогибы системы перекрестных стальных ферм изложены в работе [9]. Нестационарные случайные процессы в плоской стальной раме при землетрясениях даны в работе [10]. Методы моделирования колебаний упругих неоднородных тел описаны в статье [11].

Журнал «Вестник СибАДИ» (г. Омск) объединяет разработку проблем, связанных с колебательными процессам в механизмах и строительных конструкциях. Колебание системы вибротрибунов описаны в работе [12]. Уменьшение колебаний груза, перемещаемого грузоподъемными кранами, изложено в работе [13].

Анализ влияния координат точек крепления уравнивающего каната на колебательность груза на стреле крана-трубоукладчика выполнен в работе [14].

Исследование параметров динамической прочности балок, предварительно напряженных вытяжкой стенки, выполняется в Тихоокеанском государственном университете (г. Хабаровск, Россия). Влияние предварительного напряжения на изменение круговой частоты, частоты периода и количества колебаний в минуту при свободном колебании с учетом сил сопротивления изучено в работе [15]. Круговая частота, период колебаний, количество колебаний в минуту в предварительно напряженных балках, жестко закрепленных в опорных узлах, определены в статье [16]. Параметры динамической несущей способности исследуемых балок при случайных воздействиях сформулированы в работе [17].

Сопредельные с Россией зарубежные страны, расположенные в зоне интенсивных сейсмических воздействий, выполняют также большой объем исследовательских работ по изучению динамической и сейсмической надежности строительных конструкций. Хрупкость материала стальных мостов описана в статье [18]. Напряженное состояние стенки стальной балки в зоне касательных напряжений изложено в работах [19, 20]. Фактическая работа подкрепленных пластин сформулирована в исследовании [21]. Частота стенок стальных балок, шарнирно закрепленных в опорных узлах, описана в работе [22]. Метод динамической жесткости при анализе свободных и вынужденных колебаний представлен в публикации [23].

При всем многообразии работ по изучению динамических параметров несущей способности строительных конструкций зданий и сооружений пока нет работ, изучающих вибрационную надежность стальных балок, предварительно напряженных вытяжкой стенки. Настоящая статья описывает динамику колебательного процесса балок, эксплуатирующийся в составе каркаса высотного здания, при воздействии на них вибрационных сосредоточенных и изгибных внешних нагрузок.

## МЕТОДЫ И МОДЕЛИ

При проектировании и эксплуатации высотных зданий появляется необходимость устройства технических этажей, в пределах которых устанавливается вентиляционное оборудование, коммуникации радио и телевидения. Подобная ситуация возникает в промышлен-

ных зданиях, на перекрытиях которых размещается система вентиляции, водоснабжения и канализации с двигателями, создающими вибрационные нагрузки в несущих конструкциях сооружения.

Настоящая работа посвящена расчету предварительно напряженной балки перекрытия здания рамного типа с жестким сопряжением ее в опорных узлах.

Для решения задачи балку с жесткими узлами расчленим на составляющие балки с шарнирными сопряжениями в узлах, заменив опорный момент  $M_{op}$  узловым моментом в шарнирном сопряжении. Расчетная схема балки представлена на рисунке 1.

Определение опорного момента  $M_{op}$  базируется на предположении о том, что в жестком узле поворот сечения равен нулю.

Используя дифференциальное уравнение изогнутой оси балки

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{EI_x}, \quad (1)$$

известными из курса сопротивления материалов приемами, найдем повороты опорных сечений балки от каждого вида нагружения (рисунок 2).

Поворот опорного сечения балки от момента усилий предварительного напряжения  $M_0$ ,

$$\frac{dy}{dx} = \theta_{M_0} = -\frac{M_0 l}{2EI_x}, \quad (2)$$

от опорного момента  $M_{op}$  –

$$\theta_M = -\frac{M_{op} l}{2EI_x}, \quad (3)$$

от равномерно распределенной нагрузки  $q$  –

$$\theta_q = \frac{ql^3}{24EI_x}, \quad (4)$$

от вибрационного момента  $M_g$  –

$$\theta_g = -\frac{M_g l}{24EI_x}, \quad (5)$$

от вибрационного усилия  $P_g$  –

$$\theta_{g1} = \frac{P_g l^2}{16EI_x}. \quad (6)$$

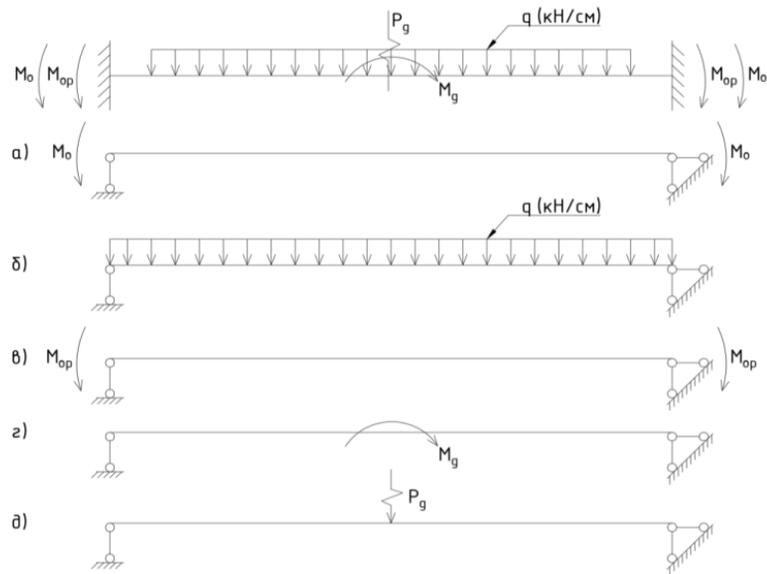


Рисунок 1 – Расчетная схема предварительно напряженной балки:  
 а – схема нагружения балки моментом усилий предварительного напряжения;  
 б – нагружение балки равномерно распределенной нагрузкой;  
 в – нагружение балки опорным моментом; г – нагружение балки вибрационным моментом;  
 д – то же, вибрационной сосредоточенной нагрузкой  
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Scheme for calculating the prestress of a beam:  
 а – diagram of the loading of a changing the prestress;  
 б – loading of a beam of uniform distributed adjustment;  
 с – loading of the beam with a supporting moment; д – loading of the beam by vibration moment;  
 д – the same, vibration artificial form  
 Source: by the authors.

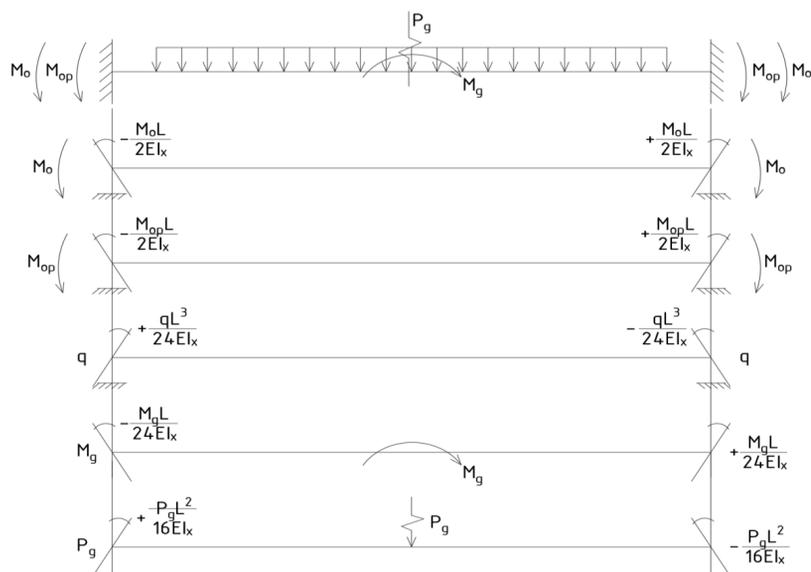


Рисунок 2 – Повороты сечений балки от отдельных нагрузий  
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Rotations of beam sections due to individual loads  
 Source: Compiled by the authors.

