

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



научный рецензируемый журнал

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

“Vestnik SibADI”

Том 22, № 2. 2025
Vol.22, No. 2. 2025

наука
science

creation
творчество

образование
education

innovations
инновации

technology
технологии

tradition
традиции

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

ВЕСТНИК СИБАДИ

THE RUSSIAN AUTOMOBILE AND HIGHWAY INDUSTRY JOURNAL

DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-2

TOM 22, № 2. 2025

VOL. 22, No. 2. 2025



Учредитель и издатель:

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

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ

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

Издается с 2004 года

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

Founder and Publisher:

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

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

EDITORIAL POSTAL ADDRESS

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

Published since 2004
by 6 issues per year

Subscription index is 66000
in the Ural-Press catalog

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

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

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

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

2.5.11. – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки),

2.9.1. – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки),

2.9.4. – Управление процессами перевозок (технические науки),

2.9.5. – Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки),

2.1.1. – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки),

2.1.5. – Строительные материалы и изделия (технические науки),

2.1.7. – Технология и организация строительства (технические науки),

2.1.8. – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки).

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

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

Журнал индексируется и архивируется:

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ);

в международной базе Dimensions;

международной интерактивной справочно-библиографической системе EBSCO;

международной реферативной базе периодических печатных изданий

Ulrichsweb Global Serials Directory;

международной базе открытых публикаций Google Академия;

международной электронно-библиотечной системе The European Library;

научном информационном пространстве «Соционет»;

электронном каталоге научно-технической литературы ВИНТИ РАН;

научной электронной библиотеке «Киберленинка»;

Directory of Open Access Journals (DOAJ SEAL);

CNKI scholar.

Журнал является членом:

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), CrossRef

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Подписано в печать 17.04.2025. Дата выхода в свет 28.04.2025. Формат 60×84 1/8 Гарнитура Arial. Печать оперативная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 27,25 Тираж 500 экз. Заказ 500 экз. Свободная цена. Отпечатано в типографии Издательско-полиграфического комплекса ФГБОУ ВО «СибАДИ», Россия, г. Омск, проспект Мира, д. 5.

Контент доступен под лицензией CC BY.

Поступившие в редакцию материалы не возвращаются.

Гонорары не выплачиваются.

Все статьи публикуются бесплатно.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

The journal is indexed and archived:

in Russian Index of Scientific Citations;

Dimensions;

EBSCO;

Ulrichsweb Global Serials Directory;

Google scholar

The European Library;

SOCIONET;

VINITI RAS;

Cyberlenika;

The Directory of Open Access Journals (DOAJ SEAL);

CNKI scholar.

The Journal is a member of

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

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



Signed in print on 17.04.2025. Publication date is 28.04.2025. Format is 60 × 84 1/4.

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

Content is available under license CC BY.

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

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Транспортное, горное и строительное машиностроение

Трояновская Ирина Павловна, д-р техн. наук, проф. Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия.
Scopus ID 57170706600, **Researcher ID** H-7490-2017, **ORCID** 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-ЮГРЫ», г. Сургут, Россия
Scopus Author ID 10040194400, **Researcher ID** AAM-4262-2021, **ORCID ID** 0000-0001-7843-7278

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL TEAM

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

Transport, mining and mechanical engineering

Irina P. Troyanovskaya, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia
Scopus ID 57170706600, **Researcher ID** H-7490-2017,
ORCID 0000-0003-2763-0515

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

Transport

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

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

Construction and architecture

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

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ
МАШИНОСТРОЕНИЕ***А.А. Серебренников, А.А. Плохов*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТАБЕЛЬНОЙ СНЕГОПЛАВИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ	172
---	------------

Е.А. Шишкин, А.А. Смоляков

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА УСКОРЕНИЯ ВИБРАЦИОННОГО ВАЛЬЦА В ПРОЦЕССЕ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА	182
---	------------

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ*Д.А. Дрючин, А.Д. Михайлов*

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ СВОЙСТВ ОХЛАДИТЕЛЕЙ НАДДУВОЧНОГО ВОЗДУХА В ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ	194
--	------------

С.А. Жесткова

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ЦЕНТРА МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ СХЕМЕ ДОСТАВКИ ТОВАРА	210
---	------------

А.Н. Котомчин, А.С. Янута, Е.Ю. Ляхов

ОБОСНОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОСАДОЧНЫХ МЕСТ ПОД ПОДШИПНИКИ ВАЛОВ ТРАНСМИССИИ ТРАНСПОРТА ЖЕЛЕЗО-ХРОМОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ	222
---	------------

А.Д. Плахтий, Д.С. Корчагин

ОБЗОР И ВЫБОР МЕТОДОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОДСЧЕТА ПАССАЖИРОВ НА ОБЩЕСТВЕННОМ НАЗЕМНОМ ТРАНСПОРТЕ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕВОЗКАМИ	238
--	------------

А.И. Фадеев, А.М. Ильянков, А.С. Поляков

ВЫБОР ВМЕСТИМОСТИ АВТОБУСОВ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ	248
---	------------

А.А. Цариков

ИССЛЕДОВАНИЕ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ ГОРОДОВ НА ПРЕДМЕТ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫДЕЛЕНИЯ ПОЛОС ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА	266
---	------------

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА*Аль-джабери Каррар Аббас Олейви, Эльшейх Ассер Мохамед, Аминов Амирхон Фаррухович*

ОЦЕНКА ПРЕИМУЩЕСТВ И ПРЕПЯТСТВИЙ ВНЕДРЕНИЯ BIM ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ (SFM) В ИРАКЕ	282
--	------------

В.А. Уткин, П.Н. Кобзев, Е.Е. Басич, В.В. Скиба

О РАЗВИТИИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ДЕРЕВОБЕТОННЫХ МОСТОВ	296
---	------------

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Anatoliy A. Serebrennikov, Andrey A. Plokhov

DETERMINATION OF OPERATING PARAMETERS OF MOBILE SNOW MELTING PLANT 173

Evgenij A. Shishkin, Alexander A. Smolyakov

**INVESTIGATION OF THE ACCELERATION SPECTRUM OF A VIBRATORY ROLLER
IN THE PROCESS OF SOIL COMPACTION 183**

PART II. TRANSPORT

Dmitriy A. Dryuchin, Alexandr D. Mikhailov

**ANALYSIS OF CHANGES IN HEAT EXCHANGE PROPERTIES
OF CHARGE AIR COOLERS IN AUTOMOTIVE VEHICLES' OPERATION..... 195**

Svetlana A. Zhestkova

**METHODOLOGY OF DETERMINING THE LOCATION OF THE DISTRIBUTION CENTER
OF MATERIAL FLOWS IN A COMBINED SCHEME OF GOODS DELIVERY 211**

Aleksei N. Kotomchin, Anton S. Januta, Evgenii Yiu. Lyakhov

**SUBSTANTIATING RESTORATION OF BEARINGS
MOUNTING AREA IN TRANSPORT TRANSMISSION SHAFTS WITH IRON-CHROME COATINGS 223**

A.D. Plakhtii, D.S. Korchagin

**REVIEW AND SELECTION OF METHODS FOR AUTOMATED PASSENGER COUNTING
ON PUBLIC LAND TRANSPORT FOR EFFECTIVE TRANSPORTATION MANAGEMENT 239**

Alexander I. Fadeev, Alexei M. Ilyankov, Andrei S. Polyakov

**EVALUATING PASSENGER CARRYING CAPACITY OF BUSES
FOR URBAN PUBLIC TRANSPORTATIONS 249**

A.A. Tsarikov

**STUDY OF THE URBAN STREET AND ROAD NETWORK FOR THE POSSIBILITY
OF ALLOCATING LANES FOR PASSENGER TRANSPORT 267**

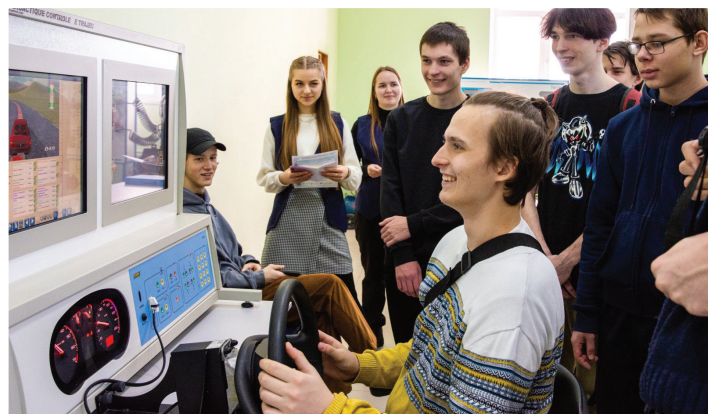
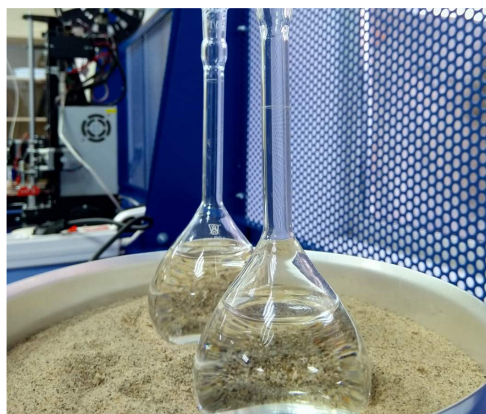
PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Al-jaberi Karrar Abbas Oleiwi, Elsheikh Asser Mohamed, Aminov Amirkhon Farrukhovich

**MEASURING ADVANTAGES AND CHALLENGES OF ADOPTING BIM
FOR SUSTAINABLE FACILITY MANAGEMENT IN IRAQ 283**

Vladimir A. Utkin, Pavel. N. Kobzev, Evgeny E. Basich, Victoria V. Skiba

ON DESIGN AND DEVELOPMENT OF WOOD-CONCRETE BRIDGE STRUCTURE..... 297



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



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

Научная статья
УДК 624.144.5
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-172-181>
EDN: TXGLIV



ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТАБЕЛЬНОЙ СНЕГОПЛАВИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

А.А. Серебренников, А.А. Плохов ✉
Тюменский индустриальный университет,
г. Тюмень, Россия
✉ ответственный автор
plokhov_a_a@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Освобождение территорий населенных пунктов в зимний период от выпавшего снега – актуальная задача. Ее эффективное решение необходимо для обеспечения безопасности дорожного движения и мобильности. С точки зрения обеспечения экологической безопасности целесообразно не вывозить собранный снег на специальные полигоны, а обеспечивать его плавление и сброс полученной взвеси в очистные сооружения за счет использования специализированных установок. На примере г. Тюмени показано, к какому значительному экологическому ущербу может привести использование снегоприемных полигонов (свалок).

Материалы и методы. Метод исследования на моделях, имеющих одинаковую физическую природу с оригиналом (физическое моделирование), считается наиболее приемлемым, так как на моделях может быть воспроизведен и зарегистрирован ход протекания процесса в зависимости от всего комплекса влияющих параметров. Научной основой физического моделирования является теория подобия и анализа размерностей, позволяющая посредством взаимозависимости безразмерных комплексов, характеризующих изучаемый процесс, обобщить полученные экспериментальные значения и распространить их на подобные технические системы.

Результаты. На основе анализа рабочего процесса снегоплавильных установок авторами предлагается конструкция, обеспечивающая большую интенсивность плавления за счет установки активаторов.

Обсуждение и заключение. Проведена проверка работоспособности конструкции и оценка влияния основных параметров на динамику рабочего процесса. Установлены геометрические и кинематические параметры активаторов рабочего процесса, осуществляющих движение по принципу сегнерова колеса за счет реактивных струй теплоносителя, воздействующего на снежно-ледяной массив.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: утилизация снега, интенсивность плавления, рабочий орган, физическое моделирование

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают глубокую признательность Тюменскому автотранспортному цеху Управления технологического транспорта и специальной техники – филиала ООО «Газпром трансгаз Сургут» в лице начальника управления Валентина Анатольевича Шаповала за оказанное содействие в изготовлении и проверке работоспособности опытно-промышленной установки. Авторы благодарят анонимных рецензентов за профессиональную оценку предоставленной к публикации работе.

Статья поступила в редакцию 24.12.2024; одобрена после рецензирования 21.02.2025; принята к публикации 17.04.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Серебренников А.А., Плохов А.А. Определение рабочих параметров транспортабельной снегоплавильной установки // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 2. С. 172-181. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-172-181>

© Серебренников А.А., Плохов А.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-172-181>

EDN:TXGLIV

DETERMINATION OF OPERATING PARAMETERS OF MOBILE SNOW MELTING PLANT

Anatoliy A. Serebrennikov, Andrey A. Plokhov ✉

Tyumen Industrial University,
Tyumen, Russia

✉ corresponding author
plokhov_a_a@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Clearing the territories of populated areas from fallen snow in winter is an urgent task. Its effective solution is necessary to ensure road safety and mobility. From the point of view of environmental safety, it is expedient not to remove the collected snow to special landfills, but to provide its melting and discharge of resulting suspension into treatment facilities by the applying of specialized installations. On the example of Tyumen city, it is shown the significant scale of environmental damage that can be caused by the use of snow-accepting landfills (dumps).

Materials and methods. The method of research on the models having the same physical nature with the original (physical modeling) is considered to be the most acceptable, as the whole cycle of the process depending on the full complex of influencing parameters can be reproduced and fixed on the models. The scientific basis of physical modeling is the theory of similarity and analysis of dimensions, which allows, by means of interdependence of dimensionless complexes characterizing the studied process, to generalize the obtained experimental values and to extend them to similar technical systems.

Results. Based on the analysis of the operating process of snow melting plants the authors propose a design that provides greater melting intensity due to the installation of activators.

Discussion and conclusion. The design performance was tested and the influence of the main parameters on the dynamics of the operating process was assessed. The geometric and kinematic parameters of the working process activators were established, which move according to the principle of a Segner's wheel due to the jet streams of the heater affecting the snow and ice massif.

KEYWORDS: snow disposal, melting intensity, operating unit, physical modeling

ACKNOWLEDGEMENT: The authors express their deep gratitude to the Tyumen Motor Transport Workshop of the Department of Technological Transport and Special Technical Equipment – a branch of “Gazprom Transgaz Surgut”, Limited Liability Company, represented by the head of Management department, Valentin Anatolyevich Shapoval, for the assistance provided in the manufacture and practical operability testing of the pilot sample of the industrial unit. The authors thank the anonymous reviewers for their professional assessment of the work submitted for publication.

The article was submitted: January 15, 2025; approved after reviewing: February 12, 2025; accepted for publication: April 17, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Serebrennikov A.A., Plokhov A.A. Determination of operating parameters of mobile snow melting plant. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (2): 172-181. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-172-181>

© Serebrennikov A.A., Plokhov A.A., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

В зимние периоды в населенных пунктах, расположенных на большинстве территорий Российской Федерации, необходимо решать задачу своевременной очистки жизнеобеспечивающих локаций от снежных осадков¹ [1]. Эта задача может быть своевременно и качественно решена только при наличии транспортно-технологических и транспортных средств необходимого перечня². В этот перечень всё чаще включаются и снегоплавильные установки (СПУ)³ [2, 3]. Целесообразность их использования подтверждается снижением транспортных расходов по вывозу снежно-ледовой массы до мест разгрузки⁴ [4]. В случаях использования СПУ, которые располагаются в пределах городской территории, транспортные плечи оказываются гораздо более короткими в отличие от расстояний, необходимых для транспортировки до полосы отвода снегоприёмных полигонов.

Но ещё в большей степени применение СПУ целесообразно с точки зрения обеспечения экологической безопасности [5, 6]. Зачастую территории и акватории в месте (и вокруг места) приема снега становятся ареалами недопустимого уровня негативного воздействия на окружающую среду и человека⁵ [7, 8, 9]. Например, по оценке специально созданной комиссии в 2022 г., ущерб от использования снежного полигона вблизи озера Песьяное в г. Тюмени, оценен в 77,5 млн руб.⁶ Общая площадь поврежденного участка, требующего рекультивации и восстановления земель, составила 29,3 га, такая же проблема существует и в других городах России⁷ [10, 11].

В целях неповторения подобного ущерба Администрацией г. Тюмени было оказано содействие инвестору и проведены все необходи-

мые организационные мероприятия по вводу в эксплуатацию двух дизельных транспортабельных снегоплавильных установок. Однако их использование в течение двух зимних сезонов показало, что заявленная производительность не достигается, а стоимость приема снежно-ледовой массы для плавления в несколько раз превышает ранее существующую (на полигонах). По этой причине хозяйствующие субъекты, осуществляющие деятельность, размещающаяся на значительных площадях, вынуждены искать альтернативные решения и снижать непроизводительные затраты, связанные с утилизацией снежно-ледовой массы.

В частности, одно из подразделений ООО «Газпром трансгаз Сургут», располагающееся в г. Тюмени и имеющее необходимые ресурсы (транспортные, транспортно-технологические средства, инфраструктурные объекты), привлекло научный потенциал Тюменского индустриального университета для разработки и создания эффективной конструкции снегоплавильной установки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучение рабочего процесса по обеспечению фазового перехода снежно-ледовой массы (из твердого состояния в жидкое) осложняется тем, что он протекает в гетерогенной (неоднородной) среде, состоящей из массива с разными характеристиками отдельных частей (по размерам включений, плотности, наличию примесей) во взаимодействии с теплоносителем. Использование методов исследования структуры потоков или метода математического моделирования в таких случаях, как правило, не позволяют достаточно достоверно и в полной мере отразить физическую сущность рассматриваемого процесса [12].

¹ Паршаков Н.А., Чабанова Е.В. Проблема утилизации снега при содержании улично-дорожной сети в зимний период в Кировском районе г. Перми // Химия. Экология. Урбанистика. 2024. Т. 3. С. 178–181. EDN AZHPVL.

² Шенюгин М.В., Данилина А.А. Повышение эффективности городских коммунальных служб путем внедрения современных снегоплавильных установок // Вестник магистратуры. 2021. № 5-6(116). С. 36–37. EDN IXZVRU.

³ Дю Х.Д. Применение мобильных снегосплавных пунктов в России // Студенческий вестник. 2022. № 41-6(233). С. 47–48. EDN ZFPXVG.

⁴ Васильев А.П., Ушаков В.В. Анализ современного зарубежного опыта зимнего содержания дорог и разработка предложений по его использованию в условиях России. М.: Информавтодор, 2003. 60 с.

⁵ Серебренников А.А. Методы математического моделирования процессов смешивания // Проблемы адаптации техники к суровым условиям. Доклады международной научно-практической конференции. Тюмень: ТюмГНГУ, 1999. С. 214–218.

⁶ Кондратенко Т.Е., Морозов И.В. Снегоплавильные установки для утилизации снега в г. Хабаровске // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2023. № 1. С. 108–112. EDN CYLWVP.

⁷ Гатауллина И.М. Применение снегоплавильной установки с тепловым насосом // Инженерные кадры - будущее инновационной экономики России. 2020. № 1. С. 29–31. EDN RCZZXL.

Метод исследования на моделях, имеющих одинаковую физическую природу с оригиналом (физическое моделирование), является наиболее приемлемым, так как на моделях может быть воспроизведен и зарегистрирован ход протекания процесса в зависимости от всего комплекса влияющих параметров. Научной основой физического моделирования является теория подобия и анализа размерностей, позволяющая посредством взаимозависимости безразмерных комплексов, характеризующих изучаемый процесс, обобщить полученные экспериментальные значения и распространить их на подобные технические системы [13].

В качестве первой физической модели была использована снегоплавильная установ-

ка, изготовленная на предприятии на базе двухосного автомобильного прицепа (рисунок 1).