Из равенства

$$\frac{ql^3}{24EI_x} - \frac{M_0l}{2EI_x} - \frac{M_{op}l}{2EI_x} - \frac{M_g l}{24EI_x} + \frac{P_g l^2}{16EI_x} = 0$$

определяем опорный момент  $M_{op}$ :

$$M_{op} = \left[ \frac{ql^2}{12} - M_0 - \frac{M_g}{12} + \frac{P_g l}{8} \right]. \quad (7)$$

Момент усилий предварительного напряжения представлен в работе [24].

$$M_0 = \frac{R_y AhK^2}{(K+1)^2(K+2)}, \quad (8)$$

где  $R_y$  – расчетное сопротивление материала стенки предварительно напряженной балки;  $A$  – площадь поперечного сечения балки;  $h$  – высота сечения балки;  $K$  – коэффициент асимметрии сечения,  $K = 1,175$ .

В работах И. М. Рабиновича<sup>1</sup> и В. А. Киселева<sup>2</sup> вибрационный момент  $M_g$  рекомендуется определять зависимостью

$$M_g = P \cos \omega t \cdot a, \quad (9)$$

где  $P$  – вибрационная сила,

$P = m^* \omega^2 \rho = \frac{G^* \omega^2 \rho}{g}$  (рисунок 3);  $\omega$  – угловая скорость,  $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ ,  $n$  – количество оборотов неуравновешенной массы;  $m^*$  – масса неуравновешенного груза;  $\rho$  – эксцентриситет массы;  $G^*$  – вес неуравновешенного груза;  $g = 998 \text{ см/с}^2$ ;  $a$  – расстояние от центра тяжести механизма до горизонтального уровня покрытия.

Под действием усилия  $P_g$  в балках возникают вертикальные  $P \sin \omega t$  и горизонтальные  $P \cos \omega t$  силы (см. рисунок 3). Кроме этого, усилие  $P$ , приложенное с эксцентриситетом  $\rho$ , создает момент  $M_g = P \cdot \cos \omega t \cdot a$  ( $a$  – расстояние от центра тяжести механизма до горизонтального уровня покрытия).

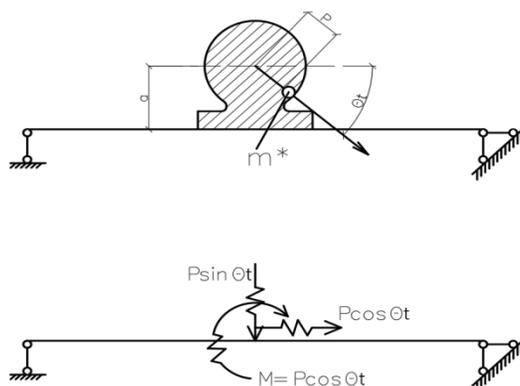


Рисунок 3 – Схема и вибрационные нагрузки балки с одной степенью свободы  
Источник: взято из работ [25,26].

Figure 3 – Diagram and vibration loads of a beam with one degree of freedom  
Source: Taken from works [25,26].

Нормальная и горизонтальная составляющие  $P \sin \omega t$  и  $P \cos \omega t$  создают прогибы в балках.

При наличии сил сопротивления прогиб от силы  $P \sin \omega t$

$$y = \alpha \sin(\omega t - \lambda) + \alpha e^{-\alpha t} \left[ \sin \lambda \cos \omega t + \frac{\alpha \sin \lambda - \omega \cos \lambda}{\omega} \right] + e^{-\alpha t} \left[ y(0) \cos \omega t + \frac{v(0) + \alpha y(0)}{\omega} \sin \omega t \right] \quad (10)$$

$P \cos \omega t$ :

$$y = \alpha \cos(\omega t - \lambda) + \alpha e^{-\alpha t} \left[ -\cos \lambda \cos \omega t - \frac{\alpha \cos \lambda + \omega \sin \lambda}{\omega} \sin \omega t \right] + e^{-\beta t} \left[ y(0) \cos \omega t + \frac{v(0) + \alpha y(0)}{\omega} \sin \omega t \right] \quad (11)$$

В том случае, когда силы сопротивления свободным колебаниям балок незначительны, можно допустить, что  $\alpha \approx 0$ ,  $\lambda \approx 0$ ,  $e^{-\alpha t} \approx 1,0$  и при начальных условиях  $y(0) = v(0) = 0$  прогибы от усилий  $P \sin \omega t$  и  $P \cos \omega t$  будут равны

<sup>1</sup> Рабинович И.М. Курс строительной механики стержневых систем. 2-е изд., перераб. Т.2. Статистические неопределимые системы. Специальный курс. М.: Госиздат, 1954. 543 с.

<sup>2</sup> Киселев В.А. Строительная механика. Специальный курс. М.: Стройиздат, 1964.331 с.

$$1 y = \left[ \frac{\delta_{1p} P}{(1 - \frac{\sigma^2}{\omega^2})} \right] (\sin \sigma t - \frac{\sigma}{\omega} \sin \omega t); \quad (12)$$

$$y = \left[ \frac{\delta_{1p} P}{(1 - \frac{\sigma^2}{\omega^2})} \right] (\cos \sigma t - \frac{\sigma}{\omega} \cos \omega t). \quad (13)$$

Здесь  $\delta_{1p}$  – прогиб балки от единичного нагружения.

$$\delta_{1p} = \frac{l^3}{48EI_x}. \quad (14)$$

Динамические коэффициенты

$$\mu(t) = \frac{1}{(1 - \frac{\sigma^2}{\omega^2})} (\sin \sigma t - \frac{\sigma}{\omega} \sin \omega t); \quad (15)$$

$$\mu(t) = \frac{1}{(1 - \frac{\sigma^2}{\omega^2})} (\cos \sigma t - \frac{\sigma}{\omega} \cos \omega t). \quad (16)$$

Из работы [24] известно, что угловую скорость  $\sigma$  можно определить из зависимости

$$tg \lambda = 2\sigma\alpha / (\omega_{gpr}^2 - \sigma^2), \quad (17)$$

решение которой позволяет получить квадратное уравнение

$$\sigma^2 tg \lambda + \sigma \cdot 2\alpha - tg \lambda \cdot \omega_{gpr}^2 = 0, \quad (18)$$

из которого следует

$$\sigma = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A} \text{ рад/сек}, \quad (19)$$

где  $A = tg \lambda$ ;  $B = 2\alpha$ ;  $C = tg \lambda \cdot \omega^2$ .

Коэффициент  $\lambda = 2\alpha / \omega$  – отвлеченная величина, учитывающая силы сопротивления;  $\alpha = \beta / 2m$  – коэффициент, характеризующий степень влияния сил сопротивления на свободные колебания;  $m$  – масса элемента.

Коэффициент пропорциональности  $\beta$  подчиняется зависимости  $\beta = 2$

$\alpha m = \frac{2\delta m \sqrt{\omega^2 - \alpha^2}}{2\pi}$ , преобразование которой позволяет установить, что

$$\alpha = \frac{\delta\omega}{\sqrt{4\pi + \delta^2}}. \quad (20)$$

Здесь  $\delta$  – логарифмический декремент затухания колебаний,  $\delta = 0,3$  (СП 20.13330.2017, п.11.1.10);  $\omega$  – круговая частота балки при свободном колебании:

- обычная балка

$$\omega_{ob} = \frac{9,876}{l^2} \sqrt{\frac{EI_x}{\mu}}; \quad (21)$$

- предварительно напряженная балка с шарнирными опорами

$$\omega_{pr} = \frac{7,162}{l^2} \sqrt{\frac{EI_x}{\mu}}; \quad (22)$$

- предварительно напряженная балка с жесткими опорами

$$\omega_{prg} = \frac{1,7689}{l^2} \sqrt{\frac{EI_x}{\mu}} \quad (23)$$

( $\mu$  – погонная масса балки и нагрузки на ней, кг/см).

**Практическая реализация теоретических положений расчета вибрационной надежности предварительно напряженных стальных балок**

Рассмотрим обычные и предварительно напряженные балки при условии шарнирного и жесткого закрепления их в опорных узлах. Балки пролетом  $l = 12000$  мм. Нагружены равномерно распределенной нагрузкой  $q = 0,18$  кН/см. На балках находится механизм массой 500 кг. Предположим, что геометрические параметры обычных и предварительно напряженных балок равны между собой:  $I_x = 40979$  см<sup>4</sup>,  $E = 2100000$  кг/см<sup>2</sup>. Расчетное сопротивление материала стенки  $R_y = 2300$  кг/см<sup>2</sup>, площадь поперечного сечения балок –  $A = 52$  см<sup>2</sup>, высота сечения  $h = 69$  см.

**Обычная балка**

Усилие  $P$ , создающее вибрационную нагрузку, на основании зависимости (9)  $P = m^* \sigma^2 \rho$ . Установлено, что масса  $m^* = 500$  кг.

Угловая скорость  $\sigma$  на основании формулы (19):

$$\sigma = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A}.$$

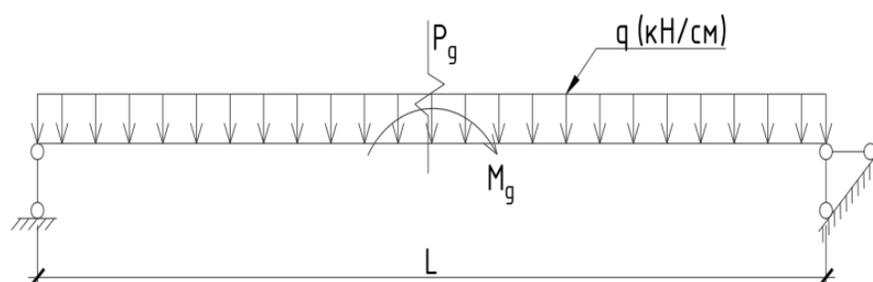


Рисунок 4 – Расчетная схема обычной балки  
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Design diagram of a conventional beam  
Source: compiled by the authors.

Здесь  $A = tg\lambda = tg(2\alpha/\omega)$ . Параметр  $\alpha_{ob}$  – коэффициент, характеризующий степень влияния сил сопротивления на свободные колебания, определяется формулой (20):

$$\alpha_{ob} = \frac{\delta\omega}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}}$$

Круговая частота обычной балки на основании зависимости (21):

$$\omega = \frac{9,876}{l^2} \sqrt{\frac{EI_x}{\mu}} = \frac{9,876}{1200^2} \sqrt{\frac{2100000 \cdot 40979}{0,83}} = 2,2^{-1}$$

Следовательно,

$$\alpha_{ob} = \frac{0,30 \cdot 2,2}{\sqrt{4 \cdot 3,14^2 + 0,3^2}} = 0,104928.$$

Наконец,

$$A = tg \frac{2\alpha}{\omega_{об}} = \frac{2 \cdot 0,104928}{2,2} = tg 0,0953891 = 0,0956794.$$

Параметры

$$B = 2\alpha_{об} = 2 \cdot 0,104928 = 0,209856 ; ;$$

$$C = tg\lambda\omega_{об}^2 = tg \frac{2\alpha}{\omega_{об}} \omega_{об}^2 = 0,0956794 \cdot 4,84 = 0,463.$$

С учетом  $A, B, C$  угловая скорость обычной балки

$$o = \frac{-0,209856 \pm \sqrt{0,209856^2 + 4 \cdot 0,0956794 \cdot 0,463}}{2 \cdot 0,0956794} = 1,3613296 \text{ рад/сек.}$$

Таким образом, усилие  $P_g$ , создающее вибрационную нагрузку в обычной балке (см. рис.4) по зависимости (9):

$$P_g = m \cdot o^2 \rho = 500 \cdot 1,36133^2 \cdot 2 = 1853,2 \text{ кг.}$$

Момент усилий вибрационной нагрузки, вызванный усилием  $P_g$ ,

$$M_g = P_g \cdot \cos o \cdot t \cdot a.$$

Здесь  $a$  – расстояние от центра тяжести механизма до горизонтального уровня покрытия,  $a = 40$  см;  $t$  – продолжительность работы механизма. Предположим, что  $t = 24 \text{ часа} = 86400 \text{ сек}$ . В таком случае  $M_g = 1853,2 \cdot \cos(1,36133 \cdot 86400) \cdot 40 = 1853,2 \cdot \cos 117618 \cdot 40 = 1853,2 \cdot -0,7 \cdot 4052193 = -52193 \text{ кг} \cdot \text{см}$ .

Прогиб в балке от усилий вибрационной нагрузки в соответствии с зависимостью (13):

$$y = \left[ \frac{\delta_{1p} P}{2 \left(1 - \frac{o_{об}^2}{\omega_{об}^2}\right)} \right] (\cos o_{об} t - \frac{o_{об}}{\omega_{об}} \cos \omega_{об} t) = \left[ \frac{0,000418 \cdot 1853,2}{2 \left(1 - \frac{1,36133^2}{2,2^2}\right)} \right] (\cos(1,36133 \cdot 86400) - \frac{1,36133}{2,2} \cos(2,2 \cdot 86400)) = -0,464 \text{ см.}$$

Здесь  $\delta_{1p}$  – прогиб в балке от единичного нагружения,

$$\delta_{1p} = \frac{l^2}{48EI_x} = \frac{1200^3}{48 \cdot 2100000 \cdot 40979} = 0,00041833 \text{ см.}$$

Суммарный изгибающий момент в балке

$$\begin{aligned} \sum M &= M_g + M_{pg} - \frac{M_q}{2} = \frac{ql^2}{8} + \frac{P_g l}{4} - \frac{M_g}{2} = \\ &= \frac{18 \cdot 1200^2}{8} + \frac{1853,2 \cdot 1200}{4} - \frac{52193}{2} = \\ &= 3240000 + 555960 - 2696 = \\ &= 32929864 \text{ кг} \cdot \text{см}. \end{aligned}$$

Суммарный прогиб в балке

$$\sum y = y_q \cdot \mu(t) + y_p - y_{M_g}.$$

Здесь  $\mu(t)$  - динамический коэффициент

$$\begin{aligned} \mu(t) &= \frac{1}{(1 - \frac{\sigma^2}{\omega^2})} (\sin \sigma t - \frac{\sigma}{\omega} \sin \omega t) = \\ &= \frac{1}{(1 - \frac{1,36133^2}{2,2^2})} (\sin 1,36133 \cdot 86400) - \\ &\quad - \frac{1,36133}{2,2} \sin 2,2 \cdot 86400) = 1,776. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \sum y &= \frac{5}{384} \cdot \frac{18 \cdot 1200^4}{2100000 \cdot 40979} \cdot \\ &\cdot 1,9 - 0,464 \pm 0,008 \frac{52193 \cdot 1200^2}{2100000 \cdot 40979} = \\ &= 5,648 \cdot 1,776 - 0,464 + 0,006989 = 9,547 \text{ см.} \end{aligned}$$

Действующие напряжения в обычной балке:

- от равномерно распределенной нагрузки  $q = 18 \text{ кг / см}$ .

$$\begin{aligned} \sigma_q &= \frac{3240000 \cdot h}{40979 \cdot 2} = \frac{3240000 \cdot 69}{81958} \\ &= 2727 \text{ кг / см}^2; \end{aligned}$$

- от динамического воздействия в виде механизма массой 500 кг.

$$\sigma_g = \frac{(555960 - 26096) \cdot 69}{40979 \cdot 2} = 2727 \text{ кг / см}^2.$$

Суммарное напряжение

$$\sum \sigma = \sigma_q + \sigma_g = 2727 + 446 = 3173 \text{ кг / см}^2.$$

Вывод: обычная балка пролетом  $l = 1200 \text{ см}$ , нагруженная равномерно распределенной нагрузкой  $q = 18 \text{ кг / см}$  и находящаяся под воздействием динамической нагрузки массой 500 кг, не обладает необходимой несущей способностью по критерию первого и второго предельного состояния.  $\sum \sigma = 3173 > R_y = 2300 \text{ кН / см}^2$ .  $y/l = 9,574/1200 = 0,007978$ .