Наблюдения за интенсивностью фазового перехода при изменениях температуры теплоносителя производились совмещением фотографического и термографического методов. Реальная картина протекания рабочего процесса фиксировалась цифровой камерой и тепловизором (рисунок 2).

Тепловизор имел высокую чувствительность, позволяющую отличать разницу температур двух соседних участков в $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$. Широкоугольная линза (угол обзора 32°) обеспечивала возможность фиксации распределения температур на больших площадях наблюдения.



Рисунок 1 – Снегоплавильная установка на базе автоприцепа:
а – общий вид установки; б – общий вид рабочего процесса
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Trailer-based snow melting plant
a – snow melting plant (overall view),
b – the operating process (overall view),
Source: compiled by the authors.



Рисунок 2 – Типовой кадр фиксации рабочего процесса:
а – общий вид; б – инфракрасное изображение
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Typical workflow frame record:
a – overall view; b – infrared view.
Source: compiled by the authors.

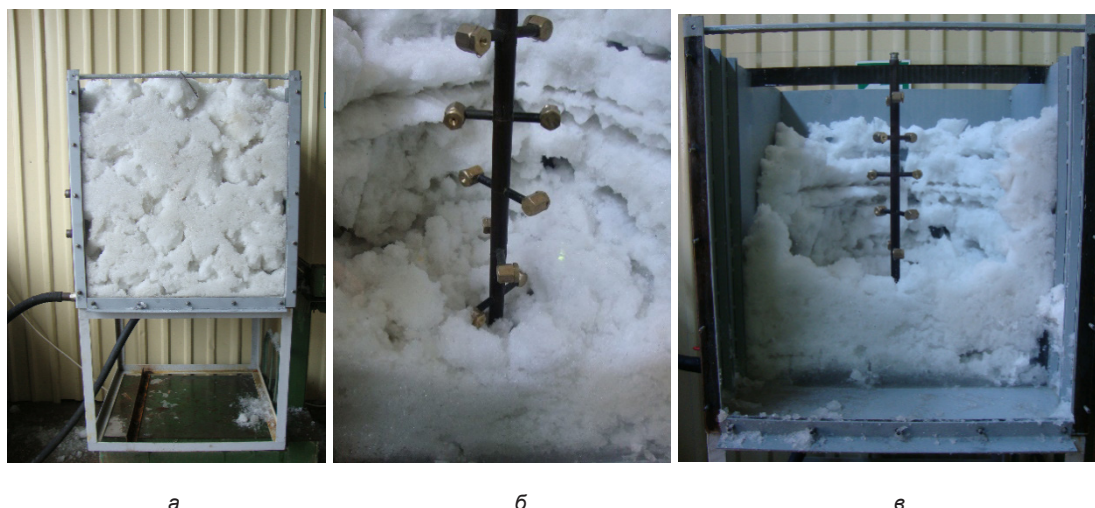


Рисунок 3 – Лабораторная физическая модель:
 а – общий вид после загрузки; б – типовой кадр фиксации рабочего процесса;
 в – общий вид после изменения объема бункера
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Laboratory physical model:
 а – overall view after loading, б – typical workflow frame record,
 в – overall view after changing the volume of the hopper
 Source: compiled by the authors.

Детальное описание устройства представлено в патенте⁸. Прежде всего, необходимо было проверить работоспособность предлагаемой конструкции⁹ [14, 15]. Проверка производилась на лабораторной физической модели (рисунок 3).

Кроме того, перемещаемая передняя стенка, изготовленная из оргстекла, обеспечивала возможность фиксации количества снега с течением времени работы и тем самым оценки интенсивности процесса плавления.

В отличие от стационарных снегоплавильных пунктов, в транспортабельных СПУ снежно-ледовая масса загружается в плавильную емкость, после чего на нее подается горячая вода через форсунки, расположенные по периметру верхнего контура емкости.

Далее весь массив, находящийся в окружении теплоносителя, подвергается процессам, возникающим на любой границе раздела двух фаз и приводящим к изменению свойств вещества при переходе от тела массива к межфазным поверхностным слоям¹⁰.

Для наблюдения за этими процессами проведен ряд экспериментов по выяснению влияния температуры теплоносителя, плотности снежно-ледовой массы и наличия механических примесей на скорость плавления.

Процедура наблюдений и измерений осуществлялась в специально подготовленной емкости, в которой температура теплоносителя поддерживалась на заданной величине.

После взвешивания каждого образца он принудительно при помощи щипцового захвата погружался в емкость. Вытесненная образцом вода стекала на лоток, расположенный под емкостью, и замерялся ее объем. Зная массу и фактический объем, устанавливалась плотность каждого образца. Время плавления фиксировалось, и определялись требуемые зависимости.

Характер и интенсивность протекания рабочего процесса в предлагаемой конструкции СПУ во многом зависит от вида форсунок и величины давления, подаваемого через форсунки теплоносителя [16, 17].

⁸ Пат. 189774 Российская Федерация, МПК E01H 5/10. Установка для плавления снега: № 2019100267: заявл. 09.01.2019; опубл. 03.06.2019 / Серебренников А.А., Мерданов Ш.М., Шаруха А.В., Плохов А.А.; патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет» (ТИУ).

⁹ Серебренников А.А., Плохов А.А., Панов В.И. Рекомендации по созданию стационарной установки таяния снега // Проблемы функционирования систем транспорта: материалы Междун. науч.- практ. конф. Тюмень, 2016. Т 5. С. 113–117.

¹⁰ Фролов Ю.Г. Коллоидная химия: поверхностные явления и дисперсные системы. М.: Альянс, 2014. 464 с.



Рисунок 4 – Общий вид воздействия на снежный массив:
а – форсунка с углом распыла 65°; б – форсунка с углом распыла 30°
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – The impact overall view on the snow massif
а – nozzle with a spray angle 65°; б – nozzle with a spray angle 30°
Source: compiled by the authors.

Экспериментальные исследования проводились на специально сформированном полигоне, представляющем собой вертикальную снежную стенку длиной 20 м (рисунок 4). Снежно-ледовая масса имела плотность, близкую к требуемой для наблюдений [18, 19].

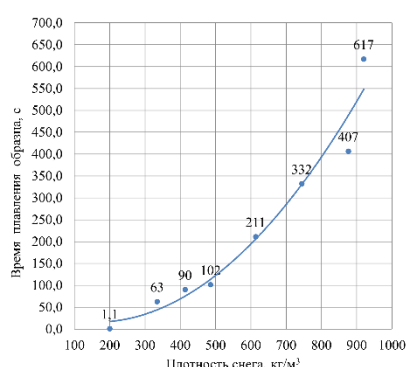
Таким образом, произведен необходимый комплекс экспериментов, устанавливающий влияние основных параметров на протекание рабочего процесса плавления снежно-ледовой массы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

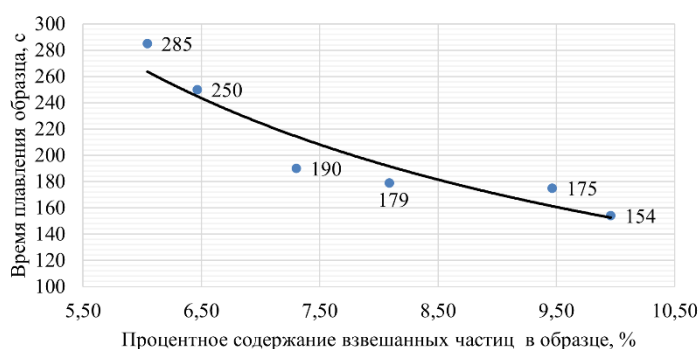
На опытном образце установлено, что конструкции транспортабельных СПУ, предлагаемые производителями к использованию, обеспечивают интенсивное плавление снежно-ледовой массы только в начальный период

работы установки. После того, как примерно 20% от общего загруженного объема оказываются расплавлены, интенсивность рабочего процесса резко замедляется. Объясняется это тем, что снежно-ледовая масса располагается в центре приемной емкости и подобно айсбергу на водном пространстве имеет ограниченную площадь контакта с теплоносителем. Давление, которое обеспечивает подачу теплоносителя через форсунки, гасится толщей воды, находящейся вокруг массы снега, и не достигает необходимого увеличения площади межфазной поверхности (рисунок 5).

Установлено влияние физико-механических характеристик на интенсивность протекания рабочего процесса. Подробное описание методики и условий проведения экспериментальных исследований опубликованы ранее [19].



а



б

Рисунок 5 – Динамика плавления снежно-ледового массива в зависимости:
а – от плотности; б – от содержания механических примесей
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Dynamics of snow-ice massif melting depending on:
а – density, б – the content of mechanical impurities
Source: compiled by the authors.

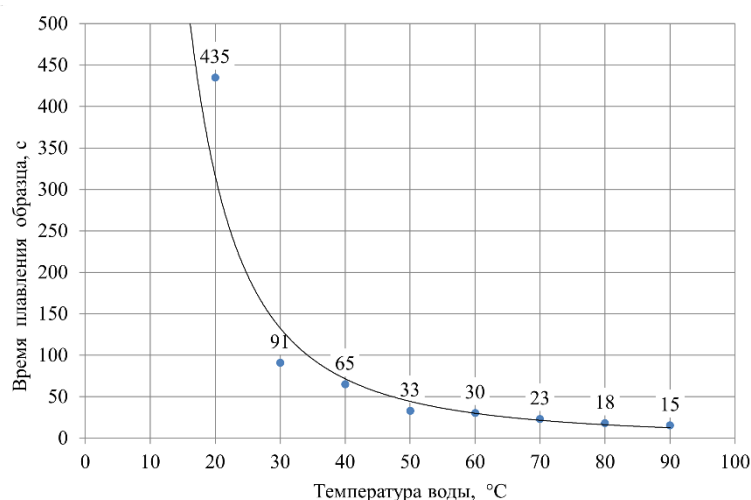


Рисунок 6 – Динамика плавления снежно-ледового массива в зависимости от температуры воды
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Dynamics of snow-ice melting depending on water temperature
Source: compiled by the authors.

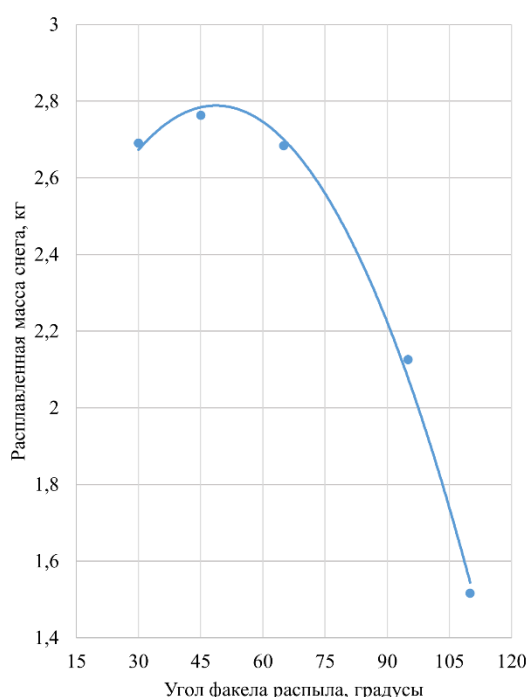


Рисунок 7 – Влияние угла факела распыла на рабочий процесс
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – The spray angle influence on the workflow
Source: compiled by the authors.

Доказано, что температура теплоносителя является наиболее важным фактором, определяющим скорость плавления (рисунок 6).

Установлено, что наибольшую эффективность обеспечивают плоскоструйные форсунки, с факелом распыла 45 градусов (рисунок 7). Интенсивность плавления по глубине исследована при постоянном давлении (1.5 атмосферы). Такое давление являлось минимально необходимым для активации рабочего органа и обеспечивало воздействие на 0,7 м по глубине массива.

Зная оптимальный угол факела распыла, можно просчитать шаг установки и тем самым количество форсунок для конкретного типа-размера СПУ.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После того, как было выявлено влияние основных параметров на рабочий процесс, возникает необходимость проверки, насколько расчетная (прогнозируемая) интенсивность течения рабочего процесса будет соответствовать действительной.

Проверку можно провести только в том случае, если имеется работающая снегоплавильная установка.

На основе результатов исследований и сформулированных рекомендаций было принято решение об изготовлении на предприятии СПУ с емкостью бункера ~ 7,5 куб. м (2,0 м x 3,7 м x 1,0 м). По произведенным расчетам СПУ таких размеров с установленными и рекомендованными на основании проведенных исследований параметрами рабочего процесса должна была составить 12–13 м³/ч.

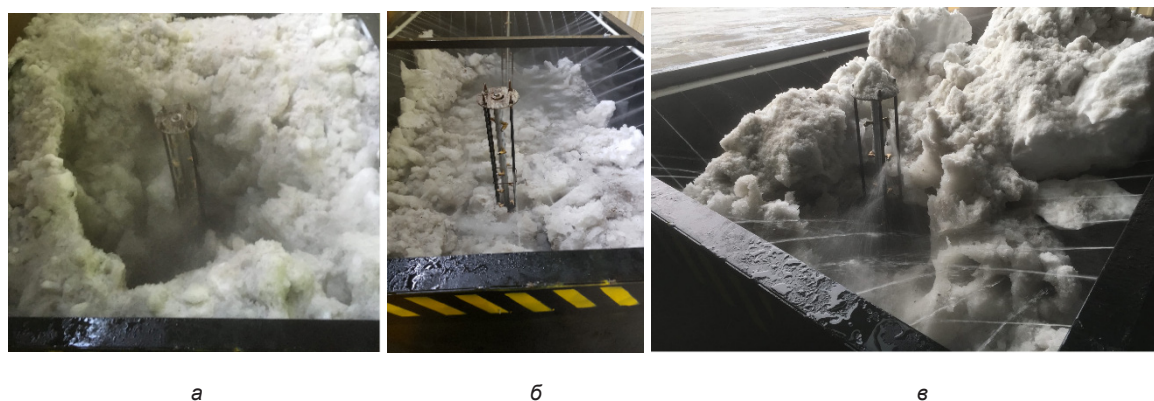


Рисунок 8 – Общие виды рабочего процесса при подаче теплоносителя:
а – через активаторы; б – через контур орошения; в – совместное воздействие
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Overall view of the workflow supplying the heat
a – through activators, b – through the irrigation circuit, c – combined influence
Source: compiled by the authors.

После изготовления и проверки работоспособности проведены три серии экспериментов. В соответствии с выработанными рекомендациями [16] исследования на физической модели проводились при плотности снежно-ледовой массы $\approx 600 \pm 50 \text{ кг/м}^3$ и температуре теплоносителя $\approx 30^\circ\text{C}$. Ранее было доказано [16], что наличие взвешенных частиц, вмержших в снежно-ледовую массу, будет незначительно ускорять процесс плавления, поэтому контроль этого параметра в дальнейшем не проводился.

В первой серии СПУ загружалась снегом и осуществляла принудительное плавление снежных масс при помощи подачи теплоносителя только через рабочие органы – активаторы (рисунок 8, а).

Время от начала орошения и до полного плавления снега фиксировалось.

В первой серии экспериментов среднее время плавления составило 37 мин 30 сек, т.е. интенсивность плавления составила расчётные $12 \text{ м}^3/\text{ч}$. Во второй серии экспериментов СПУ проводила плавление снежных масс при помощи верхнего контура орошения (рисунок 8, б).

Среднее время плавления снега составило 45 мин 45 сек. Таким образом, производительность при использовании традиционного способа плавления оказалась на 22% меньше.

В третьей серии экспериментов плавление снежных масс происходило комбинированным способом (рисунок 8, в). Одновременно осуществлялась подача теплоносителя через активаторы, а также через систему орошения, установленную по периметру верхнего конту-

ра бака. Среднее время плавления снежных масс составляет 35 мин 15 сек.

Таким образом, комбинированный способ подачи теплоносителя целесообразен в первоначальный период (после заполнения бункера). Однако наблюдением установлено, что по истечении 15–20 мин работы верхний контур орошения целесообразно отключать, так как его воздействие с этого момента интенсивность не увеличивает и, следовательно, приводит к неоправданным энергозатратам.

Рабочий процесс СПУ может быть интенсифицирован за счет увеличения межфазной поверхности посредством разрушения массива снежно-ледовой массы.

На основе анализа сформированного банка данных по наблюдению за рабочим процессом и тенденций, полученных исходя из патентного анализа, доказано, что могут быть предложены более совершенные конструкции, обеспечивающие интенсификацию рабочего процесса.

Раскрыто влияние физико-механических характеристик снежно-ледяного массива на процесс его фазового перехода из твердого состояния в жидкое.

Установлены геометрические и кинематические параметры активаторов рабочего процесса, осуществляющих движение по принципу сегнерова колеса за счет реактивных струй теплоносителя, воздействующего на снежно-ледяной массив.

Подтверждена методика определения влияния основных параметров на протекание рабочего процесса плавления снежно-ледового массива.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Строкин А.С., Чудайкин А.Д., Поляков Р.С. Экологические проблемы утилизации снега в городе // *Высокие технологии в строительном комплексе*. 2019. № 2. С. 56–60. EDN MVAFNJ.
2. Кулдошина В.В., Жогаль А.В., Лупунчук М.Ю. Современные подходы к решению проблем утилизации снега // *Международный технико-экономический журнал*. 2018. № 5. С. 79–84. EDN YUZNVR.
3. Попов В.Г., Попов А.В., Жигулина Т.Н. Новые технологии и машины для сбора и утилизации снежного покрова // *Строительные и дорожные машины*. 2020. № 12. С. 31–40. EDN DCYXZV.
4. Заиченко П.Д., Заиченко Н.Д. Исследование работы снегоплавильных установок и систем утилизации снега // *Проблемы экспертизы в автомобильно-дорожной отрасли*. 2024. № 3(12). С. 56–64. EDN XLRUQI.
5. Канунников И.Н. Сравнительный анализ эксплуатационных характеристик снегоплавильных установок с различными типами теплообменников // *Актуальные исследования*. 2024. № 16-1(198). С. 35–38. EDN UFVYQQ.
6. Полетаев И.Ю. Использование новых технологических процессов и их влияние на оценку мероприятий по повышению энергоэффективности в регионе (на примере снижения негативных экологических последствий по утилизации снега в городах РФ) // *Вопросы региональной экономики*. 2021. № 4(49). С. 101–106. EDN PIQCQL.
7. Тарасов О.Ю., Крапивина Н.Ю. [и др.]. Городские снежные свалки как источник загрязнения поверхностных вод // *Георесурсы*. 2011. № 2. С. 31–33.
8. Дроздова А.Д., Смирнова С.В. Разработка информационно-измерительного канала управления мобильной снегоплавильной установки // *Вестник НЦБЖД*. 2022. № 3(53). С. 174–183. EDN JVEUXJ.
9. Ермаков М.Т., Рожкова О.В., Сандибекова С.Г., Толысбаев Е.Т. Проблемы утилизации снега и прогрессивные пути решения в условиях города Нур-Султана // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2021. № 1(85). С. 20–29. DOI: <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2021.26.1.20-29>. EDN QUKTXS.
10. Лобкина В.А., Михалев М.В. Оценка опыта эксплуатации снежных полигонов в России, альтернативные способы борьбы со снегом // *Экология и промышленность России*. 2019. Т. 23, № 1. С. 60–65. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-1-60-65>. EDN YSZPQD.
11. Новичков С.В., Ростунцова И. А., Щеголева Н.В. Использование теплоты уходящих газов водогрейной котельной для утилизации снежной массы // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2019. № 5. С. 20–24. DOI: <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2019-5-20-24>. EDN TBRQAV.
12. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред: монография. Главная редакция физи-

ко-математической литературы издательства «Наука». М., 1978, 336 с.

13. Корецкий В.Е. Моделирование процесса таяния снега в снегоплавильной камере // *Вестник МГСУ*. 2008. № 2. С. 173–179.