Суммарное напряжение

$$\sum \sigma = \sigma_q + \sigma_g = 2727 + 446 = 3173 \text{ кг / см}^2.$$

Вывод: обычная балка пролетом  $l = 1200 \text{ см}$ , нагруженная равномерно распределенной нагрузкой  $q = 18 \text{ кг/см}$  и находящаяся под воздействием динамической нагрузки массой 500 кг, не обладает необходимой несущей способностью по критерию первого и второго предельного состояния  $\sum \sigma = 3173 > R_y = 2300 \text{ кН / см}^2$ .  $y/l = 9,574/1200 = 0,007978 \gg [y/l] = 0,005$ .

**Балка, предварительно напряженная, с шарнирными опорами нагружена равномерно распределенной нагрузкой  $q = 18 \text{ кг/см}$  и вибрационной массой  $P = 500 \text{ кг}$  (рисунок 5)**

Круговая частота, согласно формулы (22):

$$\begin{aligned} \omega_{pr} &= \frac{7,162}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\mu}} = \\ &= \frac{7,162}{1200^2} \sqrt{\frac{2100000 \cdot 40979}{0,86}} = 1,573 \text{ с}^{-1}. \end{aligned}$$

Коэффициент, характеризующий степень влияния сил сопротивления

$$\alpha_{pr} = \frac{\delta \omega_{pr}}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} = \frac{0,3 \cdot 1,573}{6,2947} = 0,075.$$

Параметры угловой скорости:

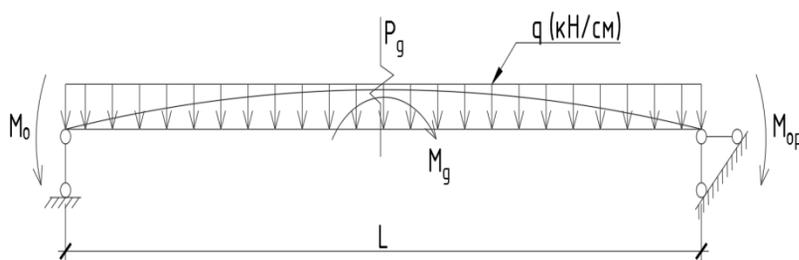


Рисунок 5 – Расчетная схема предварительно напряженной балки  
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Design diagram of a prestressed beam  
Source: compiled by the authors.

$$\lambda_{pr} = 2 \cdot \alpha_{pr} / \omega_{pr} = 2 \cdot 0,075 / 1,573 = 0,09539;$$

$$A = \operatorname{tg} \lambda = \operatorname{tg} 0,09539 = 0,09568;$$

$$B = 2 \cdot \alpha_{pr} = 2 \cdot 0,075 = 0,15;$$

$$C = \operatorname{tg} \frac{2 \cdot \alpha_{pr}}{\omega_{pr}} \cdot \omega_{pr}^2 = \operatorname{tg} 0,09539 \cdot 1,573^2 = \\ = 0,09568 \cdot 2,47433 = 0,2367.$$

Угловая скорость

$$\omega_{pr} = \frac{-0,15 \pm \sqrt{0,15^2 + 4 \cdot 0,09568 \cdot 0,2367}}{2 \cdot 0,09568} = \\ = 0,973 \text{ рад / сек.}$$

Сосредоточенная вибрационная нагрузка,

$$P_{pg} = m^* \omega_{pr}^2 \rho = 500 \cdot 0,973^2 \cdot 2 = 946,73 \text{ кг.}$$

Прогиб балки от вибрационной сосредоточенной нагрузки

$$\left[ \frac{\delta_{1p} P_{pg}}{\left(1 - \frac{\omega_{pr}^2}{\sigma_{pr}^2}\right)} \right] \left( \sin \omega_{pr} \cdot t - \frac{\omega_{pr}}{\omega_{pr}} \sin \omega_{pr} \cdot t \right) = \\ = \left[ \frac{0,0004183 \cdot 946,73}{\left(1 - \frac{0,793^2}{1,573^2}\right)} \right] (-0,969254 - \\ - 0,618356 \cdot 0,9457) = - 0,621 \text{ см.}$$

Прогиб балки от усилий предварительного напряжения

$$f_o = - \frac{M_o \cdot l^2 \cdot 1,7466}{8,3 \cdot EI_x}.$$

Момент усилий предварительного напряжения

$$M_o = \frac{R_y AhK^2}{(K+1)^2(K+2)} = \\ = \frac{2300 \cdot 52 \cdot 69 \cdot 1,175^2}{2,175^2 \cdot 3,175} = 758566 \text{ кг} \cdot \text{см.}$$

В таком случае прогиб от усилий предварительного напряжения

$$f = - \frac{758566 \cdot 1200^2 \cdot 1,7466}{8,3 \cdot 2100000 \cdot 40979} = - 2,67 \text{ см.}$$

Прогиб от равномерно распределенной нагрузки

$$y_q = \frac{5}{384} \cdot \frac{ql^4}{EI_x} = \\ = 0,013 \cdot \frac{18 \cdot 1200^4}{210000 \cdot 40979} = 5,647 \text{ см.}$$

Вибрационный момент

$$M_g = P \cos \omega \cdot t \cdot a = 946,73 \cdot \\ \cdot \cos(0,973 \cdot 86400) \cdot 40 = - 9318,1 \text{ кг} \cdot \text{см.}$$

Прогиб от вибрационного момента

$$y_{Mg} = -0,008 \frac{M_g l^2}{EI_x} = -$$

$$= -0,008 \frac{9318,1 \cdot 1200^2}{2100000 \cdot 40979} =$$

$$= -0,001247 \text{ см.}$$

Динамический коэффициент

$$\mu(t)_g = \frac{1}{(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{pr}^2})} (\sin \omega t - \frac{\omega_{pr}}{\omega} \sin \omega_{pr} t) =$$

$$= 1,6197 \cdot (-0,96925 - 0,618563 \cdot 0,945715) =$$

$$= 2,148.$$

Суммарный прогиб в балке, предварительно напряженной вытяжкой стенки

$$\sum y = y - f_0 \cdot \mu(t) + y_q \cdot \mu(t) + y_g =$$

$$= (-0,621 - 2,64 + 5,647 - 0,0124) \cdot 2,148 =$$

$$= (-1,333 - 5,67 + 12,129 - 0,0266) = 5,1 \text{ см}$$

Отметим, что выгиб балки от усилий предварительного напряжения  $f_0 = -2,67$  см снижает прогиб ее  $y_q - 5,647$  в 2,1 раза.