14. Серебренников А.А., Плохов А.А. Влияние специального рабочего органа на интенсивность плавления снежной массы // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2020. № 10. С. 476–483.

15. Серебренников А.А., Плохов А.А. Физическое моделирование рабочего процесса снегоплавильной установки с активным рабочим органом // *Экологические системы и приборы*. 2020. № 12. С. 26–35.

16. Пушкарев А.Е., Головин К.А., Абросимова А.А. [и др.] Экспериментальные исследования процесса формирования гидроабразивной струи и разрушения снежно-ледяных отложений гидроструйным инструментом // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2024. № 7. С. 499–502. DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-7-499-500>. EDN IZPWPY.

17. Репин С.В., Пушкарев А.Е., Воронцов И.И. [и др.]. Разработка новой машины для очистки дорог от снежно-ледяных образований // *Строительные и дорожные машины*. 2022. № 4. С. 33–37. EDN ZMBZPK.

18. Серебренников А.А., Плохов А.А. Динамика процесса тепловой утилизации снега в зависимости от основных факторов // *Экологические системы и приборы*. 2019. № 7. С. 3–11.

19. Егоров А.Л., Мерданов Ш.М., Костырченко В.А., Мадьяров Т.М. Повышение производительности снеготаялки за счет установки дополнительного рабочего органа // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 2-2. С. 251–254. EDN VORLRT.

REFERENCES

1. Strokin A.S., Chudaykin A.D., Polyakov R.S. The environmental problem of disposing of snow in the city. *Scientific-and-Technical Journal. High technologies in construction complex*. 2019; 2: 56–60. (in Russ.) EDN MVAFNJ.
2. Kuldoshina V.V., Zhogal A.V., Lupunchuk M.Yu. Modern approaches to solution of problems of utilization of snow. *International Technical and Economic Journal*. 2018; 5: 79–84. (in Russ.) EDN YUZNVR.
3. Popov V.G., Popov A.V., Zhigulina T.N. New technologies and machines for collecting and recycling snow cover. *Construction and road machines*. 2020; 12: 31–40. (in Russ.) EDN DCYXZV.
4. Zaichenko P.D., Zaichenko N.D. Research of snow melting plants and snow recycling systems. Automotive and Road expert evaluation. *Automotive and Road expert evaluation*. 2024; 3(12): 56–64. (in Russ.) EDN XLRUQI.
5. Kanunnikov I.N. Comparative analysis of the performance characteristics of snow-melting plants with different types of heat exchangers. *Aktualnye*

issledovaniya. 2024; 16-1(198): 35–38. (in Russ.) EDN UFVYQQ.

6. Poletaev I.Yu. The use of new technological processes and their impact on the assessment of energy efficiency measures in the region (on the example of reducing the negative environmental consequences of snow disposal in Russian cities). *Voprosy regionalnoy ekonomiki*. 2021; 4(49): 101–106. (in Russ.) EDN PIQCQL.

7. Tarasov O. Yu., Krapivina N. Yu. et al. Urban snow dumps as a source of surface water pollution. *Georesources*. 2011; 2: 31–33. (in Russ.)

8. Drozdova A.D., Smirnova S.V. Development of an information and measurement control channel for a mobile snow melting plant. *Vestnik NTsBZhD*. 2022; 3(53): 174–183. (in Russ.) EDN JVEUXJ.

9. Ermekov M.T., Rozhkova O.V., Sandibekova S.G., Tolysbaev E.T. Challenges of snow disposal and innovative solutions in the conditions of nur-sultan. *Water and Ecology: Problems and Solutions*. 2021; 1(85): 20–29. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2021.26.1.20-29>. EDN QUKTXS.

10. Lobkina V., Mikhalev M. Assessment of Operating Experience of Snow Polygons in Russia, Alternative Ways of Dealing with Snow. *Ecology and Industry of Russia*. 2019; 23(1): 60–65. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-1-60-65>

11. Novichkov S.V., Rostuntsova I.A., N.V. Shchegoleva Boiler house exhaust gases heat for snow disposal. *Energy efficient technologies*. 2019, No. 5. P. 20–24. DOI: <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2019-5-20-24>. (in Russ.) EDN TBRQAV.

12. Nigmatulin R.I. Fundamentals of the mechanics of heterogeneous media. *Main edition of physical and mathematical literature of the publishing house «Nauka»*. Moscow, 1978: 336. (in Russ.)

13. Koretsky V. E. Modeling the process of snow melting in a snow-melting chamber. *Vestnik MGSU*. 2008; 2: 173–179. (in Russ.)

14. Serebrennikov A.A., Plokhov A.A. Influence of a special working body on the intensity of melting of snow mass. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU)*. 2020; 10: 476–483. (in Russ.)

15. Serebrennikov A. A., Plokhov A. A. Physical modeling of the working process of a snow-melting installation with an active working body. *Ecological systems and devices*. 2020; 12: 26–35. (in Russ.)

16. Pushkarev A.E., Golovin K.A., Abrosimova A.A. [etc.] Experimental studies of the process of formation of a water-abrasive jet and destruction of snow-ice deposits with a hydraulic jet tool. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU)*. 2024; 7: 499–502. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-7-499-500>. EDN IZPWPY.

17. Repin S.V., Pushkarev A.E., Vorontsov I.I. [etc.] Development of a new machine for cleaning roads from snow and ice formations. *Construction and road machines*. 2022; No. 4: 33–37. (in Russ.) EDN ZMBZPK.

18. Serebrennikov A.A., Plokhov A.A. Dynamics of the process of thermal utilization of snow depending

on the main factors. *Ecological systems and devices*. 2019; 7: 3–11. (in Russ.)

19. Egorov A.L., Merdanov Sh.M., Kostyrchenko V.A., Madyarov T.M. Improving performance snow melting by installing additional working bodies. *Fundamental Research*. 2016; 2-2: 251–254. (in Russ.) EDN VORLRT.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Серебренниковым А.А. Методика, экспериментальная и аналитическая составляющие научно-го синтеза разрабатывались и реализовывались.

Плоховым А.А. Методика, экспериментальная и аналитическая составляющие научного синтеза разрабатывались и реализовывались.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Serebrennikov A.A. The methodology, experimental and analytical components of scientific synthesis development and implementation.

Plokhov A.A. The methodology, experimental and analytical components of scientific synthesis development and implementation.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Серебренников Анатолий Александрович – д-р техн. наук, проф. Тюменского индустриально-го университета, главный научный сотрудник (625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1649-5269>,

SPIN-код: 7915-6839

e-mail: sereb_a_a@mail.ru

Плохов Андрей Александрович – ассистент Тюменского индустриального университета, (625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38); инженер II категории ПТО, ООО «Газпром трансгаз Сургут» УТТУСТ Тюменский АТЦ (Старый Тобольский тракт, 6-й километр, д. 16).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6268-0396>

SPIN-код: 4799-9875

e-mail: plokhov_a_a@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Serebrennikov Anatoliy A.I. – Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Tyumen Industrial University, Chief Researcher (38, Volodarsky Street, Tyumen, 625000).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1649-5269>,

SPIN-code: 7915-6839

e-mail: sereb_a_a@mail.ru

Plokhov Andrey A. – Assistant of Tyumen Industrial University, (38, Volodarsky Street, Tyumen, 625000); Engineer of the 2nd category, Production and Technical Department, "Gazprom Transgaz Surgut" Limited Liability Company, Administration of Technological Transport and Special Equipment, "Tyumen Agrotechnical Center" Joint Stock Company (building 16, the 6-th kilometer, Staryi Tobolskiy Trakt, Tyumen).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6268-0396>

SPIN-code: 4799-9875

e-mail: plokhov_a_a@mail.ru

Научная статья
УДК 625.084
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-182-192>
EDN: WLRDCA



ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА УСКОРЕНИЯ ВИБРАЦИОННОГО ВАЛЬЦА В ПРОЦЕССЕ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА

Е.А. Шишкин ✉, А.А. Смоляков

Тихоокеанский государственный университет,
г. Хабаровск, Россия

✉ ответственный автор
004655@togudv.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Успешный контроль качества играет важнейшую роль при работах по уплотнению дорожных покрытий. Основным инструментом непрерывного контроля уплотнения является частотный анализ спектра вибрационного ускорения вальца. Существует несколько показателей, для определения которых используют различные гармоники частотного спектра ускорения. Однако эти показатели имеют ряд недостатков, среди которых низкая точность и ограниченная область применения. Цель исследования – разработка универсального показателя уплотнения, исключающего указанные недостатки.

Материалы и методы. В среде Simulink создана одномассовая колебательная модель, описывающая взаимодействие системы «вибрационный валец – грунт». Модель позволяет изменять параметры грунта, такие как жесткость и вязкость, а также рабочие параметры вибрационного катка – амплитуду и частоту вибрации. Для исследования частотного спектра ускорения вальца применялось быстрое преобразование Фурье.

Результаты и обсуждение. В результате моделирования были получены частотные спектры ускорения вибрационного вальца для различных режимов работы катка. Вследствие анализа полученных данных предложен новый показатель степени уплотнения.

Заключение. На основе предложенного показателя разработана методика определения момента времени смены режима периодической потери контакта на режим «двойного прыжка». Внедрение методики в производственную практику позволит повысить эффективность процесса уплотнения грунтов вибрационным катком.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорожный каток, вибрационный валец, уплотнение грунта, контактная сила, частота вибрации, амплитуда вибрации, показатель степени уплотнения

Статья поступила в редакцию 27.12.2024; одобрена после рецензирования 17.02.2025; принята к публикации 17.04.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Исследование спектра ускорения вибрационного вальца в процессе уплотнения грунта // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 2. С. 182-192. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-182-192>

© Шишкин Е.А., Смоляков А.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-182-192>

EDN: WLRDCA

INVESTIGATION OF THE ACCELERATION SPECTRUM OF A VIBRATORY ROLLER IN THE PROCESS OF SOIL COMPACTION

Evgenij A.I. Shishkin ✉, Alexander A. Smolyakov

Pacific National University,
Khabarovsk, Russia

✉ corresponding author
004655@togudv.ru

ABSTRACT

Introduction. Successful quality control plays a crucial role in pavement compaction work. The main tool for continuous compaction monitoring is the frequency analysis of the vibratory acceleration spectrum of the roller. There are several indicators that are determined by the different harmonics of the acceleration frequency spectrum use. However, these indicators have a number of disadvantages, among which are low accuracy and limited scope of application. The aim of the study is to develop a universal compaction indicator that eliminates these disadvantages.

Materials and methods. A single-mass oscillatory model describing the interaction of the system “vibratory roller – soil” has been created in Simulink environment. The model allows changing the soil parameters, such as stiffness and viscosity, as well as the operating parameters of the vibratory roller – amplitude and frequency of vibration. Fast Fourier transformation was used to study the frequency spectrum of roller acceleration.

Results. As a result of modeling, frequency spectra of acceleration of the vibrating roller for different modes of roller operation were obtained. Through the analysis of the obtained data, a new indicator of compaction degree was proposed.

Conclusion. On the basis of the proposed indicator the technique of determining the moment of time change from the periodic loss of contact (the partial uplift mode) to “double jump” mode is developed. Implementation of the methodology in operating performance will improve the efficiency of the process of soil compaction by a vibratory roller.

KEYWORDS: road roller, vibratory roller, soil compaction, contact force, vibration frequency, vibration amplitude, compaction index

The article was submitted: December 27, 2024; approved after reviewing: February 17, 2025; accepted for publication: April 17, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Investigation of the acceleration spectrum of a vibratory roller in the process of soil compaction *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (2): 182-192. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-182-192>

© Shishkin E.A., Smolyakov A.A., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Контроль процесса уплотнения грунта в режиме реального времени обеспечивает долговечность дорожных покрытий. Технологии непрерывного контроля уплотнения предоставляют информацию о жесткости грунта в виде показателя степени уплотнения [1], который чаще всего основан на частотном анализе данных об ускорении вибрационного вальца [2, 3].

Типичный и наиболее эффективный режим работы вибрационного катка принято называть периодическим отрывом [4]. В данном режиме происходит потеря контакта вибрационного вальца с грунтом в каждом периоде возбуждения. В результате экспериментальных исследований режима периодического отрыва фирмой Geodynamics и компанией Дунпарас установлена корреляция между жесткостью грунта и отношением амплитуды первой гармоники ускорения вальца к амплитуде основной частоты вибрации [5]. Показатель степени уплотнения CMV (Compaction Meter Value), основанный на указанной корреляции, определяется по формуле

$$CMV = C \frac{A_{2f}}{A_f}, \quad (1)$$

где C – коэффициент, устанавливаемый при калибровке в производственных условиях; A_{2f} – амплитуда спектра ускорения вальца на частоте в 2 раза превышающей частоту возбуждения; A_f – амплитуда спектра ускорения вальца на частоте возбуждения.

Увеличение жесткости грунта в процессе уплотнения может привести к изменению режима работы катка на нежелательный режим «двойного прыжка», при котором амплитуда колебаний вальца повторяется каждый второй период возбуждения. В этом режиме в спектре ускорения вальца появляется пик на половине частоты возбуждения [5, 6]. Следовательно, показатель CMV не может быть использован в данном режиме.

Работа в режиме «двойного прыжка» может приводить к разрушению уплотняемого материала, а также к повышенному износу вальца [7, 8]. Для режима «двойного прыжка» показатель степени уплотнения RMV (Resonance Meter Value) определяется по формуле

$$RMV = C_1 \frac{A_{0,5f}}{A_f}, \quad (2)$$

где C_1 – коэффициент, устанавливаемый при калибровке в производственных условиях; $A_{0,5f}$ – амплитуда спектра ускорения вальца на частоте, равной половине частоты возбуждения.

Компанией SAKAI разработан показатель степени уплотнения CCV (Compaction Control Value), определяемый зависимостью [9]:

$$CCV = C_2 \frac{A_{0,5f} + A_{1,5f} + A_{2f} + A_{2,5f} + A_{3f}}{A_{0,5f} + A_f}, \quad (3)$$

где $A_{1,5f}$ – амплитуда спектра ускорения вальца на частоте в 1,5 раза превышающей частоту возбуждения; $A_{2,5f}$ – амплитуда спектра ускорения вальца на частоте в 2,5 раза превышающей частоту возбуждения; A_{3f} – амплитуда спектра ускорения вальца на частоте в 3 раза превышающей частоту возбуждения; C_2 – коэффициент, устанавливаемый при калибровке в производственных условиях.

В ходе экспериментальных исследований [10, 11] установлено, что амплитуды спектра ускорения вальца $A_{1,5f}$, $A_{2,5f}$ имеют сравнительно низкое значение. С учетом окружающих помех это обстоятельство отрицательно сказывается на точности установления момента изменения режима работы катка на «двойной прыжок». В результате может произойти разрушение уплотняемого покрытия [12, 13].

Кроме этого, общим недостатком показателей (1), (2), (3) является отсутствие методики определения экспериментальных коэффициентов C , C_1 , C_2 [14, 15, 16, 17].

Таким образом, решение задачи повышения точности измерения текущей жесткости грунта путем разработки универсального показателя уплотнения позволит избежать перехода вибрационного катка к нежелательному режиму работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Моделирование взаимодействия вибрационного вальца дорожного катка с уплотняемым материалом является одним из способов изучения динамики процесса уплотнения [17, 18, 19].

Исследования процесса уплотнения грунта привели к появлению широкого спектра моделей. Если пренебречь динамическими силами упругой подвески рамы катка [20] и рассматривать только статическую массу рамы, то модель колебательной системы «вальец – грунт» будет иметь вид, приведенный на рисунке 1, где грунт при уплотнении пред-

ставлен эквивалентной жесткостью c и вязким демпфированием μ . Многочисленные исследования подтверждают, что эта модель достаточно адекватно отражает поведение грунта при уплотнении [21, 22, 23, 24].

Дифференциальное уравнение колебательной системы «валец – грунт» (см. рисунок 1) имеет вид [20]

$$m_e \ddot{z}(t) + \mu \dot{z}(t) + cz(t) = m_0 r_0 \omega^2 \cos(\omega t), \quad (4)$$

где m_e – масса вальца катка, кг; $m_0 r_0$ – статический момент дебаланса, кг·м; ω – частота вращения дебаланса, рад/с; z – смещение вальца, м; μ – коэффициент вязкого сопротивления грунта, Н·с/м; c – жесткость грунта, Н/м.

Контактная сила определяется в соответствии с уравнением [20]

$$F_k = (m_e + m_p)g + cz + \mu \dot{z}, \quad (5)$$

где m_p – масса рамы катка, кг; g – ускорение под действием силы тяжести, кг·м/с².

Для исследования закономерностей изменения спектра ускорений была разработана

модель взаимодействия вибрационного вальца с уплотняемым грунтом. Модель, созданная в среде Simulink (рисунок 2) на основе уравнения (4), содержит следующие входные параметры: m_p и m_e – массы рамы и вальца соответственно; $m_0 r_0$ – статический момент дебаланса; ω – угловая частота вращения дебаланса; c и μ – жесткость и вязкость уплотняемого грунта соответственно.

Граничным условием отрыва вальца от грунта является равенство нулю контактной силы

$$F_k = 0. \quad (6)$$

Тогда уравнение модели (4) для движения вальца в отрыве от грунта примет вид

$$m_e \ddot{z}(t) = (m_e + m_p)g + m_0 r_0 \omega^2 \cos(\omega t). \quad (7)$$

Блоки Switch модели (см. рисунок 2) реализуют потерю контакта вальца с грунтом в каждом периоде возбуждения.

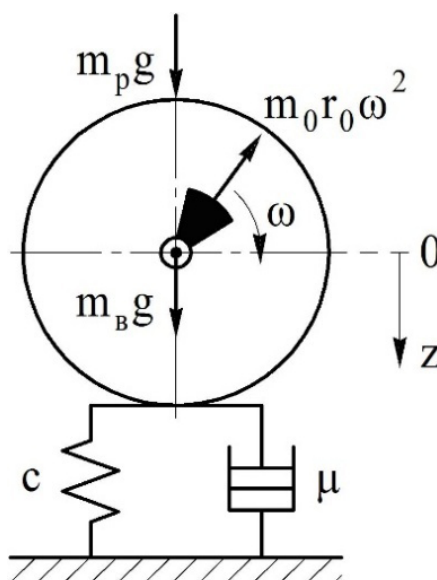


Рисунок 1 – Модель взаимодействия вибрирующего вальца с грунтом
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Vibrating roller–soil interaction model
Source: compiled by the authors.

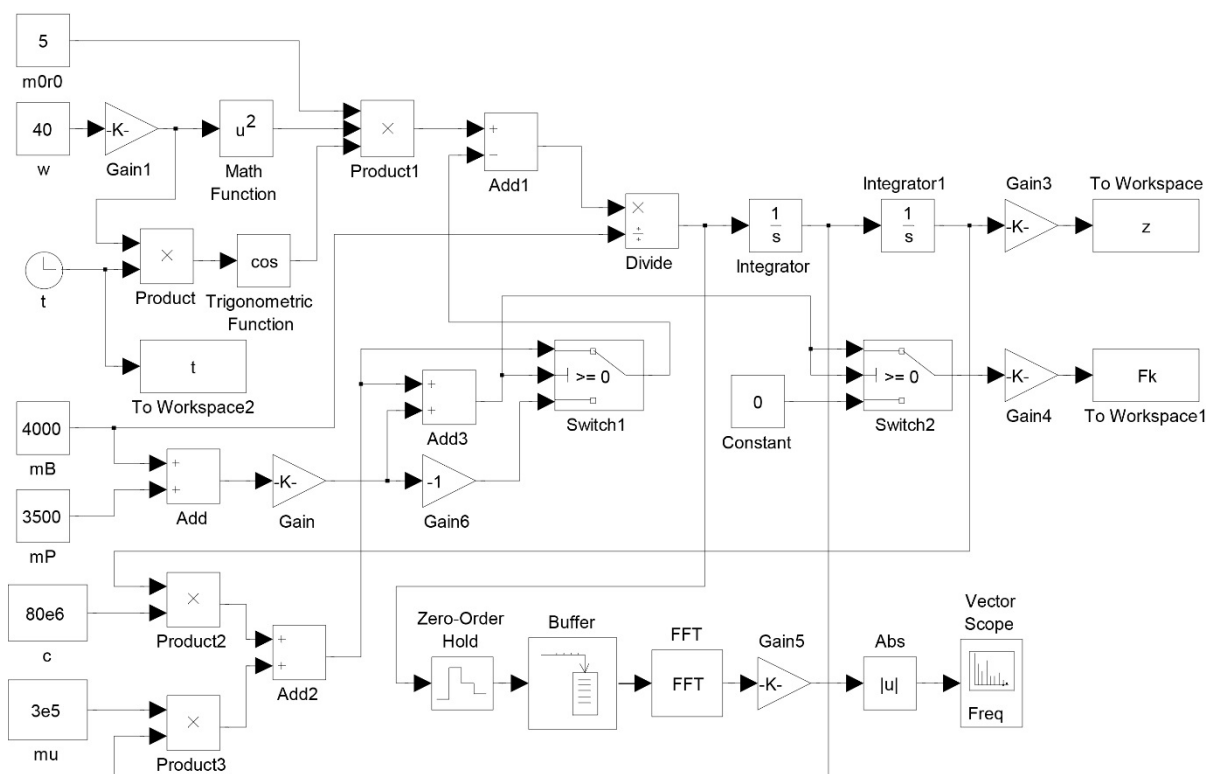


Рисунок 2 – Модель вибрационного уплотнения в среде Simulink
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Model of vibratory compaction made in Simulink environment
Source: compiled by the authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанная модель (см. рисунок 2) позволила получить частотные спектры ускорения вибрационного вальца, взаимодействующего с грунтом, при различных режимах работы катка. Для получения частотного спектра к сигналу ускорения применялась процедура быстрого преобразования Фурье (блок FFT на рисунке 2).

В режиме периодического отрыва, который является наиболее эффективным, в частотном спектре наблюдаются гармоники высших порядков на частотах, кратных частоте возбуждения (рисунок 3).

С увеличением жесткости уплотняемого грунта возникают дополнительные гармоники на частотах, кратных $\frac{1}{2}$ частоты возбуждения (рисунок 4), что свидетельствует о работе катка в режиме «двойного прыжка».

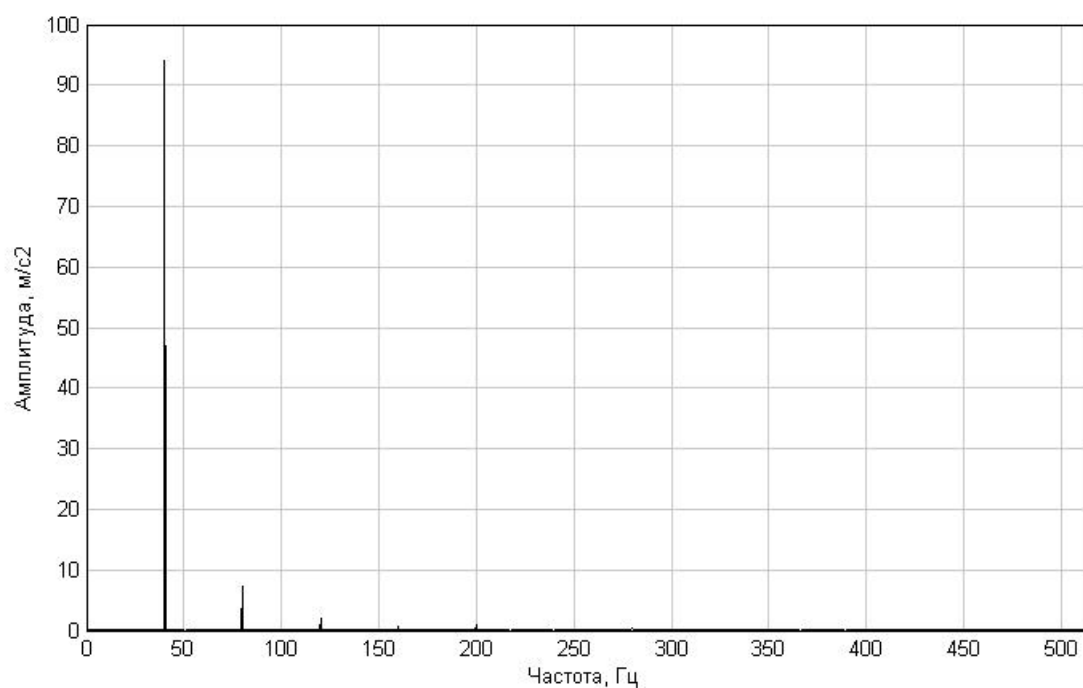


Рисунок 3 – Частотный спектр вальца в режиме периодического отрыва
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Frequency spectrum of the roller in the mode of periodic contact loss (uplift mode)
Source: compiled by the authors.

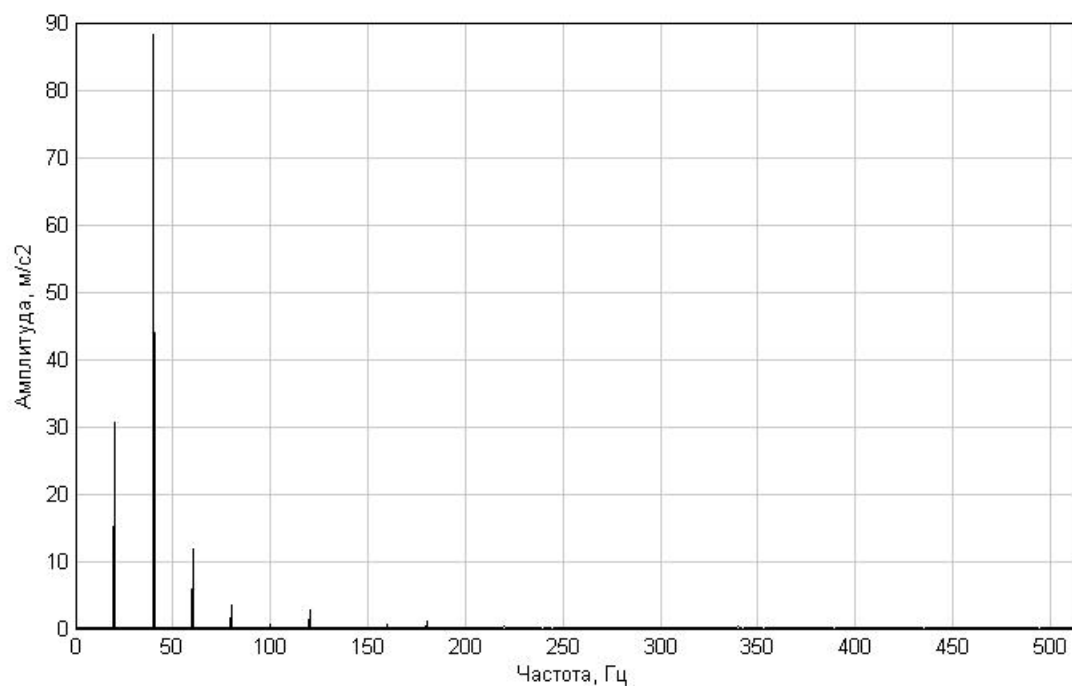


Рисунок 4 – Частотный спектр вальца в режиме «двойного прыжка»
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Frequency spectrum of the roller in the mode of double jump
Source: compiled by the authors.

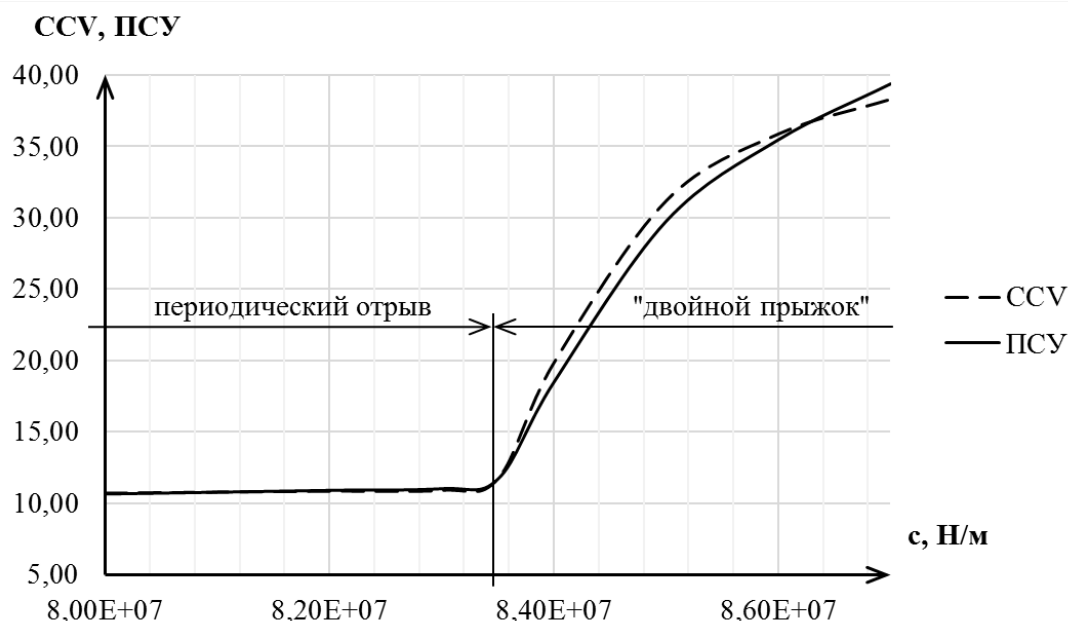


Рисунок 5 – Сравнение показателей CCV и PCU
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Comparison of Compaction Control Values and Compaction Index
Source: compiled by the authors.

В результате анализа частотных спектров вибрационного вальца в режимах периодического отрыва и «двойного прыжка» с учетом выявленных недостатков существующих показателей степени уплотнения был предложен новый показатель

$$PCU = k \frac{A_{0,5f} + A_{2f}}{A_f}, \quad (8)$$

где PCU – показатель степени уплотнения; k – тарировочный коэффициент.

В сравнении с показателем CMV предложенный показатель PCU позволяет определять жесткость грунта как в режиме периодического отрыва, так и в режиме «двойного прыжка». Показатель PCU характеризуется более высокой точностью в сравнении с показателем CCV, так как при его расчете не используются гармоники высших порядков $A_{1,5f}$, $A_{2,5f}$, A_{3f} . Сравнительный анализ значений показателей CCV и PCU (рисунок 5) при различных состояниях уплотняемого грунта и различных режимах работы катка показывает

удовлетворительную сходимость (расхождение не более 5%).

ВЫВОДЫ

Режим «двойного прыжка» является недопустимым с точки зрения сохранения целостности покрытия и на практике его следует избегать. На основе полученного показателя PCU разработана методика определения момента времени смены режима периодической потери контакта на режим «двойного прыжка».

Численным дифференцированием находим скорость изменения показателя степени уплотнения в некоторый момент времени t_i

$$(PCU)'_i \approx \frac{PCU_{i+1} - PCU_i}{t_{i+1} - t_i}, \quad (9)$$

где PCU_i , PCU_{i+1} – значения показателя степени уплотнения, измеренные в моменты времени t_i и t_{i+1} соответственно (рисунок 6); t_i и t_{i+1} – смежные моменты времени, отличающиеся на постоянную величину шага дискретности, с.

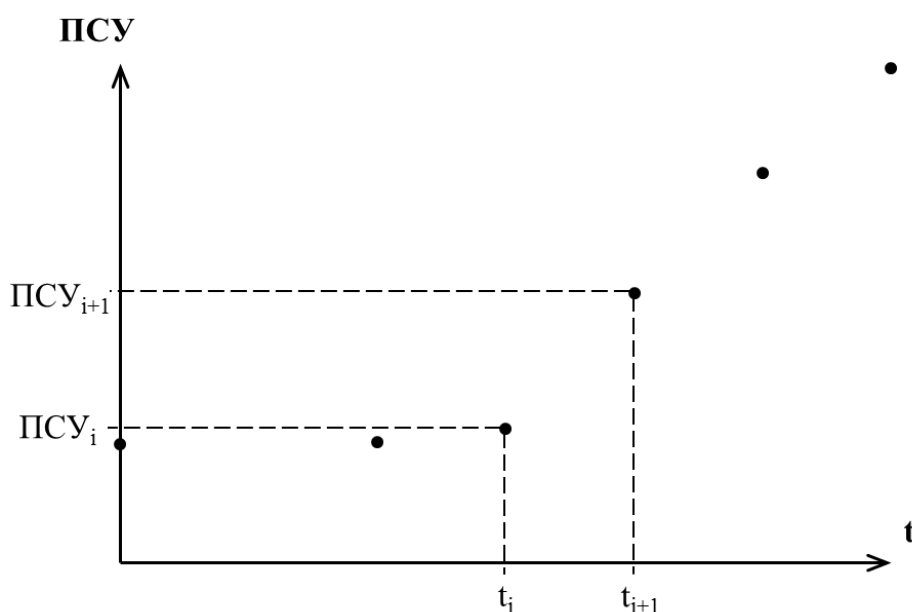


Рисунок 6 – Скорость изменения ПСУ
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Rate of Compaction Index change
Source: compiled by the authors.

Так как при смене режима работы катка с периодического отрыва на «двойной прыжок» скорость изменения показателя ПСУ резко возрастает (см. рисунок 5), то условие начала режима «двойной прыжок» будет иметь вид

$$\left| (PSU')_i - (PSU')_{i+1} \right| > \Delta, \quad (10)$$

где $(PSU')_i$, $(PSU')_{i+1}$ – значения скорости изменения показателя степени уплотнения в моменты времени t_i и t_{i+1} соответственно; Δ – предельное приращение скорости.

При использовании предложенной методики в системе управления катком появляется возможность более точно определять момент перехода катка в режим «двойного прыжка». В этот момент необходимо изменять режим вибрации путем регулирования частоты возбуждения и статического момента дебаланса. Наибольшая эффективность уплотнения возможна при работе катка в непосредственной близости от режима «двойного прыжка» без его достижения.

Темой для дальнейших исследований является разработка методики определения тарировочного коэффициента к показателя ПСУ (8), которая будет основана на экспериментальных исследованиях процесса взаимодействия вибрационного вальца с грунтом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yao Y., Song E. Intelligent compaction methods and quality control. Smart Construction and Sustainable Cities. 2023; 1(1). DOI: <https://doi.org/10.1007/s44268-023-00004-4>
2. Pistol J., Hager M., Kopf F. et al. An advanced ICMV for vibratory roller compaction. Acta Geotech. 2024; 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02342-8>
3. White D.J., Vennapusa P.R., Gieselman H.H. Field Assessment and Specification Review for Roller-Integrated Compaction Monitoring Technologies. Advances in Civil Engineering. 2011; 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1155/2011/783836>
4. Zhou F., Tao M., Yuan M., Yu Z. Deriving stiffness indices for intelligent compaction using inverse analysis of excitation and contact forces. Automation in Construction. 2024; 166: 105637. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105637>

5. Bodin D., Sountharajahb A., Ghorbani J. et al. A State-of-the-art review of compaction control test methods and intelligent compaction technology for asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design*. 2021; 24: 1–30. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.2015423>
6. Шишкин Е.А. Метод расчета фазового угла между вынуждающей силой вибровозбудителя и перемещением вальца // *Вестник СибАДИ*. 2024; 21(3): 388–394. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-388-394>
7. Zhang Q., An Z., Huangfu Z., Li Q. A review on roller compaction quality control and assurance methods for earthwork in five application scenarios. *Materials*. 2022; 15(7): 2610. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15072610>
8. Lee S., Sharafat A., Kim I.S., Seo J. Development and assessment of an intelligent compaction system for compaction quality monitoring, assurance, and management. *Applied Sciences*. 2022; 12(14): 6855. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12146855>
9. Mazumder M., Yun J., Lee S.-J., Jeong K.-D. Cost-effectiveness of conventional compaction and intelligent compaction methods of asphalt pavement overlay. *Sustainability*. 2021; 13(21): 11830. DOI: <https://doi.org/10.3390/su132111830>
10. He Z., Zhang J., Paolo C. Compaction quality inspection method of soil-rock filled embankment based on continuous compaction control technology. *Advances in Civil Engineering*. 2021; 21(2): 144–152. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/8894042>
11. Fang Z., Zhu Y., Ma T., Zhang Y., Han T., Zhang J. Dynamical response to vibration roller compaction and its application in intelligent compaction. *Automation in Construction*. 2022; 142: 104473. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104473>
12. Тюремнов И.С., Морев А.С., Краюшкин А.С. Обоснование выбора значений коэффициентов веса показателя уплотнения для систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. *Динамика систем, механизмов и машин*. 2020; 8(1): 104–110. DOI: <https://doi.org/10.25206/2310-9793-8-1-104-110>
13. Ma Y. Numerical simulation of Intelligent Compaction for subgrade construction. *Journal of Central South University*. 2020; 27: 2173–2184. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4439-2>
14. Hou Z., Dang X., Yuan Y., Tian B., Li S. Research on intelligent compaction technology of subgrade based on regression analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021; 2021(1): 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/4100896>
15. Wang Z., Qian J., Ling J. Intelligent compaction measurement value in variability control of subgrade compaction quality. *Applied Sciences*. 2024; 14(1): 68. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14010068>
16. Baek S.-H., Kim J.-Y., Kim J., Cho J.-W. Continuous compaction control of subgrade bases using intelligent compaction measurement values with dynamic cone penetrometer and light weight deflectometer. *Automation in Construction*. 2024; 168: 105835. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105835>
17. Chang G., Xu Q. Adaptive quality control and acceptance of pavement material density for intelligent road construction. *Automation in Construction*. 2016; 62: 78–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.11.004>
18. Pang J., Yang J., Zhu B., Qian J. Study of regression algorithms and influent factors between intelligent compaction measurement values and in-situ measurement values. *Applied Sciences*. 2023. 13(10): 5953. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13105953>
19. Tatsuoka F., Hashimoto T., Tateyama K. Soil stiffness as a function of dry density and the degree of saturation for compaction control. *Soils Found*. 2021; 61(4): 989–1002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.06.007>
20. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Методика определения свойств асфальтобетонной смеси, уплотняемой вибрационным катком. *Справочник // Инженерный журнал*. 2022; 03: 47–52. DOI: <https://doi.org/10.14489/hb.2022.03.pp.047-052>
21. Xu Z., Khabbaz H., Fatahi B., Wu D. Real-time determination of sandy soil stiffness during vibratory compaction incorporating machine learning method for intelligent compaction. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022; 14(5): 1609–1625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.07.004>
22. Lun L. Nonlinear dynamics of the rigid drum for vibratory roller on elastic subgrades. *Shock and vibration*. 2021; 2021(9): 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9589230>
23. Pistol J., Hager M., Kopf F., Adam D. Consideration of the variable contact geometry in vibratory roller compaction. *Infrastructures*. 2023; 8(7): 110. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures8070110>
24. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Моделирование взаимодействия вибрационного вальца дорожного катка с уплотняемым грунтом. *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2024; 26: 60–67. DOI: <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-26-60-67>