Напряженное состояние предварительно напряженных балок. Как отмечено в работе [24], предварительно напряженная балка представляет собой биметаллическую конструкцию с поясами из высокопрочной стали С440 и стенкой из малоуглеродистой стали С235. На стадии изготовления балок по их поперечному сечению получена эпюра нормальных напряжений, вектор которых направлен в сторону, противоположную вектору напряжений, вызванных внешней нагрузкой.

В верхней зоне стенки балок

$$\sigma_{wv} = -\frac{2KR_y}{2K+1} = -\frac{2 \cdot 1,175 \cdot 2300}{2 \cdot 1,175 + 1} =$$

$$= -1612 \text{ кг/см}^2.$$

Нижней зоне

$$\sigma_{wn} = \frac{KR_y}{2K+1} = 806 \text{ кг/см}^2.$$

Напряжения в балке от внешней нагрузки

$$\sigma_q = \frac{M_q}{W_x} = \frac{ql^2 \cdot h}{8 \cdot 2I_x} = \frac{18 \cdot 1200^2 \cdot 69}{8 \cdot 2 \cdot 40979} =$$

$$= 2727 \text{ кг/см}^2.$$

Напряжения в балке, вызванные вибрационной сосредоточенной нагрузкой  $P_g = 946,73 \text{ кг}$ .

$$\sigma_g = \frac{P_g l \cdot 69}{4 \cdot 2 \cdot 40979} = \frac{946,73 \cdot 1200 \cdot 69}{40979 \cdot 8} =$$

$$= 239,1 \text{ кг/см}^2.$$

Напряжение в балке от вибрационного момента

$$M_g = P_g \cos \omega t \cdot a =$$

$$= 946,73 \cdot \cos 0,973 \cdot 86400 \cdot 40 =$$

$$= 946,73 \cdot (-0,246) \cdot 40 = -9315,82 \text{ кг} \cdot \text{см}.$$

Следовательно,

$$\sigma_{n1} = -\frac{M_g}{W_x} = \frac{9315,82 \cdot 69}{2 \cdot 40979} = -7,843 \text{ кг/см}^2.$$

Суммарные напряжения

$$\sum \sigma = -\sigma_{wv} + \sigma_q + \sigma_g + \sigma_{g1} =$$

$$= -1612 + 2727 + 239,1 - 7,843 =$$

$$= 1346,257 \text{ кг/см}^2.$$

Заметим, что предварительное напряжение  $\sigma_{wv} = -1612 \text{ кг/см}^2$  снижает суммарные нормальные напряжения, вызванные внешней равномерно распределенной и вибрационной нагрузками  $(\sigma_a + \sigma_q - \sigma_{g1}) = 2958 \text{ кг/см}^2$  в 1,8 раз  $\psi = \sum \sigma / \sigma_{wn} = 2958 / 1612 = 1,8$ .

**Предварительно напряженная балка нагружена равномерно распределенной нагрузкой  $q = 18 \text{ кг/см}$ , вибрационной нагрузкой массой 500кг, жестко закрепленная в опорных узлах**

Круговая частота балки на основании зависимости (23):

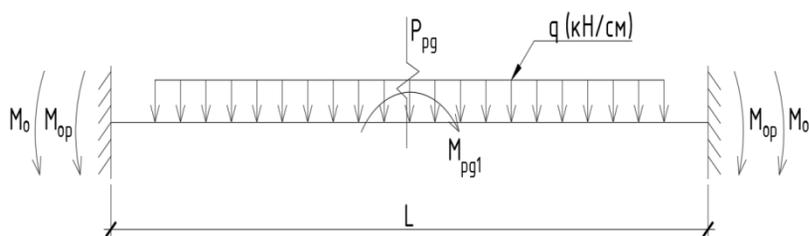


Рисунок 6 – Расчетная схема и нагрузки на предварительно напряженную балку, жестко закрепленную на опорах  
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Design diagram and loads on a prestressed beam rigidly fixed to supports  
Source: compiled by the authors.

$$\omega_g = \frac{1,7689}{l^2} \sqrt{\frac{EI_x}{\mu}} =$$

$$= \frac{1,7689}{1200^2} \sqrt{\frac{2100000 \cdot 40979}{0,86}} = 0,38858 c^{-1}.$$

Коэффициент, характеризующий влияние сил сопротивления

$$\alpha_g = \frac{\delta \omega_g}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} = \frac{0,3 \cdot 0,38858}{\sqrt{4 \cdot 9,8696 + 0,09}} = 0,018533.$$

Параметры угловой скорости

$$\lambda_g = 2\alpha_g / \omega_g = 2 \cdot 0,018533 / 0,38858 = 0,0954;$$

$$A = tg \lambda_g = 0,0957;$$

$$B = 2\alpha_g = 2 \cdot 0,018533 = 0,037;$$

$$C = tg \lambda_g \omega_g = tg(0,0954) \cdot 0,38858^2 = 0,0956797 \cdot 0,144 = 0,0144.$$

Угловая скорость

$$\omega_g = \frac{-0,037 \pm \sqrt{0,037^2 + 4 \cdot 0,0957 \cdot 0,0144}}{2 \cdot 0,0957} = 0,2 \text{ рад / сек.}$$

Динамическая сосредоточенная сила (см. рисунок 6)

$$P_{pg} = m^* \omega_g^2 \rho = 500 \cdot 0,2^2 \cdot 2 = 40,0 \text{ кз.}$$

Прогиб в балке от динамической силы  $P_{pg}$

$$y_{pg} = \frac{\delta_{1p} P_{pg}}{\left(1 - \frac{\omega_g^2}{\omega_g^2}\right)} \left(\sin \omega_g t - \frac{\omega_g}{\omega_g} \sin \omega_g t\right) =$$

$$= \frac{0,00041833 \cdot 40}{\left(1 - \frac{0,2^2}{0,38858^2}\right)} \left(\sin 0,2 \cdot 86400 - \frac{0,2}{0,38858} \sin 0,38858 \cdot 86400\right) = 0,0148$$

Динамический коэффициент

$$\mu(t) = 0,887.$$

Выше установлено, что момент усилий предварительного напряжения

$$M_0 = 7585666,6 \text{ кз} \cdot \text{см.}$$

Момент усилий динамической нагрузки

$$M_{pg} = P_{pg} \cos \omega_g t \cdot a = 40 \cdot \cos 0,2 \cdot 86400 \cdot 40 = 40(0,324) \cdot 40 = 518,4 \text{ кз} \cdot \text{см.}$$

Момент от сосредоточенной динамической нагрузки

$$M_{pg1} = \frac{P_{pg} l}{4} = \frac{40 \cdot 1200}{4} = 12000 \text{ кз} \cdot \text{см}$$

Опорный момент на основании выражения (7):

$$M_{op} = \left[ \frac{ql^2}{12} - M_o - \frac{M_g}{12} + \frac{P_g l}{8} \right].$$

Момент усилий предварительного напряжения представлен в работе [24].

$$\begin{aligned} M_{op} &= \frac{ql^2}{12} - M_o - \left( -\frac{M_{pg}}{12} \right) + \frac{P_{pg} l}{8} = \\ &= \frac{18 \cdot 1200^2}{12} - 758566,66 + \\ &\quad + \frac{518,4}{12} + \frac{40 \cdot 1200}{8} = \\ &2160000 - 758566 + 43,2 + 6000 = \\ &= 1401477 \text{ кг} \cdot \text{см} \end{aligned}$$

Суммарный момент нагрузок в предварительно напряженной балке, жестко защемленной в опорных узлах

$$\begin{aligned} \sum M &= -M_o - M_{op} + M_q + M_{pg} - \\ &- M_{pg1} = -758566 - 1401477 + \\ &\quad + 3240000 + 518,4 - 12000 = \\ &= 1068475 \text{ кг} \cdot \text{см}. \end{aligned}$$

Заметим, что предварительное напряжение совместно с опорным моментом снижают суммарный момент внешних нагрузок на 67%. Вибрационные нагрузки ( $M_{pg}, M_{pg1}$ ) увеличивают суммарный момент внешних воздействий только лишь на 2%.