REFERENCES

1. Yao Y., Song E. Intelligent compaction methods and quality control. *Smart Construction and Sustainable Cities*. 2023; 1(1). DOI: <https://doi.org/10.1007/s44268-023-00004-4>
2. Pistol J., Hager M., Kopf F. et al. An advanced ICMV for vibratory roller compaction. *Acta Geotech*. 2024: 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02342-8>
3. White D.J., Vennapusa P.R., Gieselman H.H. Field Assessment and Specification Review for Roller-Integrated Compaction Monitoring Technologies. *Advances in Civil Engineering*. 2011: 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1155/2011/783836>
4. Zhou F., Tao M., Yuan M., Yu Z. Deriving stiffness indices for intelligent compaction using inverse analysis of excitation and contact forces. *Automation in Construction*. 2024; 166: 105637. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105637>

5. Bodin D., Sountharajahb A., Ghorbani J. et al. A State-of-the-art review of compaction control test methods and intelligent compaction technology for asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design*. 2021; 24: 1–30. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.2015423>.
6. Shishkin E.A. The method for calculating phase angle between exciter force of vibration exciter and roller displacement. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(3): 388–394. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-3-388-394>.
7. Zhang Q., An Z., Huangfu Z., Li Q. A review on roller compaction quality control and assurance methods for earthwork in five application scenarios. *Materials*. 2022; 15(7): 2610. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15072610>.
8. Lee S., Sharafat A., Kim I.S., Seo J. Development and assessment of an intelligent compaction system for compaction quality monitoring, assurance, and management. *Applied Sciences*. 2022; 12(14): 6855. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12146855>.
9. Mazumder M., Yun J., Lee S.-J., Jeong K.-D. Cost-effectiveness of conventional compaction and intelligent compaction methods of asphalt pavement overlay. *Sustainability*. 2021; 13(21): 11830. DOI: <https://doi.org/10.3390/su132111830>.
10. He Z., Zhang J., Paolo C. Compaction quality inspection method of soil-rock filled embankment based on continuous compaction control technology. *Advances in Civil Engineering*. 2021; 21(2): 144–152. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/8894042>.
11. Fang Z., Zhu Y., Ma T., Zhang Y., Han T., Zhang J. Dynamical response to vibration roller compaction and its application in intelligent compaction. *Automation in Construction*. 2022; 142: 104473. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104473>.
12. Tyuremnov I.S., Morev A.S., Krayushkin A.S. Justification of chosen values of the weight coefficients of the compaction value for continuous compaction control systems for vibration rollers. *Dynamics of systems, mechanisms and machines*. 2020; vol. 8, no. 1: 104–110. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25206/2310-9793-8-1-104-110>.
13. Ma Y. Numerical simulation of Intelligent Compaction for subgrade construction. *Journal of Central South University*. 2020; 27: 2173–2184. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4439-2>.
14. Hou Z., Dang X., Yuan Y., Tian B., Li S. Research on intelligent compaction technology of subgrade based on regression analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021; 2021(1): 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/4100896>.
15. Wang Z., Qian J., Ling J. Intelligent compaction measurement value in variability control of subgrade compaction quality. *Applied Sciences*. 2024; 14(1): 68. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14010068>.
16. Baek S.-H., Kim J.-Y., Kim J., Cho J.-W. Continuous compaction control of subgrade bases using intelligent compaction measurement values with dynamic cone penetrometer and light weight deflectometer. *Automation in Construction*. 2024; 168: 105835. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105835>.
17. Chang G., Xu Q. Adaptive quality control and acceptance of pavement material density for intelligent road construction. *Automation in Construction*. 2016; 62: 78–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.11.004>.
18. Pang J., Yang J., Zhu B., Qian J. Study of regression algorithms and influent factors between intelligent compaction measurement values and in-situ measurement values. *Applied Sciences*. 2023. 13(10): 5953. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13105953>.
19. Tatsuoka F., Hashimoto T., Tateyama K. Soil stiffness as a function of dry density and the degree of saturation for compaction control. *Soils Found*. 2021; 61(4): 989–1002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.06.007>.
20. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Method for determining properties of asphalt concrete mixture compacted by vibratory roller. *Handbook. An engineering journal*. 2022; 03: 47–52. DOI: <https://doi.org/10.14489/hb.2022.03.pp.047-052>.
21. Xu Z., Khabbaz H., Fatahi B., Wu D. Real-time determination of sandy soil stiffness during vibratory compaction incorporating machine learning method for intelligent compaction. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022; 14(5): 1609–1625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.07.004>.
22. Lun L. Nonlinear dynamics of the rigid drum for vibratory roller on elastic subgrades. *Shock and vibration*. 2021; 2021(9): 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9589230>.
23. Pistol J., Hager M., Kopf F., Adam D. Consideration of the variable contact geometry in vibratory roller compaction. *Infrastructures*. 2023; 8(7): 110. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures8070110>.
24. Shishkin E.A., Smolyakov A.A. Modeling of interaction between road roller vibrating drum and soil being compacted. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2024; 26: 60–67. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-26-60-67>.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Шишкин Е.А. Руководство темой исследования. Постановка цели и задач. Разработка модели взаимодействия вальца с грунтом.

Смоляков А.А. Анализ изученности темы. Подготовка материала для статьи, перевод литературы. Анализ результатов моделирования.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Shishkin E.A. Supervising of the research theme. Setting goal and objectives. Roller–soil interaction model development.

Smolyakov A.A. Review of Continuous Compaction Control Technologies. Preparing data for the article, translation. Simulation result's analysis.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шишкин Евгений Алексеевич – канд. техн. наук, доц. высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (680042, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4387-0228>,

SPIN-код: 6027-4510,

e-mail: 004655@togudv.ru

Смоляков Александр Андреевич – аспирант высшей школы промышленной инженерии Тихоокеанского государственного университета (680042, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4332-1667>,

e-mail: gm26578@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shishkin Evgenij Al. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Graduate School of Industrial Engineering, Pacific National University (136, Tikhookeanskaya street, Khabarovsk, 680042).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4387-0228>,

SPIN-code: 6027-4510,

e-mail: 004655@togudv.ru

Smolyakov Alexander A. – Postgraduate student, Graduate School of Industrial Engineering, Pacific National University (136, Tikhookeanskaya street, Khabarovsk, 680042).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4332-1667>,

e-mail: gm26578@gmail.com

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

Научная статья
УДК 621.757
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-194-209>
EDN: XILESJ



АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ СВОЙСТВ ОХЛАДИТЕЛЕЙ НАДДУВОЧНОГО ВОЗДУХА В ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Д.А. Дрючин ✉, А.Д. Михайлов

Оренбургский государственный университет,
г. Оренбург, Россия

✉ ответственный автор
dmi-dryuchin@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Обозначена устойчивая тенденция развития конструкции автомобильных двигателей, предполагающая массовое использование нагнетателей и охладителей подаваемого воздуха, обеспечивающих повышение технико-экономических и экологических показателей эксплуатации автотранспортных средств. Приведено описание актуальной проблемы, заключающейся в снижении эффективности охладителей наддувочного воздуха, что обусловлено образованием загрязнений как на наружной, так и на внутренней поверхности в процессе эксплуатации. Представлены результаты обзора научных работ в области повышения эффективности эксплуатации автомобильных теплообменных устройств. Сформулирована цель научной работы, определен перечень решаемых задач.

Материалы и методы. Приведены теоретические положения, описывающие параметры теплообменных процессов на границе двух сред, разделённых многослойной стенкой. Определены расчётные формулы, позволяющие определить характер влияния теплопроводности и толщины слоёв загрязнений на поверхностях теплообменного устройства на величину теплового потока, отводимого этим устройством в окружающую среду. Выдвинута гипотеза о характере формирования слоёв загрязнений и о существующем значении их предельной толщины, соответствующей минимуму эксплуатационной теплопроводности. Дано описание методов проведения экспериментальных исследований и диагностического оборудования, обеспечивающих проведение исследований, направленных на получение данных, необходимых для практического внедрения разработанных теоретических положений.

Результаты. Приведены зависимости толщины слоёв загрязнений, образующихся на наружных и внутренних поверхностях воздушно-воздушного охладителя наддувочного воздуха в эксплуатации. Установлены значения коэффициентов теплопроводности наружных и внутренних загрязнений, что является одним из пунктов научной новизны. Полученные значения использованы для моделирования процессов отвода теплоты от наддувочного воздуха и разработки мероприятий, направленных на повышение эффективности эксплуатации автотранспортных средств. В разделе представлены результаты моделирования теплового потока, отводимого от наддувочного воздуха, и приведены рекомендации, направленные на повышение эффективности эксплуатации турбированных двигателей.

Обсуждение и заключение. Дано решение поставленных задач, обозначены показатели, отражающие достижение цели исследования, сформулированы результаты, показывающие новые научные результаты исследования. Приведено краткое описание практических рекомендаций, направленных на повышение эффективности эксплуатации турбированных дизельных двигателей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: турбированные двигатели, загрязнение интеркулера, теплообменные процессы, наддувочный воздух, диагностирование теплообменных устройств

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы статьи выражают благодарность сотрудникам транспортного факультета ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», кандидату технических наук А.П. Понясовскому, кандидату технических наук В.В. Сорокину, анонимным рецензентам за их помощь, советы, рекомендации, ценные замечания и критику.

Статья поступила в редакцию 21.02.2025; одобрена после рецензирования 02.04.2025; принята к публикации 17.04.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

© Дрючин Д.А., Михайлов А.Д., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

Для цитирования: Дрючин Д.А., Михайлов А.Д. Анализ изменения теплообменных свойств охладителей наддувочного воздуха в эксплуатации автотранспортных средств // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, №. 2. С. 194-209. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-194-209>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-194-209>

EDN: XILESJ

ANALYSIS OF CHANGES IN HEAT EXCHANGE PROPERTIES OF CHARGE AIR COOLERS IN AUTOMOTIVE VEHICLES' OPERATION

Dmitriy A. Dryuchin ✉, **Alexandr D. Mikhailov**
Orenburg State University,
Orenburg, Russia
✉ corresponding author
dmi-dryuchin@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. A steady trend in the development of automobile engines' designs was defined, which involves the widespread use of superchargers and coolers of the supplied air, providing the increase in technical, economic and environmental performance characteristics of motor vehicles. An urgent problem of efficiency reduction of the charge air coolers, due to the formation of impurities on both the outer and inner surfaces in operation was described. The results of scientific papers' review in the field of improving the operation efficiency of automotive heat exchangers were presented. The purpose of the scientific work was formulated, the list of tasks to be solved was defined.

Materials and methods. The theoretical statements describing the parameters of heat exchange processes at the boundary of two environments separated by a multilayer wall were presented. Calculation formulas have been determined allowing to define the influence nature of thermal conductivity and the thickness of contaminant layers on the surfaces of the heat exchange device on the volume of heat flow discharged by this device into the environment. A hypothesis has been put forward about the formation character of contaminant layers and about the existing value of their maximum thickness corresponding to the minimum of operational thermal conductivity. Methods of conducting experimental research and diagnostic equipment that ensures research performance aimed at obtaining the data necessary for the practical implementation of the developed theoretical statements were described.

Results. The dependences of the thickness of the contaminant layers formed on the outer and inner surfaces of the charge air cooler in operation are given. The values of the thermal conductivity coefficients of outer and inner contaminants have been established, which is one of the points of scientific novelty. The obtained values were used to model the processes of heat removal from charge air and to develop measures aimed at improving the efficiency of vehicle operation. The article presents the results of modeling the heat flow discharged from the charge air and provides recommendations for enhancing the operation capacity of turbocharged engines.

Discussion and conclusion. The solution of the determined goals was presented, the indicators reflecting the achievement of the research objective were defined, the results reflecting the new scientific accomplishments in the study were obtained. A brief description of practical recommendations aimed at improving the operation efficiency of turbocharged diesel engines was given.

KEYWORDS: turbocharged engines, intercooler clogging, heat exchange processes, charge air, diagnostics of heat exchange devices

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors of the article express their gratitude to the staff of the Transport Faculty of Orenburg State University, Candidate of Technical Sciences A.P. Poslavskiy, Candidate of Technical Sciences V.V. Sorokin, anonymous reviewers for their help, advice, recommendations, valuable comments and criticism.

The article was submitted: February 21, 2025; approved after reviewing: April 2, 2025; accepted for publication: April 17, 2025.

© Dryuchin D.A., Mikhailov A.D., 2025



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

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Dryuchin D.A., Mikhailov A.D. Analysis of changes in heat exchange properties of charge air coolers in automotive vehicles' operation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (2): 194-209. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-194-209>

ВВЕДЕНИЕ

Одной из типовых тенденций развития конструкции современных автотранспортных средств является применение турбированных двигателей, оснащённых наддувочными агрегатами, обеспечивающими подачу воздуха в цилиндры двигателя под избыточным давлением. Применение турбонаддува способствует снижению удельного расхода топлива, обеспечивает повышение литровой мощности двигателя и улучшение его экологических показателей.

Повышение показателей эффективности работы силовых агрегатов достигается за счёт увеличения количества свежего заряда, которое достигается не только в результате предварительного сжатия, но и последующего охлаждения. Поддержание оптимальных значений термодинамических параметров наддувочного воздуха необходимо для обеспечения эффективного протекания рабочего процесса, определяющего основные технико-эксплуатационные показатели работы двигателей.

Применение воздухо-воздушных трубчатых теплообменных устройств (интеркулеров) является типовым техническим решением, обеспечивающим решение задачи охлаждения наддувочного воздуха. Условием эффективного функционирования интеркулера является отсутствие или минимальное количество загрязнений как на его внутренних, так и на наружных поверхностях.

В процессе эксплуатации на рабочих поверхностях теплообменных устройств происходит образование загрязнений, что приводит к снижению показателей эффективности работы двигателей. Формируемые на внутренних поверхностях теплообменника масляные и сажистые отложения, их последующая полимеризация приводят к повышению термического сопротивления теплообменного устройства,

что отрицательно влияет на эффективность процесса теплопередачи. Это, в свою очередь, оказывает негативное влияние на технические, эксплуатационные и экологические характеристики двигателя.

Исходя из обозначенной проблемы, актуальна задача разработки методики оценки теплообменных свойств охладителей наддувочного воздуха, изменяющихся в эксплуатации, в связи с образованием отложений как на наружных, так и внутренних поверхностях.

Предварительный анализ научной литературы и технологической документации позволил сделать предварительное заключение о недостаточной проработанности данного вопроса, что влечёт очевидные отрицательные последствия в плане обеспечения эффективных условий эксплуатации автотранспортных средств. Обозначенная проблема во многом формирует направленность проводимого исследования и определяет его актуальность.

Исходя из формулировки обозначенной проблемы, определён объект исследования – охладитель наддувочного воздуха автомобильных двигателей.

Предмет исследования – закономерности изменения теплообменных характеристик охладителей наддувочного воздуха автомобильных двигателей в эксплуатации.

Для актуализации информации в рассматриваемой предметной области выполнен обзор научных работ, нормативной и технологической документации в области исследования теплообменных процессов и обеспечения заданного уровня эксплуатационных характеристик теплообменных устройств в эксплуатации автотранспортных средств.

Теоретические основы теплотехнических и термодинамических процессов теплообмена разнородных сред приведены в работах Р.Ю. Исупова¹, С.С. Кутателадзе², М.А. Михеева, В.Ф. Юдина³ и других авторов.

¹ Исупов Р.Ю. Исследование теплопередачи плоскоовальных труб в сравнении с теплопередачей труб круглого сечения // В сборнике: Научные труды студентов Ижевской ГСХА. Электронный ресурс. Ответственный за выпуск Н.М. Итешина, Ижевск. 2019. С. 486–489.

² Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Новосибирск: Наука, 1970. 417 с.

³ Юдин В.Ф. Теплообмен поперечнооребрённых труб. Ленинград: Машиностроение, 1982. 189 с.

Исследованию тепловых процессов турбированных двигателей внутреннего сгорания посвящены труды А.В. Гриценко, Р.А. Зейнетдинова⁴, В.М. Кейса⁵, Е.М. Кухаренко⁶, В.В. Румянцева, А.Ф. Савостина, А.Т. Кулакова, Е.А. Лазарева [1, 2, 3, 4, 5] и других исследователей.

Решению вопросов диагностирования технического состояния и обеспечения эксплуатационной надёжности автомобильных теплообменных устройств посвящены труды И.Т. Коврикова, Г.А. Лепеша, А.П. Пославского^{7, 8, 9}, В.В. Сорокина, А.В. Хлуденёва, А.А. Фадеева и других исследователей [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

По результатам обзора выявлена проблема отсутствия методической базы, обеспечивающей решение задачи оценки и прогнозирования характера изменения технического состояния охладителей наддувочного воздуха в эксплуатации автотранспортных средств, оснащённых турбированными двигателями. Следствиями обозначенной проблемы являются: снижение мощности, повышение эксплуатационного расхода топлива и ухудшение экологических характеристик автомобильных двигателей, обусловленные низкими значениями плотности воздушного потока, подаваемого в цилиндры.

Исходя из содержания выявленной проблемы, сформулирована цель проведённого исследования: повышение реализуемых эксплуатационных характеристик автомобильных турбированных двигателей на основе результатов оценки теплообменных свойств охладителей наддувочного воздуха.

Определены задачи, решение которых обеспечивает достижение поставленной цели:

- теоретическое описание теплообменных процессов, определяющих величину теплового потока, отводимого воздухо-воздушным теплообменным устройством от воздушного потока внутреннего контура в окружающую среду;

- разработка математической модели теплового потока, отводимого воздухо-воздушным теплообменным устройством от воздушного потока внутреннего контура в окружающую среду;

- разработка методики оценки теплообменных свойств охладителей наддувочного воздуха на основе результатов моделирования величины отводимого теплового потока;

- оценка эффективности внедрения разработанных методов в практику эксплуатации автотранспортных средств.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теплообменный процесс на границе двух разнородных сред описывается базовыми выражениями теплотехники и термодинамики¹⁰ [10]. К числу таких выражений относится уравнение передаваемого теплового потока

$$Q = k \cdot F \cdot \overline{\Delta t}_{\text{лог}}, \quad (1)$$

где k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°C);

F – площадь поверхности теплообмена, м²;

$\overline{\Delta t}_{\text{лог}}$ – среднелогарифмический температурный напор, °C.

⁴ Зейнетдинов Р.А. Влияние неравномерности термогазодинамических процессов систем воздухообеспечения ДВС на коэффициент наполнения // Сб. науч. трудов научно-практической конференции «Научное обеспечение инновационного развития АПК», Ч.1. СПб.: СПбГАУ. 2014. С. 340–345.

⁵ Кейс В.М., Лондон А.Л. Компактные теплообменники. М.: Энергия, 1967. 224 с.

⁶ Кухаренко Е.М. Агрегаты наддува. Минск: БНТУ, 2012. 50 с.

⁷ Пославский А.П. Оценка влияния эксплуатационных факторов на техническое состояние охладителей наддувочного воздуха / А.П. Пославский, В.В. Сорокин, А.Д. Михайлов, С.Н. Сергиенко // Прогрессивные технологии в транспортных системах: сб. материалов XIV Междунар. науч.-практ. конф., 20–22 нояб. 2019 г., Оренбург / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации [и др.]; отв. ред. В.И. Рассоха. Электрон. дан. Оренбург: ОГУ, 2019. С. 470–475.

⁸ Пославский А.П. Диагностирование технического состояния охладителей наддувочного воздуха транспортных средств / А.П. Пославский, А.Д. Михайлов // Прогрессивные технологии в транспортных системах: сб. ст. Тринадцатой Междунар. науч.-практ. конф., 15–17 нояб. 2017 г., Оренбург / М-во образования и науки Рос. Федерации [и др.]; редкол.: Рассоха В.И. (отв. ред.) и [др.]. Электрон. дан. Оренбург, 2017. С. 213–215.