Прогиб балки от опорного момента  $M_{op}$

$$\begin{aligned} y_{M_{op}} &= -\frac{M_{op} l^2}{8EI_x} = \\ &= -\frac{1410090 \cdot 1200^2}{8 \cdot 2100000 \cdot 40979} = -3,00 \text{ см}. \end{aligned}$$

Прогиб от момента усилий предварительного напряжения

$$f_o = -2,64 \text{ см}.$$

Прогиб от равномерно распределенной нагрузки

$$y_q = 5,647 \text{ см}.$$

Результирующий прогиб в балке, жестко закрепленной на опорах с учетом коэффициента динамичности,

$$\begin{aligned} y^0 &= (-y_{M_{op}} - f_o + y_q) \mu(t) = \\ &= (-3,00 - 2,64 + 5,647) \cdot 0,887 = 0,007 \text{ см}. \end{aligned}$$

Наглядно видно, что прогибы от опорного момента и момента усилий предварительного напряжения ( $-y_{M_{op}} - f_o$ ) = -5,64 см равны прогибу, вызванному равномерно распределенной нагрузкой ( $y_q = 5,647$  см). Прогиб от сосредоточенной вибрационной нагрузки (см. расчет выше)

$$y_{pg} = 0,0148 \text{ см}.$$

Прогиб от вибрационного момента  $M_{pg}$

$$\begin{aligned} y_{pg1} &= -0,008 \frac{M_{pg1} l^2}{EI_x} = \\ &= -0,008 \frac{518,4 \cdot 1200^2 \cdot}{2100000 \cdot 40979} = \\ &= -0,0000328 \text{ см}. \end{aligned}$$

Таким образом, прогиб в предварительно напряженной балке, жестко закрепленной на опорах

$$\begin{aligned} \sum y &= y^0 + y_{pg} - y_{pg1} = \\ &= 0,007 + 0,0148 - 0,0000328 = 0,084 \text{ см}. \end{aligned}$$

Вывод: усилие предварительного напряжения  $M_o$  совместно с опорным моментом в узлах балки  $M_{op}$  позволяют практически исключить прогибы балки. Вибрационная нагрузка не оказывает влияния на перемещения предварительно напряженной балки.

*Нормальные напряжения в предварительно напряженной балке, жестко закрепленной в опорных узлах*

Нормальные напряжения от опорного момента

$$\begin{aligned} \sigma_{M_{op}} &= -\frac{M_{op}}{W_x} = -\frac{1410090 \cdot 69}{2 \cdot 40979} = \\ &= -1187,14 \text{ кг} / \text{см}^2. \end{aligned}$$

Напряжения от усилий предварительного напряжения – верхняя область стенки –

$$\begin{aligned} \sigma_{wv} &= -\frac{R_y 2K}{2K + 1} = -\frac{2300 \cdot 2 \cdot 1,175}{(2 \cdot 1,175 + 1)} = \\ &= -1613,44 \text{ кг} / \text{см}^2. \end{aligned}$$

Таблица

**Вибрационные параметры балок**  
Коэффициенты динамичности  $\mu$ , круговая частота  $\omega$ ,  
угловая скорость  $\omega$ , прогибы  $y$  и напряжения  $\sigma$  приняты из раздела  
«Практическая реализация теоретических положений расчета вибрационной надежности предварительно  
напряженных стальных балок» настоящей статьи  
Источник: составлено авторами.

Table

**Vibration parameters of beams**  
 $\mu$  dynamic coefficients,  $\omega$  circular frequency,  $\omega$  angular velocity,  $y$  deflections  
and stresses are taken from the 'Practical implementation of the theoretical provisions for calculating the vibration  
reliability of prestressed steel beams' section of this article:  
Source: Source: compiled by the authors.

Балки	$\mu$	$\omega, c^{-1}$	$\omega, \text{рад/с}$	$y, \text{см}$	$\sigma \text{ кН/см}^2$
Б	1,776	2,2	1,363	9,574	3173,7
ПН	2,148	1,573	0,973	5,1	1346,7
ПНЖ	0,887	0,38858	0,2	0,84	-83,0

Напряжения от равномерно распределенной нагрузки

$$\sigma_q = \frac{ql^2 \cdot h}{8 \cdot 2 \cdot I_x} = \frac{18 \cdot 1200^2 \cdot 69}{8 \cdot 2 \cdot 40979} = 2727 \text{ кг/см}^2.$$

Результирующие нормальные напряжения в балке от опорного момента, момента усилий предварительного напряжения и равномерно распределенной нагрузки с учетом динамического коэффициента

$$\begin{aligned} \sigma^0 &= (-\sigma_{M_{op}} - \sigma_{vv} + \sigma_q) \mu(t) = \\ &= (-1187,14 - 1613 + 2727) \cdot 0,8869 = \\ &= -73,0 \text{ кг/см}^2. \end{aligned}$$

Напряжения от сосредоточенной вибрационной нагрузки  $P_{pg}$

$$\sigma_{pg} = -12000 \cdot 69 / 2 \cdot 40970 = -10,1 \text{ кг/см},$$

Напряжение от вибрационного момента  $M_{pg1}$

$$\sigma_{pg1} = \frac{40 \cdot 69}{2 \cdot 40979} = 0,0336 \text{ кг/см}^2.$$

Суммарные нормальные напряжения

$$\begin{aligned} \sum \sigma &= -\sigma^0 - \sigma_{pg} + \sigma_{pg1} = \\ &= -73 - 10,1 + 0,0336 = -83 \text{ кг/см}^2. \end{aligned}$$

Полученный результат свидетельствует о том, что опорный момент и усилия предвари-

тельного напряжения позволяют получить по поперечному сечению предварительно напряженной балки с жесткими опорными узлами нормальные напряжения, вектор которых противоположен вектору напряжений, вызванных равномерно распределенной нагрузкой. Это означает, что балка обладает большим запасом несущей способности.

Параметры вибрационной прочности обычных, предварительно напряженных шарнирно закрепленных и предварительно напряженных с жесткими опорами, показаны в таблице.

Анализ таблицы свидетельствует о том, что круговая частота  $\omega$  предварительно напряженных балок, шарнирно закрепленных в опорных узлах по сравнению с круговой частотой обычных балок, снижается в 1,4 раза и в 5,6 – в балках с жесткими опорами.

Угловая скорость снижается, соответственно, в 1,4 (шарнирные опоры) и 6,8 (жесткие опоры). Прогибы преднапряженных балок снижаются в 1,87 и 11,9 раз. Наблюдается многократное снижение нормальных напряжений.

Примечания: Б–обычные балки: ПН– балки, предварительно напряженные с шарнирными опорами: ПНЖ – то же, с жесткими опорами.

Результаты таблицы закономерны. Известно [25, 26], что круговая частота определяется выражением

$$\omega^2 = \frac{\sum \int \frac{M^2 dx}{EI_x}}{\sum \int y^2 \mu dx}.$$

Снижение суммарных статических моментов внешних нагрузок и прогибов в предварительно напряженных балках сопровождается снижением в них круговой частоты колебательного процесса. Поскольку выражение круговой частоты  $\omega$  является составной частью угловой скорости  $O$  (17)–(19), то и она снижается в исследуемых балках. Вспомним, что круговая частота  $\omega$  является показателем изменения в радианах радиуса кривизны ( $1/r$ ) изгибаемого элемента, который, в свою очередь, находится в прямой зависимости от дифференциального уравнения изогнутой оси балок.

$$\frac{1}{r} = \frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{EI_x}$$

Однократное интегрирование дифференциального уравнения

$$\int \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{dy}{dx} = -\frac{1}{EI_x} \int M dx$$

позволяет получить угол наклона касательной к кривой изгиба оси балки или углы поворота поперечных сечений балок. Снижение суммарных моментов, действующих на предварительно напряженную балку, влечет за собой снижение поворотов сечения конструкций, что является характеристикой снижения прогибов и напряжений в изогнутом элементе.