⁹ Пославский А.П. Разработка средств и методов диагностирования технического состояния теплообменников транспортных средств в эксплуатации / А.П. Пославский, В.В. Сорокин, А.Д. Михайлов // Прогрессивные технологии в транспортных системах: сб. материалов XIV Междунар. науч.-практ. конф., 20–22 нояб. 2019 г., Оренбург / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации [и др.]; отв. ред. В. И. Рассоха. Электрон. дан. Оренбург: ОГУ, 2019. С. 476–480.

¹⁰ Михеев М.А., Михеева И.М. Основы Теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.

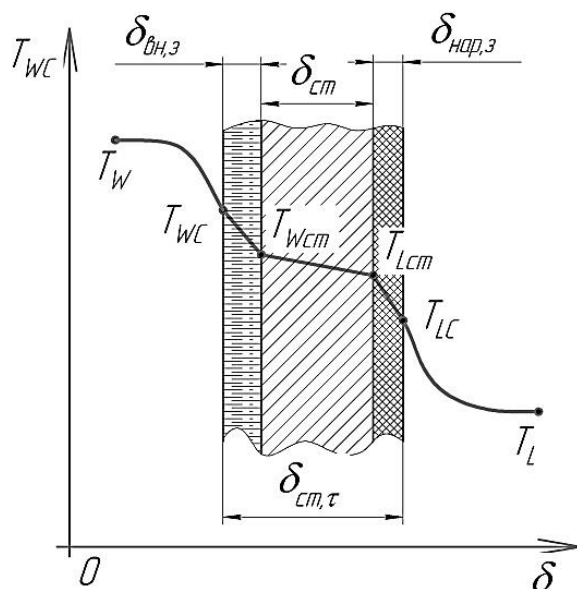


Рисунок 1 – Распределения тепловых полей в сечении стенки теплообменного устройства с учётом загрязнений, сформированных на наружных и внутренних поверхностях:

T_W – температура внутренней среды;
 T_{Wc} – температура на поверхности внутренних загрязнений;
 T_{Wcm} – температура на поверхности стенки с внутренней стороны;
 T_{Lcm} – температура на поверхности стенки с наружной стороны;
 T_{Lc} – температура на поверхности наружных загрязнений;
 T_L – температура наружной среды;
 $\delta_{вн,з}$ – толщина слоя внутренних загрязнений;
 δ_{cm} – толщина стенки;
 $\delta_{нар,з}$ – толщина слоя наружных загрязнений;
 $\delta_{cm,т}$ – суммарная толщина стенки с учётом загрязнений

Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Distribution of thermal fields in the wall cross-section of the heat exchanger, taking into account the impurities formed on the outer and inner surfaces

T_W – temperature of the internal environment;
 T_{Wc} – temperature on the surface of inner impurities;
 T_{Wcm} – temperature on the inside wall surface;
 T_{Lcm} – temperature on the outside wall surface;
 T_{Lc} – temperature on the surface of outer impurities;
 T_L – temperature of the external environment;
 $\delta_{вн,з}$ – layer thickness of inner impurities;
 δ_{cm} – wall thickness;
 $\delta_{нар,з}$ – layer thickness of outer impurities;
 $\delta_{cm,т}$ – the total wall thickness, taking into account the contamination.

Source: compiled by the author.

Для идеализированных условий сделано допущение о том, что коэффициент теплопередачи (k) является постоянной величиной, определяемой теплофизическими свойствами контактирующих сред или материалов. Реальные условия эксплуатации отличаются от идеализированных. Как правило, на теплопередающих поверхностях со временем формируются слои загрязнений, что в значительной степени влияет на их теплофизические свойства.

Исходя из вышеизложенного, теплопередающую поверхность можно рассматривать как

многослойную, сформированную основным конструкционным материалом и загрязнениями, образующимися на нём в процессе эксплуатации как со стороны внутреннего контура, так и с наружной стороны.

Процесс образования и распределения загрязнений на наружных и внутренних поверхностях теплообменных устройств в настоящее время малоизучен. В недостаточной степени изучены теплофизические свойства наружных и внутренних загрязнений, образующихся на поверхностях теплообменных устройств в процессе эксплуатации.

На рисунке 1 изображено распределение тепловых полей на поверхности стенки теплообменника с учётом загрязнений, сформированных на ней в процессе эксплуатации.

В теоретических исследованиях теплообменных процессов используется понятие общего термического сопротивления (R) – величины обратной коэффициенту теплопередачи, следовательно, формула для расчёта коэффициента теплоотдачи имеет вид

$$k = \frac{1}{R}. \quad (2)$$

Общее термическое сопротивление, возникающее при тепловом взаимодействии двух теплоносителей, разделённых теплопроводной стенкой, определяется как сумма термических сопротивлений каждого из теплоносителей и термического сопротивления стенки. Развёрнутое выражение расчёта совокупного термического сопротивления рабочей поверхности теплообменного устройства имеет вид

$$R_{\tau} = \frac{1}{\alpha_W} + \left(\frac{\delta_{cm,\tau}}{\lambda_{cm,\tau}} + \frac{1}{\alpha_L} \right) \cdot \psi = \frac{1}{\alpha_W} + \left[\left(\frac{\xi \cdot \delta_{нар.з}}{\lambda_{нар.з}} + \frac{\delta_{вн.з}}{\psi \cdot \lambda_{вн.з}} + \frac{\delta_{cm}}{\psi \cdot \lambda_{cm}} \right) + \frac{1}{\alpha_L} \right] \cdot \psi, \quad (3)$$

где α_W, α_L – коэффициенты теплоотдачи со стороны теплоносителя «W» (внутренняя среда) и теплоносителя «L» (внешняя среда), соответственно, Вт/(м²·°C);

ψ – коэффициент оребрения;

$\delta_{нар.з}$ – толщина слоя наружных загрязнений, м;

$\delta_{вн.з}$ – толщина слоя внутренних загрязнений, м;

δ_{cm} – толщина материала стенки, м;

$\lambda_{нар.з}$ – коэффициент теплопроводности слоя наружных загрязнений, Вт/(м²·°C);

$\lambda_{вн.з}$ – коэффициент теплопроводности слоя внутренних загрязнений, Вт/(м²·°C);

λ_{cm} – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м²·°C)

ξ – коэффициент загрязнения оребрения.

Коэффициент оребрения (ψ) в формуле (3) применяется в отношении наружной поверхности теплообменного устройства, имеющей большую площадь за счёт наличия дополнительных пластин, увеличивающих площадь поверхности теплообмена. Формирование загрязнений на наружных поверхностях теплообменного устройства происходит под воздействием внешней среды и, как правило, происходит не равномерно, а лишь на участках подверженных прямому воздействию внешних загрязнений. Данная особенность учтена наличием в формуле (3) коэффициента загрязнения оребрения (ξ).

Формула (1) может быть преобразована с учётом выражений (2) и (3):

$$Q_{\tau} = \frac{1}{(R_W + \psi \cdot \xi \cdot R_{НАР.З.\tau} + R_{ВН.З.\tau} + \psi \cdot R_{cm} + \psi \cdot R_L)} \cdot F \cdot \overline{\Delta t}_{ЛОГ.\tau}, \quad (4)$$

где R_W – термическое сопротивление внутренней среды «W», (м²·°C)/Вт;

$R_{НАР.З.\tau}$ – термическое сопротивление наружных загрязнений, (м²·°C)/Вт;

$R_{ВН.З.\tau}$ – термическое сопротивление внутренних загрязнений, (м²·°C)/Вт;

R_{cm} – термическое сопротивление материала стенки теплообменника, (м²·°C)/Вт;

R_L – термическое сопротивление наружной среды «L», (м²·°C)/Вт.

Знаменатель полученного выражения – это величина суммарного термического сопротивления теплообменного устройства с учётом дополнительного термического сопротивления загрязнений, образующихся в процессе эксплуатации:

$$R_{\Sigma} = (R_W + \psi \cdot R_L) + (\psi \cdot \xi \cdot R_{НАР.З.\tau} + R_{ВН.З.\tau}) = R_0 + \Delta R_{\tau}. \quad (5)$$

Группировкой слагаемых выражения (5) определены две составляющих: термическое сопротивление стенки теплообменного устройства (R_0) и термическое сопротивление загрязнений, сформированных на стенке в процессе эксплуатации (ΔR_0).

Величина термического сопротивления стенки теплообменного устройства является постоянной величиной, определяемой его конструктивными особенностями, а также теплофизическими свойствами внутренней и внешней сред.

Термическое сопротивление загрязнений, сформированных на стенке теплообменного устройства, изменяется в процессе эксплуатации и может быть представлено как функция от толщины и теплопроводности загрязнений, образуемых на наружных и внутренних поверхностях:

$$\Delta R_{\tau} = \psi \cdot \xi \cdot R_{HAP.3.\tau} + R_{BH.3.\tau} = \frac{\psi \cdot \xi}{k_{HAP.3.\tau}} + \frac{1}{k_{BH.3.\tau}} = \frac{\psi \cdot \xi \cdot \delta_{нар.3.\tau}}{\lambda_{нар.3}} + \frac{\delta_{вн.3.\tau}}{\lambda_{вн.3}}. \quad (6)$$

Толщина слоёв наружных и внутренних загрязнений ($\delta_{нар.3.\tau}, \delta_{вн.3.\tau}$) может быть представлена как функция от наработки теплообменного устройства: ($\delta_{нар.3.\tau} = f_{нар.3}(\tau)$ и $\delta_{вн.3.\tau} = f_{вн.3}(\tau)$).

Опыт практической эксплуатации большинства автомобильных теплообменных устройств показывает, что существует предельная толщина формируемого слоя загрязнений (δ_{MAX}), соответствующая условиям сбалансированного протекания процессов образования и разрушения слоёв загрязнений.

Исходя из представленных положений, установлено обобщённое выражение, определяющее изменение термического сопротивления теплообменного устройства в эксплуатации:

$$\Delta R(\tau) = R_{MAX} - B \cdot (\tau_{MAX} - \tau), \quad (7)$$

где R_{MAX} – максимальное термическое сопротивление, соответствующее максимальной толщине слоя образующихся загрязнений, ($m^2 \cdot ^\circ C$)/Вт;

B – константа интенсивности загрязнения (коэффициент пропорциональности).

Выражение (7) справедливо при введении допущения о том, что процесс формирования загрязнений в интервале наработок $0 \leq \tau \leq \tau_{MAX}$ носит линейный или близкий к линейному характер. Преобразованием формулы (5), с учётом выражений (6) и (7), получим систему выражений, характеризующих зависимость термического сопротивления теплообменного устройства от наработки:

$$R_{\Sigma} = \begin{cases} (R_W + \psi \cdot R_L) + \left(\frac{\psi \cdot \xi \cdot \delta_{нар.3.MAX}}{\lambda_{нар.3}} + \frac{\delta_{вн.3.MAX}}{\lambda_{вн.3}} \right) - B \cdot (\tau_{MAX} - \tau), & \text{при } \tau \leq \tau_{MAX} \\ (R_W + \psi \cdot R_L) + \left(\frac{\psi \cdot \xi \cdot \delta_{нар.3.MAX}}{\lambda_{нар.3}} + \frac{\delta_{вн.3.MAX}}{\lambda_{вн.3}} \right), & \text{при } \tau \geq \tau_{MAX} \end{cases}, \quad (8)$$

где $\delta_{нар.3.MAX}$ – максимальная толщина слоя наружных загрязнений, м;

$\delta_{вн.3.MAX}$ – максимальная толщина слоя внутренних загрязнений, м.

Коэффициент пропорциональности, являющийся постоянной величиной для каждого рассматриваемого теплообменника, может быть определён из выражения

$$B = \left(\frac{\psi \cdot \xi \cdot \delta_{нар.3.MAX}}{\lambda_{нар.3}} + \frac{\delta_{вн.3.MAX}}{\lambda_{вн.3}} \right) \cdot \frac{1}{\tau_{MAX}}. \quad (9)$$

Обобщённый вид графиков, иллюстрирующих характер изменения составляющих термического сопротивления теплообменного устройства в зависимости от наработки, представлен на рисунке 2.

Использование на практике описанной математической модели затруднено вследствие отсутствия актуальной информации о следующих величинах: коэффициент теплоотдачи внутреннего теплоносителя (α_W); коэффициент теплоотдачи внешнего теплоносителя (α_L); коэффициент теплопроводности наружных загрязнений ($\lambda_{нар.3}$); коэффициент теплопроводности внутренних загрязнений ($\lambda_{вн.3}$). Нестабильность теплофизических свойств газовых сред является одной из причин, затрудняющих определение численных значений данных величин для воздухо-воздушных теплообменных устройств, к числу которых относится охладитель наддувочного воздуха автомобильных турбированных двигателей.

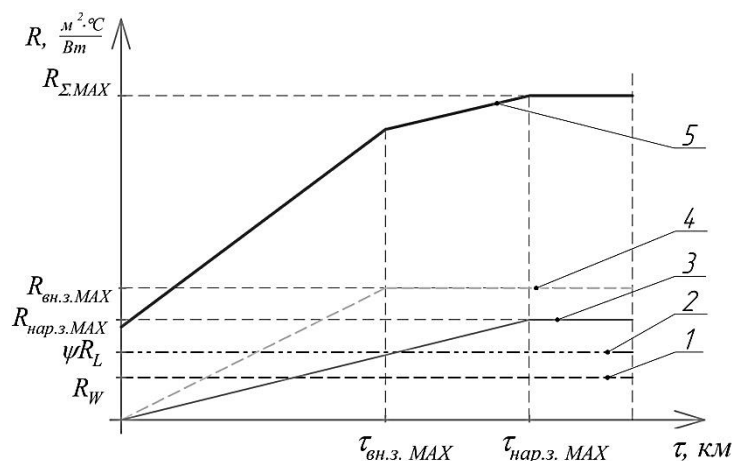


Рисунок 2 – Зависимости составляющих термического сопротивления теплообменного устройства от наработки:

- 1 – термическое сопротивление внутренней среды;
- 2 – термическое сопротивление внешней среды;
- 3 – термическое сопротивление наружных загрязнений;
- 4 – термическое сопротивление внутренних загрязнений;
- 5 – суммарное термическое сопротивление теплообменного устройства;

$\tau_{вн.з. MAX}$ – продолжительность формирования слоя внутренних загрязнений толщиной $\delta_{вн.з. MAX}$;

$\tau_{нар.з. MAX}$ – продолжительность формирования слоя наружных загрязнений толщиной $\delta_{нар.з. MAX}$

Источник: составлено авторами.

Figure 2 – The dependences of the components of the thermal resistance of the heat exchanger on the operating time

- 1 – the thermal resistance of the internal environment;
- 2 – the thermal resistance of the external environment;
- 3 – the thermal resistance of outer contaminants;
- 4 – the thermal resistance of inner contaminants;
- 5 – the total thermal resistance of the heat exchanger;

$\tau_{вн.з. MAX}$ – the formation duration of the inner contaminant's layer with a thickness of $\delta_{вн.з. MAX}$;

$\tau_{нар.з. MAX}$ – the formation duration of the outer contaminant's layer a with a thickness of $\delta_{нар.з. MAX}$

Source: compiled by the author.

Для определения численных значений указанных величин проведена серия экспериментальных исследований, предполагающих измерение теплового потока как новых, так и загрязнённых воздухо-воздушных теплообменных устройств, а также разрушающих исследований загрязнённых теплообменных устройств, проводимых для измерения толщины слоёв загрязнений.

Для измерения величины теплового потока, отводимого воздухо-воздушным теплообменником, произведена модернизация существующего диагностического стенда, используемого ранее для измерения рабочих характеристик

водо-воздушного теплообменника^{11, 12}. Схема указанного стенда представлена на рисунке 3.

Принцип работы стенда основан на измерении мощности, потребляемой нагревателем, осуществляющим нагрев воды, циркулирующей по замкнутому контуру. Контур включает в себя диагностируемый водо-воздушный теплообменник (см. рисунок 3, 6). Так как мощность тока, расходуемого на нагрев воды, эквивалентна тепловым потерям замкнутого контура, то показания ваттметра, являющегося составной частью измерительно-вычислительного блока 14, отражают значения теплового потока, отводимого теплообменным устройством.

¹¹ Пат. 2544365 Российская Федерация, МПК G01R 22/04, G01N 25/18. Устройство для измерения рабочих характеристик теплообменников / А.П. Пославский, В.В. Филиппов, А.А. Копылов, Л.А. Аверкиев, А.А. Фадеев; заявитель и патентообладатель Пославский А.П. № 2013120564/28; заявл. 06.05.2013; опубл. 20.03. 2015, Бюл. № 8. 6 с.

¹² Пат. 2352925 Российская Федерация, МПК 7 G 01 N 25/18. Устройство для измерения теплового потока / А.П. Пославский, А.В. Хлуденев, В.В. Сорокин; заявитель и патентообладатель Пославский А.П. № 2007141552/28; заявл. 08.11.2007; опубл. 20.04. 2009, Бюл. № 11. 5 с.

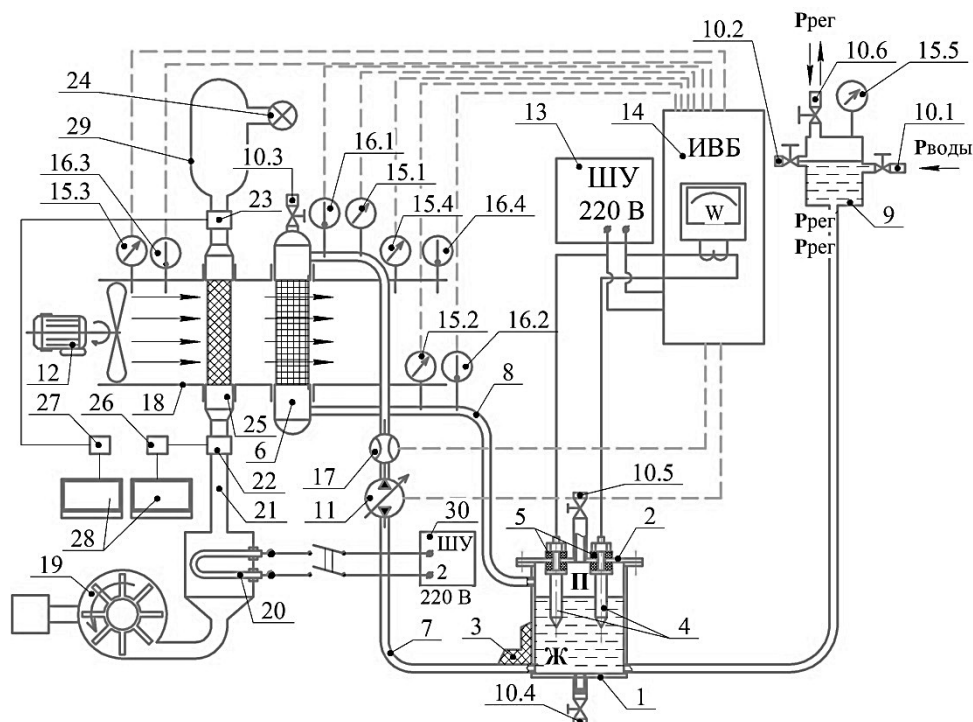


Рисунок 3 – Схема модернизированного стенда для диагностирования теплообменных устройств (патент РФ №2544365 от 09.02.2015 г.):

- 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – теплоизоляция; 4 – электроды;
 5 – изоляторы; 6 – водо-воздушный теплообменник;
 7, 8 – трубопроводы; 9 – расширительная емкость; 10.1-10.5 – вентили;
 11 – водяной насос; 12 – вентилятор; 13 – шкаф управления;
 14 – измерительно-вычислительный блок;
 15.1-15.5 – датчики давления; 16.1-16.4 – датчики температуры;
 17 – расходомер; 18 – воздуховод; 19 – компрессор;
 20 – нагреватель; 21 – воздушная магистраль;
 22-23 – расходомеры воздуха; 24 – клапан выпускной;
 25 – воздухо-воздушный охладитель наддувочного воздуха;
 26, 27 – термодатчики; 28 – компьютер; 29 – ресивер;
 30 – шкаф управления нагревателем воздуха
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Diagram of the improved test bench for diagnosing heat exchangers (Russia, Patent No. 2544365 dated September 2, 2015)

- 1 – body, 2 – cover, 3 – thermal insulation, 4 – electrodes,
 5 – insulators, 6 – water-to-air heat exchanger,
 7, 8 – pipelines, 9 – expansion tank, 10.1-10.5 – valves,
 11 – water pump, 12 – fan, 13 – control cabinet,
 14 – measuring and computing unit,
 15.1-15.5 – pressure sensors, 16.1-16.4 – temperature sensors,
 17 – flow meter, 18 – air duct, 19 – compressor,
 20 – heater, 21 – air line,
 22-23 – air flow meters, 24 – exhaust valve,
 25 – charge air cooler,
 26-27 – thermal sensors; 28 – computer; 29 – receiver;
 30 – air heater control cabinet
 Source: compiled by the author.

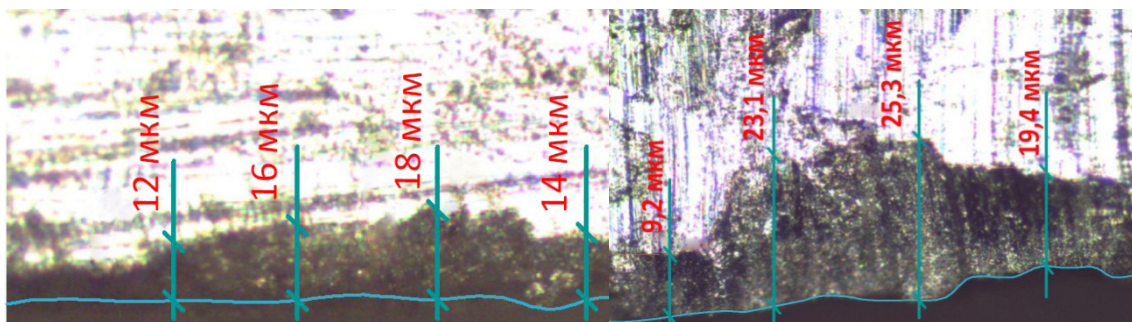


Рисунок 4 – Структура слоя загрязнений на внутренних поверхностях теплообменного устройства
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – The structure of the contamination layer on the inner surfaces of the heat exchanger
Source: compiled by the author.

По результатам модернизации, запатентованная конструкция стенда дополнена блоком, позволяющим производить исследование теплообменных характеристик воздухо-воздушных теплообменных устройств. В состав разработанного дополнительного блока включены: компрессор (см. рисунок 3, 19); нагреватель 20; расходомеры воздуха 22 и 23, установленные на входной и выходной воздушных магистралях, соединённые с термодатчиками 26 и 27, передающие сигнал на компьютер 28. Выходная воздушная магистраль дополнительного блока соединена с ресивером 29, имеющем в своём составе предохранительный выпускной клапан 24, который обеспечивает создание противодавления в выпускной магистрали.

Величина теплового потока, отводимого диагностируемым воздухо-воздушным охладителем 25, определяется по изменению мощности, потребляемой водяным нагревателем и измеряемой ваттметром измерительно-вычислительного блока 14, при пропуске нагретого воздуха через внутренний контур исследуемого охладителя 25.

Исследование толщины слоя загрязнений, образующихся как на внутренних, так и на наружных поверхностях теплообменного устройства произведено методом разрушающего контроля. В процессе проведения эксперимента фрагмент, вырезанный из сердцевины исследуемого охладителя, заливался эпок-

сидной смолой, зашлифовывался и подвергался микрометрическим измерениям.

Метод разрушающего контроля применён в отношении выборки охладителей наддувочного воздуха модели 43085, эксплуатируемого в комплекте с турбированными двигателями семейства КамАЗ (16 ед.), имеющих различную наработку, и, как следствие, различную толщину слоёв сформированных загрязнений. Структура и объём выборки определены на основе известных методов планирования эксперимента, обработки и оценки достоверности результатов экспериментальных. На рисунке 4 приведены фотографии, иллюстрирующие структуру и внешний вид слоёв загрязнений, образующихся на внутренних поверхностях теплообменного устройства. Толщина слоя загрязнений определена как среднее значение нескольких замеров, выполненных по каждому из исследуемых фрагментов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе полученных экспериментальных данных определены зависимости толщины слоёв загрязнений, образующихся на наружных и внутренних поверхностях охладителей наддувочного воздуха модели 43085, эксплуатируемого в комплекте с турбированными двигателями семейства КамАЗ. Графики, иллюстрирующие указанные зависимости, представлены на рисунке 5.

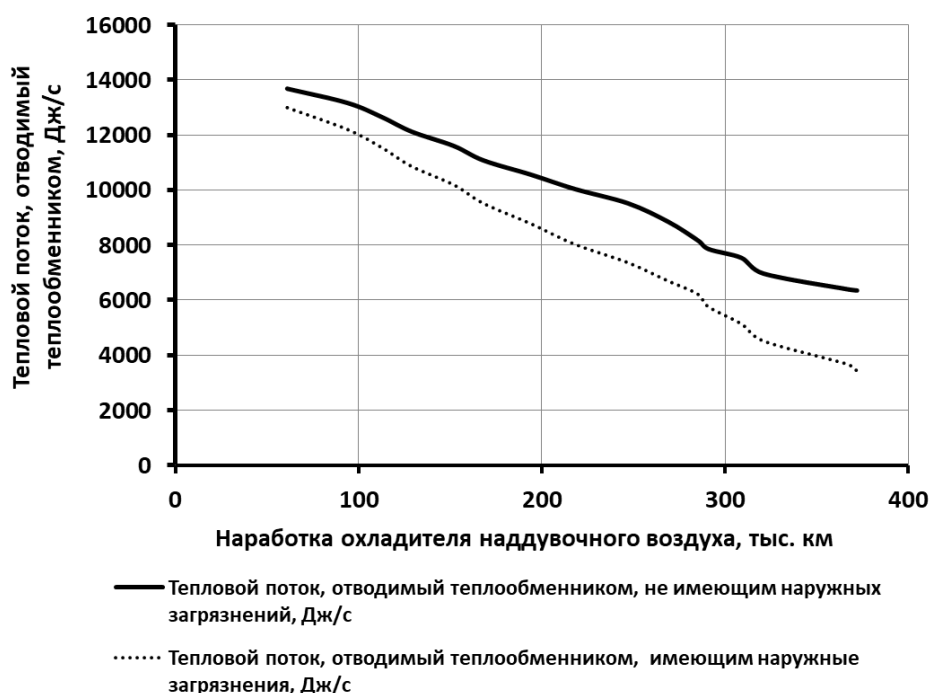


Рисунок 5 – Зависимость толщины слоёв загрязнений, образующихся на поверхностях охладителя наддувочного воздуха модели 43085 в эксплуатации
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Dependence of the thickness of contaminants' layers appearing on the surfaces of the air cooler model 43085 in operation
Source: compiled by the author.

Исходя из вида полученных зависимостей, можно сделать вывод о подтверждении основных положений, выдвинутых в теоретической части исследования. На основе анализа результатов исследования установлено, что в заданных условиях эксплуатации для интеркулера модели 43085, эксплуатируемого совместно с двигателями семейства КамАЗ, предельная толщина слоёв загрязнений, образующихся в процессе эксплуатации, составляет около 70 мкм. Нарботка, при которой формируются загрязнения предельной толщины как на наружных, так и на внутренних поверхностях, составляет около 350 тыс. км.

По результатам оценки величины теплового потока, отдаваемого охладителем наддувочного воздуха, определены средние значения коэффициентов теплопроводности загрязнений, формируемых на наружных и внутренних поверхностях.

Установленное значение коэффициента теплопроводности наружных загрязнений составляет $\lambda_{\text{нар.з.}} = 4,79 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$.

Значение коэффициента теплопроводности внутренних загрязнений: $\lambda_{\text{вн.з.}} = 1,56 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$.

Полученные данные, при их совместном использовании с расчётными формулами, представленными в теоретической части исследования, позволяют произвести моделирование теплового потока отдаваемого охладителем наддувочного воздуха при заданной наработке с начала эксплуатации. На основе результатов моделирования представляется возможным определение степени охлаждения наддувочного воздуха, что является основой для оценки его влияния технико-эксплуатационной характеристики двигателя и на показатели эффективности эксплуатации автотранспортного средства.

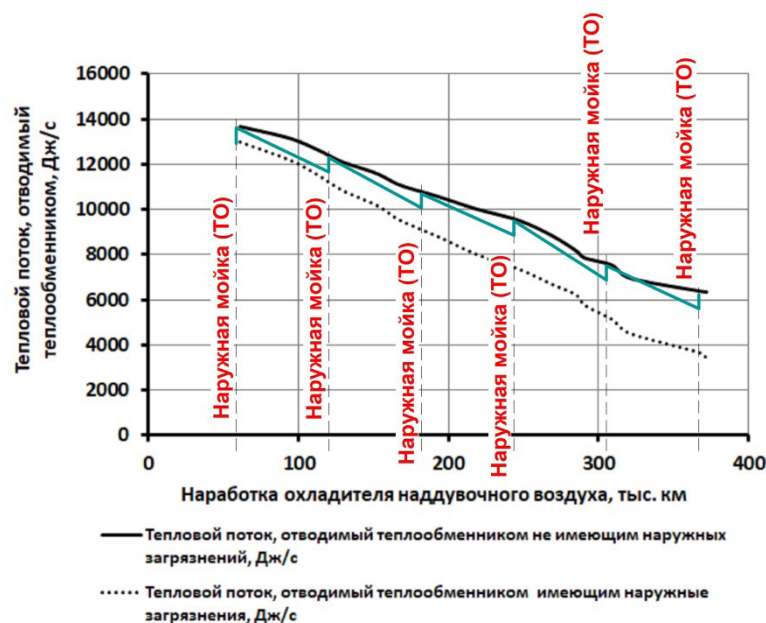


Рисунок 6 – Зависимости теплового потока, отдаваемого охладителем наддувочного воздуха модели 43085 от наработки при проведении промывки наружных поверхностей:

— — — — — очистка рабочих поверхностей охладителя от эксплуатационных загрязнений не производится;

————— — производится мойка наружных поверхностей охладителя при выполнении ТО

Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Dependences of the heat flow discharged by the charge air cooler model 43085 on the operating time during outer surfaces' washing

— — — — — cleaning of the working surfaces of the cooler from operational contaminants is not performed;

————— — maintenance cleaning of the outer surfaces of the cooler is performed

Source: compiled by the author.

Одним из мероприятий, направленных на повышение эффективности воздухо-воздушного охладителя наддувочного воздуха и достаточно легко реализуемым в эксплуатации, является наружная мойка охладителя, выполняемая при помощи моечных аппаратов высокого давления. В плане решения четвертой поставленной задачи выполнено моделирование теплового потока, отдаваемого охладителем. Моделирование проведено для двух вариантов организации обслуживания рассматриваемого узла. Первый вариант – очистка рабочих поверхностей охладителя от эксплуатационных загрязнений не производится. Второй вариант – при выполнении планового технического обслуживания производится мойка наружных поверхностей охладителя при помощи моечного аппарата высокого давления. Результаты моделирования представлены на рисунке 6.

Исходя из высокой трудоёмкости и низкой эффективности известных способов очистки

внутренних поверхностей охладителя при его относительно невысокой стоимости, рассмотрен вопрос о целесообразности его плановой замены.

На основе анализа результатов исследований, направленных на оценку влияния степени охлаждения наддувочного воздуха на показатели эффективности работы турбированных дизелей [16, 17] установлено, что повышение температуры воздуха, подаваемого в цилиндры двигателя на 10°C приводит к снижению его плотности в среднем на 3%, что приводит к пропорциональному снижению мощности и топливной экономичности. На рассматриваемом интервале зависимость расхода топлива от температуры наддувочного воздуха близка к линейной, что позволяет сделать допущение о линейном характере зависимости расхода топлива от толщины слоёв загрязнений, формируемых на поверхностях охладителя.

Установлено влияние толщины слоёв загрязнений на эксплуатационный расход топлива и на обусловленные им эксплуатационные затраты. При известной интенсивности формирования слоёв загрязнений представляется возможным определить зависимость измене-

ния эксплуатационного расхода топлива от наработки. Результаты выполненного расчёта, дополненные результатами технико-экономического анализа целесообразности плановой замены теплообменника, приведены в таблице.

Таблица

Технико-экономические показатели плановой замены охладителя наддувочного воздуха автомобиля КАМАЗ-4308
Источник: составлено авторами.

Table

Technical and economic indicators of the schedule replacement of KAMAZ-4308 charge air cooler
Source: compiled by the author.

Наработка охладителя наддувочного воздуха, тыс. км	0	50	100	150	200	250	300	350
Повышение расхода топлива, %	0	1,4	2,8	4,2	5,6	7	8,4	9,8
Расход топлива, л/100	40,2	40,76	41,33	41,89	42,45	43,01	43,58	44,14
Повышение затрат на топливо, руб/100км	0,0	36,02	72,04	108,06	144,08	180,10	216,12	252,13
Пробег окупаемости, тыс. км	—	80,5	40,3	26,8	20,1	16,1	13,4	11,5
Снижение эксплуатационных затрат при установленной плановой наработке охладителя до замены, руб/км	—	0,501	0,610	0,527	0,395	0,244	0,0834	0,0829

Результаты выполненного расчёта в виде графика приведены на рисунке 7.



Рисунок 7 – Зависимость экономии эксплуатационных затрат от установленной наработки охладителя наддувочного воздуха до плановой замены
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Dependence of the operating cost savings on operating time of the charge air cooler before scheduled replacement
Source: compiled by the author.

На основании данных, представленных в таблице и на рисунке 7, во всём рассматриваемом диапазоне наработок выявлена экономическая целесообразность плановой замены охладителя. Максимальное значение экономического эффекта, обусловленного снижением общих эксплуатационных затрат, выявлено при наработке 100 тыс. км и составляет 0,61 руб/км.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать заключение о достижении поставленной цели на основе результатов решения поставленных задач:

- Определены теоретические положения, описывающие процессы передачи тепла от внутреннего контура охладителя наддувочного воздуха окружающей среде. Усовершенствована методика расчёта теплового потока, позволяющая учесть влияние физических параметров слоёв загрязнений, формируемых на наружных и внутренних поверхностях охладителя на коэффициент термического сопротивления и величину теплового потока передаваемого окружающей среде.

- Разработана математическая модель теплового потока, отводимого охладителем наддувочного воздуха турбированного двигателя внутреннего сгорания в окружающую среду с учётом толщины и теплофизических свойств слоёв загрязнений, формируемых на наружных и внутренних поверхностях. При известных теплофизических свойствах загрязнений и известной скорости их образования модель позволяет выполнить прогнозный расчёт значений теплового потока, отводимого в окружающую среду, при заданной наработке охладителя.

- Для практической реализации разработанной математической модели по результатам серии экспериментальных исследований, выполненных с применением созданного диагностического оборудования, определены зависимости теплового потока, отводимого охладителем наддувочного воздуха турбированных автомобильных двигателей в атмосферу, от толщины слоя загрязнений и от наработки с начала эксплуатации. Установлены коэффициенты теплопроводности загрязнений, формируемых на наружных и внутренних поверхностях охладителя. Для наружных загрязнений: $\lambda_{\text{нар.з.}} = 4,79 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; для внутренних загрязнений: $\lambda_{\text{вн.з.}} = 1,56 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

- В качестве рекомендаций по повышению эффективности эксплуатации автотранспорт-

ных средств предложено (для автомобилей семейства КамАЗ, оснащённых турбированными двигателями): выполнять мойку наружных поверхностей охладителя наддувочного воздуха с периодичностью не реже периодичности выполнения работ ТО-2; производить плановую замену охладителя наддувочного воздуха с периодичностью около 100 тыс. км пробега). Указанные мероприятия обеспечивают снижение эксплуатационных расходов в размере 0,6 руб/км.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Савостин А.Ф., Тихонов А.М., Беляева Н.И. Интенсификация теплоотдачи в щелевых каналах охлаждения // Труды ЦИАМ. 1974. № 611. С. 74–92.
2. Гриценко А.В., Кожанов В.Н., Медведев А.Н., Адигамов Н.Р., Гималтдинов И.Х. Исследование выходных характеристик турбокомпрессоров современных сельскохозяйственных машин // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18, № 2(70). С. 57–65. DOI: <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-57-65>
3. Румянцев В.В., Гордеев А.В., Луцко В.А. Анализ технологий повышения эффективности поршневых двигателей // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2024. № 1 (96). С. 76–82.
4. Кулаков А.Т., Карагодин В.И., Якубович И.А. Обеспечение ресурсных и технико-эксплуатационных показателей дизелей за счет восстановления турбокомпрессоров // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2024. № 2 (77). С. 71–81.
5. Лазарев Е.А., Салов А.Ю., Лазарев В.Е. Термодинамика системы «Газовая турбина – эжектор – охладитель наддувочного воздуха» в дизеле с наддувом // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2024. Т. 24, № 3. С. 5–14.
6. Ковриков И.Т., Пославский А.П., Соколов В.И. Диагностирование эксплуатационных характеристик теплообменников транспортной техники // Вестник ОГУ. 2009. № 9 (103) сентябрь. С. 134–138.
7. Лепеш Г.А., Спроге Г.А. Сравнительный анализ методов технического диагностирования при оценке технического состояния объекта // Техничко-технологические проблемы сервиса. Санкт-Петербургский государственный экономический университет (СПбГЭУ). 2016. № 2(36). С. 22–39.
8. Пославский А.П., Фадеев А.А., Михайлов А.Д. Инструментальный контроль и диагностирование технического состояния теплообменников транспортных средств // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2017. № 10. С. 72–76.
9. Пославский А.П., Хлуденев А.В., Фадеев А.А., Сорокин В.В., Трошина Т.В. Ресурсосберегающий метод и средства диагностирования рабо-

чих характеристик теплопередающих поверхностей транспортных и технологических машин // Вестник ОГУ. 2014. №10(171). С. 152–157.

9. Ai-Fu Chang, Kiran Pashikanti, Liu Y.A. Refinery Engineering. Integrated Process Modeling and Optimization // Chemical Engineering Science. 1983. № 38 (5). P. 745–763.

10. Awad M.M. Fouling of heat transfer surfaces // Heat Transfer. Theoretical Analysis, Experimental Investigation and Industrial Systems. Edited Belmiloudi A. 2011. No 1. P. 506–544.

11. Demin A.M., Gorchakova A.A., Naumenko A.P., Odinets A.I. Condition monitoring of heat-exchange equipment of the diesel fuel hydrotreatment processes. // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2141. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5122145>

12. Linnhoff B. [et al] The pinch design method for heat exchanger networks // Chemical Engineering Science. 1983. № 38 (5). P. 745–763.

13. Lemos J.C. [et al] Linear method for the design of shell and tube heat exchangers including fouling modeling // Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 125. P. 1345–1353.

14. Nakao A. [et al] Incorporating Fouling Modeling into Shell-and-Tube Heat Exchangers Design // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2017. Vol. 56 (15). P. 4377–4385. 177.