## ВЫВОДЫ

Стальные биметаллические балки, предварительно напряженные вытяжкой стенки, имеют повышенную вибрационную надежность. Особой надежностью обладают балки, жестко закрепленные на опорах, которые могут быть рекомендованы для применения их в узлах разных зданий и сооружений.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Масленников А.М., Сухотерин М.В. [и др.] Сравнительный анализ определения частот собственных колебаний прямоугольных панелей с заземленными свободными краями // Вестник гражданских инженеров. 2022. №2 (91). С. 45–57.
2. Розенцвейг Л.М. Метод вычисления частот собственных колебаний упругих стержней прямым интегрированием. Каган дифференциального уравнения изгиба // Вестник гражданских инженеров. 2019. №1(72). С. 61–66.
3. Соколов В.Г., Дмитриев А.В. Свободные колебания подземных прямолинейных тонкостенных участков газопроводов // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 2(73). С. 29–34.
4. Нестерова О.П. Особенности расчета сооружений с динамическими гасителями колебаний по акселерограммам проектных землетрясений // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 2 (73). С. 48–53.
5. Соколов В.Г., Огородникова Ю.В. Колебания подземных тонкостенных магистральных трубопроводов с учетом внутреннего давления и продольной силы // Вестник гражданских инженеров. № 5(76). 2019. С. 105–112.
6. Нгуен Х. Х. Определение частот свободных колебаний пологих оболочек на прямоугольном плане и сравнение аналитических и численных результатов // Вестник гражданских инженеров. 2014. №1(42). С. 44–48.
7. Березнев А.В. Влияние внутреннего рабочего давления на частоты свободных колебаний криволинейных участков полиэтиленовых трубопроводов // Вестник гражданских инженеров. 2015. №(50). С. 101–104.
8. Чернов Ю.Т. Проектирование зданий и сооружений, подвергающихся динамическим воздействиям // Промышленное и гражданское строительство. 2018. №4. С. 73–77.
9. Турков А. В., Ветрова О. А, Марфин К. В. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных ферм на квадратном плане с различными схемами опирания // Промышленное и гражданское строительство. 2018. №11. С. 42–45.
10. Мкртычев О. Р., Булушев С. В. Вероятностный анализ работы плоской стальной рамы при сейсмическом воздействии // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 5. С. 45–50.
11. Гусев Б. В., Саурин В. В. О моделировании изгибных колебаний балок переменного поперечного сечения // Промышленное и гражданское строительство. 2020. №11. С. 94–98.
12. Зедгенизов В.Г., Файзов С.Х. Влияние точки приложения вынуждающей силы в двухмассовой колебательной системе на ее энергоэффективность // Вестник СибАДИ. 2023;20(1):12-23. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-12-23>
13. Кобытов М.С., Щербаков В.С., Беляков В.Е. Моделирование и исследование колебаний груза, перемещаемого грузоподъемным краном // Вестник СибАДИ. 2019;16(5):526-533. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-5-526-533>
14. Сухарев Р.Ю., Танский В.В. Анализ влияния координат точек крепления уравновешивающего каната на колебательность груза на стреле крана-трубоукладчика // Вестник СибАДИ. 2018;15(2):199-206. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-2-199-206>
15. Кравчук В. А. Свободные колебания стальных балок, предварительно напряженных вытяжкой стенки // Вестник гражданских инженеров. 2020. 6 (83). С. 97–103.
16. Кравчук В.А. Динамические параметры несущей способности стальных балок, предварительно напряженных вытяжкой тонкой стенки при жестком закреплении их на опорах // Вестник гражданских инженеров. 2021. №6 (89). С. 72–77.

17. Кравчук В.А., Кравчук Е.В. Работа тонкостенных стальных стержней, предварительно напряженных вытяжкой стенки, при случайных динамических воздействиях // Вестник гражданских инженеров. 2022. №6 (95). С. 10–20.

18. Song S., Qian Y., Liu J., Xie X., Wu G. Time-variant fragility analysis of the bridge system considering time-varying dependence among typical component seismic demands // *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2019. Vol. 18. Issue 2. Pp. 363- 377.

19. Du Y., Hao J., Yu J., Yu H., Deng B., Liang Z. Seismic performance of a repaired thin steel plate shear wall structure // *Journal of Constructional Steel Research*. 2018. Vol. 151. Pp. 194-203

20. Jalali S. A., Darvishan E. Seismic demand assessment of self-centering steel plate shear walls // *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. Vol. 162. 105738

21. Mu Z., Yang Y. Experimental and numerical study on seismic behavior of obliquely stiffened steel plate shear walls with openings // *Thin-Walled Structures*. 2020. Vol. 146. 106457

22. Zhong S. C., Oyadiji S. O. Analytical predictions of natural frequencies of cracked simply supported beams with a stationary roving mass // *Journal of Sound and Vibration*. 2008. Vol. 311 (1-2). Pp. 328-352. DOI: 10.1016/j.jsv.2007.09.00923

23. Lien T. V., Duc N. T., Khiem N. T. Free and forced vibration analysis of multiple cracked FGM multi span continuous beams using dynamic stiffness method // *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2019. Vol. 16 (2). Pp. 1-26. DOI: 10.1590/1679-78255242

24. Кравчук В. А. Стальные стержни, предварительно напряженные без затяжек. М.: АСВ, 2015. 550 с.

## REFERENCES

1. Maslennikov A. M., Sukhoterin M. V. et al. Sravnitel'nyy analiz opredeleniya chastot sobstvennykh kolebaniy pryamougol'nykh paneley s zashchemlennymi svobodnymi krayami [Comparative analysis of determining the natural vibration frequencies of rectangular panels with clamped free edges]. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2022; No. 2(91): 45-57. (in Russ.)

2. Rosenzweig L. M. Metod vychisleniya chastot sobstvennykh kolebaniy uprugikh sterzhney pryamym integrirovaniyem differentsial'nogo uravneniya izgiba [Method for calculating the natural frequencies of elastic rods by direct integration of the Kagan differential equation of bending]. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2019; 1(72): 61-66. (in Russ.)

3. Sokolov V. G., Dmitriev A. V. Kolebaniya podzemnykh tonkostennykh magistral'nykh truboprovodov s uchedom vnutrennego davleniya i prodol'noy sily. [Free vibrations of underground rectilinear thin-walled sections of gas pipelines]. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2019; 2 (73): 29-34. (in Russ.)

4. Nesterova O. P. Osobennosti rascheta sooruzheniy s dinamicheskimi gasitelyami kolebaniy po akselerogrammam proyektnykh zemletryaseniy. [Features of calculation of structures with dynamic vibration dampers based on accelerograms of design earthquakes]. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2019; 2(73): 48-53. (in Russ.)

5. Sokolov V. G., Ogorodnikova Yu. V. Kolebaniya podzemnykh tonkostennykh magistral'nykh truboprovodov s uchedom vnutrennego davleniya i prodol'noy sily. [Oscillations of underground thin-walled main pipelines taking into account internal pressure and longitudinal force]. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2019; 5 (76): 105-112. (in Russ.)

6. Nguyen H. H. Opredeleniye chastot svobodnykh kolebaniy plogikh obolochek na pryamougol'nom plane i sravneniye analiticheskikh i chislennykh rezul'tatov [Determination of the frequencies of free vibrations of shallow shells on a rectangular plan and comparison of analytical and numerical results]. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2014; 1(42): 44-48. (in Russ.)

7. Bereznev A.V. Vliyaniye vnutrennego rabochoego davleniya na chastoty svobodnykh kolebaniy krivolineynykh uchastkov polietilennykh truboprovodov [Influence of internal working pressure on the frequencies of free vibrations of curved sections of polyethylene pipelines]. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2015; (50): 101-104. (in Russ.)

8. Chernov Yu. T. Proyektirovaniye zdaniy i sooruzheniy, podvergayushchikhsya dinamicheskim vozdeystviyam. [Design of buildings and structures subject to dynamic influences]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2018; 4: 73-77. (in Russ.)

9. Turkov A.V., Vetrova O.A., Marfin K.V. Progiby i chastoty sobstvennykh kolebaniy sistem perekrestnykh ferm na kvadratnom plane s razlichnymi skhemami operaniya [Deflections and natural oscillation frequencies of cross-truss systems on a square plan with various support schemes]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2018; 11: 42–45. (in Russ.)

10. Mkrtichev O. R., Bulushev. Veroyatnostnyy analiz raboty ploskoy stal'noy ramy pri seysmicheskom vozdeystvii. [Probabilistic analysis of the operation of a flat steel frame under seismic influence]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2020; 5: 45-50. (in Russ.)

11. Gusev B.V., Saurin V.V. O modelirovaniy izgibnykh kolebaniy balok peremennogo poperechnogo secheniya [On modeling of bending vibrations of beams of variable cross-section]. *Industrial and Civil Construction*. 2020; 11: 94-98. (in Russ.)

12. Zedgenizov V.G., Faizov S.Kh. Impact of force application point in two-mass oscillation system on its energy efficiency. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023;20(1):12-23. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-12-23>

13. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Belyakov V.E. Fluctuations of the cargo transported by lifting crane: simulation and analysis. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*.

*bile and Highway Industry Journal*. 2019;16(5):526-533. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-5-526-533>

14. Sukharev R.Y., Tanskiy V.V. Influence analysis of the attachment coordinates relating to the cargo oscillations on the pipe laying crane's boom. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018;15(2):199-206. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-2-199-206>

15. Kravchuk V. A. Svobodnyye kolebaniya stal'nykh balok, predvaritel'no napryazhennykh vytyazhkoy stenki [Free vibrations of steel beams prestressed by drawing the wall]. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 6(83): 97-103. (in Russ.)

16. Kravchuk V.A. Dinamicheskiye parametry neshchey sposobnosti stal'nykh balok, predvaritel'no napryazhennykh vytyazhkoy tonkoy stenki pri zhestkom zakreplenii ikh na oporakh. [Dynamic parameters of the load-bearing capacity of steel beams prestressed by stretching a thin wall when rigidly fastened to supports]. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2021; 6 (89): 72-77. (in Russ)

17. Kravchuk V. A., Kravchuk E. V. Rabota tonkostennykh stal'nykh sterzhney, predvaritel'no napryazhennykh vytyazhkoy stenki, pri sluchaynykh dinamicheskikh vozdeystviyakh. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 6(95):10-20. (in Russ.)

18. Song S., Qian Y., Liu J., Xie X., Wu G. Time-variant fragility analysis of the bridge system considering time-varying dependence among typical component seismic demands. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2019; Vol. 18. Issue 2: 363- 377.

19. Du Y., Hao J., Yu J., Yu H., Deng B., Lv D., Liang Z. Seismic performance of a repaired thin steel plate shear wall structure. *Journal of Constructional Steel Research*. 2018; 151: 194-203

20. Jalali S. A., Darvishan E. Seismic demand assessment of self-centering steel plate shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; 162: 105738

21. Mu Z., Yang Y. Experimental and numerical study on seismic behavior of obliquely stiffened steel plate shear walls with openings. *Thin-Walled Structures*. 2020; 146: 106457

22. Zhong S. C., Oyadiji S. O. Analytical predictions of natural frequencies of cracked simply supported beams with a stationary roving mass. *Journal of Sound and Vibration*. 2008; 311 (1-2): 328-352. DOI: 10.1016/j.jsv.2007.09.00923

23. Lien T. V., Duc N. T., Khiem N. T. Free and forced vibration analysis of multiple cracked FGM multi span continuous beams using dynamic stiffness method. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2019; 16 (2): 1-26. DOI: 10.1590/1679-78255242

24. Kravchuk V. A. Stal'nyye sterzhni, predvaritel'no napryazhennyye bez zatyazhek [Steel rods, prestressed without tightening.] Moscow, ASV, 2015. 550 p. (in Russ.)

### ВКЛАД СОАВТОРОВ

Кравчук Е. В. Руководство темой исследования. Формирование целей и задачи 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.

### CO-AUTHORS' CONTRIBUTION

Evgenii V. Kravchuk. Research topic management. Purposes and objectives of the study statement. State of the issue analysis. Material for the article preparation.

Igor Yu. Belutskii. Consulting on the use of a steel beam, prestressed by drawing a wall, in extreme conditions of bridge construction. State of the issue analysis. Material for the article preparation.

Valerii A. Kravchuk. Collection of bibliographic information. Article outline.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кравчук Евгений Валерьевич – ст. преподаватель кафедры «Строительство»; ст. преподаватель кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Тихоокеанского государственного университета, 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 AUTHORS

Evgenii V. Kravchuk – Senior Lecturer, the Construction Department of the Far Eastern State University of Communications, Senior Lecturer, the Industrial and Civil Engineering Department of the Pacific State University, SPIN: 2325-0177

Igor Yu. Belutskii – Associate Professor, Professor of the Roads Department, Pacific State University, SPIN-code: 4125-7182

Valerii A. Kravchuk – Professor, the Industrial and Civil Engineering Department, Pacific State University, SPIN-code: 3004-5213.

## 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 ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы предоставляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

**Общий порядок опубликования**

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятыми редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

- с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;
- согласие на обработку персональных данных в научном периодическом издании;

При регистрации присваивается дата поступления и регистрационный номер статьи. Статьи регистрируются через электронную редакцию. Регистрация осуществляется бесплатно.

**Первичная экспертиза на соответствие требованиям и профилю журнала (модерация).** Зарегистрированные рукописи статей проходят первичную экспертизу на соответствие требованиям и профилю журнала. Началом для экспертизы рукописи статьи редакцией является дата регистрации статьи. Редакция журнала оставляет за собой право отбора присылаемых материалов. Только прошедшие первичную экспертизу рукописи статей, полностью соответствующие требованиям редакции журнала, соответствующие профилю журнала, получают статус «Принята к рассмотрению». Для них отдельно регистрируется дата приема рукописи статьи к рассмотрению.

**Рецензирование.** Принятые к рассмотрению рукописи статей направляются на слепое рецензирование для оценки их научного содержания нескольким специалистам соответствующего профиля, членам редакционной коллегии и/или редакционного совета. Экспертиза и рецензирование осуществляются бесплатно.

Решение о принятии к публикации основывается на поступивших рекомендациях рецензентов журнала. Если принято решение «рекомендовать с учетом исправления отмеченных недостатков», то автору направляются рекомендации и вопросы для исправления. Рукопись статьи, скорректированная автором, повторно направляется на рецензирование. Рукописи статей, не рекомендованные к публикации, повторно не рассматриваются. Автору рукописи направляется мотивированный отказ в публикации.

**Редакционная подготовка.** Рукописи статей, принятые к публикации, проходят редакционную подготовку к публикации – литературное редактирование и сверку данных, корректуру, форматирование, макетирование. Общий срок редакционной подготовки статьи, успешно прошедшей рецензирование, составляет 2 месяца в соответствии с периодичностью и графиком публикации выпусков. 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.