15. Клименко А.Г. Контроль параметров процесса наполнения газопоршневого двигателя методом малых отклонений // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 3 (41). С. 49–55.

16. Шабалин Д.В., Терещенко Е.С. Влияние температуры наддувочного воздуха на рабочий процесс дизельного двигателя // Вестник СибАДИ. 2012. Выпуск 2 (24). С. 91–95.

REFERENCES

1. Savostin A.F., Tikhonov A.M., Belyaeva N.I. Intensification of heat transfer in slit cooling channels. Aviation engines. 1974; No. 611: 74–92. (in Russ.)

2. Gritsenko A.V., Kozhanov V.N., Medvedev A.N., Adigamov N.R., Gimaltdinov I.Kh. Study of the output characteristics of turbocompressors of modern agricultural machinery. Vestnik of Kazan state agrarian university. Vol. 2023; 18. no 2(70): 57–65. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-57-65>

3. Rumyantsev V.V., Gordeev A.V., Lushcheko V.A. Analysis of technologies for improving the efficiency of piston engines. Socio-economic and technical systems: research, design, optimization. 2024; 1 (96): 76–82. (in Russ.)

4. Kulakov A.T., Karagodin V.I., Yakubovich I.A. Ensuring resource and technical and operational performance of diesels by restoring turbochargers. Bulletin of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI). 2024; 2 (77): 71–81. (in Russ.)

5. Lazarev E.A., Salov A. Yu., Lazarev V.E. Thermodynamics of the «Gas turbine - ejector - charge air cooler» system in a supercharged diesel engine. Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering. 2024; vol. 24, No. 3: 5–14. (in Russ.)

6. Kovrikov I.T., Poslavsky A.P., Sokolov V.I. Diagnostics of operational characteristics of heat exchangers of transport equipment. Vestnik of the Orenburg State University. 2009; No. 9 (103) September: 134–138. (in Russ.)

7. Lepesh G.A., Sproge G.A. Comparative analysis of methods of technical diagnostics in assessing the technical condition of an object. // Technical and technological problems of service. 2016; 2(36): 22–39. (in Russ.)

8. Poslavsky, A.P., Fadeev A.A., Mikhailov A.D. Instrumental control and diagnostics of the technical condition of heat exchangers of vehicles. Intellect. Innovations. Investments. 2017; 10: 72–76. (in Russ.)

9. Poslavsky A.P., Khludenev A.V., Fadeev A.A., Sorokin V.V., Troshina T.V. Resource-saving method and means of diagnosing the performance characteristics of heat transfer surfaces of transport and technological machines. Vestnik of the Orenburg State University. 2014; 10(171): 152–157. (in Russ.)

10. Ai-Fu Chang, Kiran Pashikanti, Liu Y.A. Refinery Engineering. Integrated Process Modeling and Optimization. Chemical Engineering Science. 1983; 38 (5):745–763.

11. Awad M.M. Fouling of heat transfer surfaces. Heat Transfer. Theoretical Analysis, Experimental Investigation and Industrial Systems. Edited Belmiloudi A. 2011; 1: 506–544.

Demin A.M., Gorchakova A.A., Naumenko A.P., Odinets A.I. Condition monitoring of heat-exchange equipment of the diesel fuel hydrotreatment processes. AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2141. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5122145>

12. Linnhoff B. [et al] The pinch design method for heat exchanger networks. Chemical Engineering Science. 1983; 38 (5):745–763.

13. Lemos J.C. [et al] Linear method for the design of shell and tube heat exchangers including fouling modeling. Applied Thermal Engineering. 2017; Vol. 125: 1345–1353.

14. Nakao A. [et al] Incorporating Fouling Modeling into Shell-and-Tube Heat Exchangers Design. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2017; Vol. 56 (15): 4377–4385. 177.

15. Klimenko A.G., Control of the parameters of the filling process of a gas piston engine by the method of small deviations. «Monitoring systems of environment» (MSoE). 2020; 3 (41): 49–55. (in Russ.)

16. Shabalin D.V., Tereshchenko E.S. Influence of charge air temperature on the working process of a diesel engine. Vestnik SibADI. 2012; 2 (24): 91–95. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Дрючин Д.А. Анализ литературных источников и нормативных документов. Разработка методики расчёта параметров теплообмена при функционировании охладителей наддувочного воздуха турбированных дизелей. Проверка и корректировка статьи. Заключение.

Михайлов А.Д. Подготовка диагностического оборудования, отбор образцов теплообменных устройств. Проведение экспериментальных исследований, анализ полученных результатов. Разработка мероприятий по совершенствованию регламента технического обслуживания автомобилей. Оценка эффективности проектных решений.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Dryuchin D.A. Analysis of literary sources and regulatory documents. Development of a methodology for calculating heat exchange parameters during the operation of charge air coolers of turbocharged diesel engines. Checking and correction of the article. Conclusion.

Mikhailov A.D. Preparation of diagnostic equipment, sampling of heat exchange devices. Conducting experimental studies and analyzing the obtained results. Development of measures to improve the regulations for the maintenance of vehicles. Evaluation of the effectiveness of design solutions.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дрючин Дмитрий Алексеевич – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей» Оренбург-

ского государственного университета (460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1311-6462>,

SPIN-код: 5075-0710,

e-mail: dmi-dryuchin@yandex.ru

Михайлов Александр Дмитриевич – соискатель учёной степени «кандидат технических наук» Оренбургского государственного университета (460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3855-7001>,

SPIN-код: 2082-1078,

e-mail: sergienkoorsksw@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Dryuchin Dmitry A. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Orenburg State University (13, Victory Avenue, Orenburg, 460018).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1311-6462>,

SPIN-code: 5075-0710,

e-mail: dmi-dryuchin@yandex.ru

Mikhailov Alexander D. – applicant for the academic degree of "Candidate of Technical Sciences", Orenburg State University (13, Victory Avenue, Orenburg, 460018).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3855-7001>,

SPIN-code: 2082-1078,

e-mail: sergienkoorsksw@mail.ru

Научная статья
УДК 656.13.072:338
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-210-221>
EDN: FEATOQ



МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ЦЕНТРА МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ СХЕМЕ ДОСТАВКИ ТОВАРА

С.А. Жесткова

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
г. Пенза, Россия
s.zhestkova@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследование направлено на разработку методики для определения расположения распределительного центра материальных потоков с учетом формирования кольцевых маршрутов методом фиктивных узлов и ветвей (ФУВ) с целью минимизации общих логистических затрат. Несмотря на достаточное количество существующих способов решения данной проблемы, они имеют некоторые недостатки: не совсем реалистичны и не в полной мере отвечают требованиям логистической оптимизации. Например, существующие алгоритмы не учитывают необходимость посещения ветвей транспортного графа несколько раз и кривизну траектории передвижения.

Разработанная методика имеет более практичное применение в связи с определением расположения распределительного центра по критерию полной транспортной работы, использованием кусочно-линейной аппроксимации для учета кривизны маршрутов, формированием маршрутов доставки точным методом ФУВ, для оптимизации транспортных и минимизации общих логистических затрат. Такая методика может быть использована как провайдером для анализа и выбора места размещения логистического распределительного центра с учетом формирования оптимальных маршрутов доставки товара, так и владельцами крупных ритейлеров.

Материалы и методы. Данная методика включает в себя несколько этапов.

На первом этапе определяется район наиболее вероятного нахождения распределительного центра (РЦ). Вычисляем координаты грузового центра тяжести по формулам сопротивления материалов. В качестве ее веса принимаем количество груза в пунктах. Принимаем гипотезу, что район расположения распределительного центра находится вокруг грузового центра тяжести. Его граница проходит через узлы, наиболее близко расположенные к нему. За узлы принимаются грузовые пункты, перекрестки дорог и точки резкого изменения направления движения. Экспертом могут назначаться дополнительные узлы для уточнения влияния геометрии, длины, а также других параметров траектории передвижения. Дорога между центром тяжести и узлами, как правило, отсутствует.

На втором этапе осуществляется определение рационального расположения регионального центра. Дороги между центром тяжести и узлами нет, поэтому рассчитаны кольцевые маршруты, выходящие из узловых точек методом фиктивных узлов и ветвей. Задача маршрутизации сведена к нахождению одного кольца, проходящего через выбранную узловую точку несколько раз. Учет ограничения производится методом блокировки.

На третьем этапе заменяем ветви криволинейного маршрута передвижения кусочно-линейной интерполяцией. Определяем транспортную работу и координаты центра тяжести прямоугольной эпюры на каждой ветви маршрута. Находим величину полной транспортной работы вокруг координатных осей. Вычисляем координаты регионального центра. Рациональные его координаты принимаем по средним значениям, полученным для каждого выбранного узла.

Результаты. Применение разработанной методики при сетевой доставке товара с расчетного распределительного центра в торговые точки компании ПАО «Магнит» за смену позволило сократить количество маршрутов, время на маршруте 10% и пробег автотранспортных средств на 16%.

Заключение. Предложена методика определения расположения распределительного центра материальных потоков. Разработана программа на основе данной методики. Получены результаты использования предложенной методики на примере компании ПАО «Магнит».

© Жесткова С.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: распределительный центр, координаты, автомобильный транспорт, транспортная работа, расчет, маршрутизация, методика

БЛАГОДАРНОСТИ: автор выражает благодарность анонимным рецензентам и благодарит редакцию журнала за обработку статьи и возможность её опубликования.

Статья поступила в редакцию 13.12.2024; одобрена после рецензирования 07.02.2025; принята к публикации 17.04.2025.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Жесткова С.А. Методика определения расположения распределительного центра материальных потоков при комбинированной схеме доставки товара // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 2. С. 210-221. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-210-221>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-210-221>

EDN: FEATOQ

METHODOLOGY OF DETERMINING THE LOCATION OF THE DISTRIBUTION CENTER OF MATERIAL FLOWS IN A COMBINED SCHEME OF GOODS DELIVERY

Svetlana A. Zhestkova

*Penza State University of Architecture and Construction,
Penza, Russia*

s.zhestkova@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The research is aimed at developing a methodology for determining the optimal location of material flows' distribution center, taking into account the formation of ring routes based on the use of the fictitious nodes and branches' method (FNB), in order to minimize overall logistical costs. Despite the sufficient number of existing ways to solve this problem, they have some disadvantages: they are not entirely realistic and do not completely meet the requirements of logistical optimization. Namely, existing algorithms do not take into account the need to visit the branches of the transport graph several times and the curvature of the movement trajectory.

The developed technique has greater practical application because it deals with determining the optimal location of the distribution center based on the criterion of full vehicle loading, using piecewise linear approximation to account for the curvature of routes, forming delivery routes using the accurate fictitious nodes and branches' method (FNB) to optimize transportation and minimize overall logistical costs. This technique can be used by both providers to analyze and select the location of a logistics distribution center taking into account the formation of optimal routes for the delivery of goods, and by owners of large retailers.

Materials and methods. The developed methodology includes several stages. At the first stage, the area of the most probable location of the distribution center (DC) is determined. We calculate the coordinates of cargo center of gravity using the formulas for the strength of materials. As its weight, we take the amount of cargo in receiving points. We accept the hypothesis that the placing area for distribution center is located around the cargo center of gravity. Its boundary passes through the nodes closest to it. The nodes are cargo points, road intersections and points of abrupt changes in the direction of movement. The expert can assign additional nodes to clarify the influence of geometry, length, and other parameters of the trajectory of movement. As a rule, there is no road between the center of gravity and the nodes. At the second stage, a rational location of the regional center is determined. There is no road between the center of gravity and the nodes. Therefore, ring routes are calculated that originate from nodal points using the method of fictitious nodes and branches. The routing problem is reduced to finding one ring that passes through the selected nodal point several times. The constraint is taken into account by the blocking method. At the third stage, we replace the branches of the curvilinear route of movement with piecewise linear interpolation. We determine the transport work and the coordinates of the center of gravity of the rectangular diagram on each branch of the route. We find the value of the total transport work around the coordinate axes. We calculate

© Zhestkova S.A., 2025



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

the coordinates of the regional center. We accept its rational coordinates according to the average values obtained for each selected node.

Result. The application of the developed methodology for the network delivering goods from the distribution center to the Public Joint Stock Company "Magnit" trading points per shift has reduced the number of routes, time on the route by 10% and the length of the route by 16%.

Conclusion. The methodology for determining the optimal location of the distribution center of material flows has been provided. The program has been developed on the basis of the proposed methodology. Results of the use of the proposed methodology have been obtained by testing on the example of Public Joint Stock Company "Magnit".

KEYWORDS: distribution center, coordinates, automobile transport, transport work, calculation, routing, methodology

ACKNOWLEDGEMENTS: the author expresses gratitude to anonymous reviewers and thanks the editorial board of the journal for processing the article and providing the opportunity to publish it.

The article was submitted: December 13, 2024; approved after reviewing: February 07, 2025; accepted for publication: April 17, 2025.

The author has read and approved the final manuscript.

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

For citation. Zhestkova S.A. Methodology of determining the location of the distribution center of material flows in a combined scheme of goods delivery. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (2): 210-221. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-210-221>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время остро стоит вопрос формирования эффективной логистической инфраструктуры для обслуживания сетевых торговых точек на территории крупных городов. Проблема выбора оптимального места размещения распределительного центра материальных потоков существует достаточно давно [1].

На сегодняшний день имеется множество расчетных моделей для определения расположения распределительных центров материальных потоков с учетом разработки оптимальных маршрутов доставки груза.

Некоторые расчетные модели учитывают только вес груза при разгрузке или погрузке, но не учитывают процесс движения [2], что являются неверным.

С другой стороны, существуют модели, основанные на тарифе [2], которые учитывают косвенно процесс движения через транспортную работу. Недостатком таких моделей является искусственный перенос ее в вершины транспортного графа.

Известно, что в них не производится транспортная работа, поэтому модель также не соответствует физическому процессу перевозки. Аналогичный недостаток имеет модель, основанная на использовании экономических параметров [2].

Применение моделей, где расстояние между пунктами транспортной сети определяется

по воздушной прямой [2], тоже не соответствует действительности.

В работе [2] отклонение от прямой учитывается коэффициентом объезда, который устанавливается с помощью деления суммарной длины катетов на гипотенузу треугольника для каждого пункта транспортной сети. Далее определяется среднее его значение на всем полигоне обслуживания. Недостатком такой модели является большая неточность предложенной аппроксимации.

Цель исследования – разработать методику, позволяющую определять расположение распределительного центра по критерию наименьшей полной транспортной работы с учетом кривизны маршрута [3, 4].

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести обзор моделей размещения распределительных центров, известных на текущий момент, обозначив их преимущества и недостатки;
- разработать методику, позволяющую определять расположение распределительного центра по критерию наименьшей полной транспортной работы с учетом кривизны маршрута;
- предложить вариант повышения эффективности доставки груза на основе использования разработанной методики с распределительного центра в торговые точки компании ПАО «Магнит».

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Методика расчета включает в себя следующие этапы:

1-й шаг. Вводим систему декартовых координат, определяем расстояние между торговыми точками [5].

2-й шаг. Вычисляем координаты грузового центра тяжести и наносим его на карту.

$$x_c = \frac{h_1 x_1 + h_2 x_2 + \dots + h_i x_i}{h_1 + h_2 + \dots + h_i}, \quad (1)$$

$$y_c = \frac{h_1 y_1 + h_2 y_2 + \dots + h_i y_i}{h_1 + h_2 + \dots + h_i}, \quad (2)$$

где x_c и y_c – координаты расположения грузового центра тяжести;

x_i и y_i – координаты i -го пункта; h_i – вес груза в пункте.

3-й шаг. Находим на карте расчётные узлы, наиболее близко расположенные к грузовому центру тяжести.

4-й шаг. Рассчитываем методом ФУВ¹ [6, 7, 8, 9] кольцевые маршруты, проводим аппроксимацию ветвей полученных маршрутов и вычисляем работу на каждой из них:

$$W_i = W_i^{cp} + \dots + W^{asm}, \quad (3)$$

где W_i^{cp} – транспортная работа на перемещение груза;

W^{asm} – работа на перемещение автомобиля.

Тогда формула (3) для ветви преобразуется к виду

$$W_i = (q_i + Q_i)l_i, \quad (4)$$

где q_i – вес груза в кузове автомобиля на ветви маршрута между соседними пунктами;

Q_i – собственный вес автомобиля;

l_i – длина ветви между соседними пунктами маршрута.

5-й шаг. Вычисляем координаты расположения центров транспортной работы:

$$x_c = \frac{W_1 x_1 + W_2 x_2 + \dots + W_i x_i}{W_1 + W_2 + \dots + W_i}, \quad (5)$$

$$y_c = \frac{W_1 y_1 + W_2 y_2 + \dots + W_i y_i}{W_1 + W_2 + \dots + W_i}. \quad (6)$$

Здесь W_i – полная работа на i -й ветви. Ее координаты на ветви обозначены через x_i и y_i .

6-й шаг. Вычисляем среднее значение координат расположения центров транспортной работы и в полученной точке располагаем распределительный центр.

Разработанную методику рассмотрим на примере распределительного центра АО «Тандер» компании ПАО «Магнит». Распределительный центр обслуживает Пензенскую область, Саратовскую область и Республику Мордовия. Проведенные исследования в распределительном центре показали, что за смену он обслуживает 526 торговых точек и использует 92 транспортных средства вместимостью от 19 п/м до 26 п/м. Были обследованы 180 маршрутов доставки товара с распределительного центра в торговые точки, одна из обследованных смен по г. Пенза приведена в таблице 1. Формирование маршрутов осуществляется на основе использования эвристического метода «Свира». У каждого магазина есть свое название. Доставка товара осуществляется в европоддонах и тележках вместимостью 0,5 п/м.

В процессе исследований маршрутов доставки товара с распределительного центра определялись и рассчитывались следующие показатели, которые приведены в таблице 1.

На основе предложенной методики была разработана программа Distribution Center, свидетельство № 2024614147.

Для определения расположения распределительного центра согласно разработанной методике на первом шаге вводим систему декартовых координат и высчитываем расстояние (таблица 2).

¹ Каримов Р.А. Решение задачи коммивояжера двумя различными способами: «венгерский метод» и «метод ветвей и границ» // Международный студенческий научный вестник. 2019. № 1. С. 41–49.

Таблица 1
Существующие показатели работы автотранспортных средств АПТ «Сельта»
компании ПАО «Магнит» за смену
Источник: составлено автором.

Table 1
The existing performance indicators of transportation company "Cel'ta" vehicles
of Public Joint Stock Company "Magnit" per shift
Source: compiled by the author.

№ ав- томо- бия	№ марш- рута	Пункт торговой точки	Кол-во паллет	Длина маршру- та, км	Вре- мя на маршру- те, ч	Длина гру- жёной ездки на маршру- те, км	Длина холосто- го про- бега на маршру- те, км	Транс- портная работа, т.км	Выра- ботка транс- портного сред- ства, т/ч	Выра- ботка транс- портного средства т.км/ч
1	1	Ахуны	1,5	77	4,63	46	31	507,2	3,19	109,55
		Пазл	13,5							
		Арбеково	3,5							
2	2	Кувольсан	4	69	3,9	38	31	572,8	3,18	146,87
		Голдак	1,5							
		Шарман	5,5							
		Кундудо	4,5							
3	3	Ризотто	5	53	3,78	27	26	421,6	3,81	111,53
		Лимпач	8							
		Голдак	5							
4	4	Брага	9	63	3,83	31	32	588,8	3,24	153,73
		Тенор	6,5							
5	5	Распоясывание	9	95	5,18	66	29	862	2,39	166,41
		Подотчетность	6							
		Аптека Арбеково	0,5							
6	6	Бериллий	6	63	4,43	31	32	627,2	3,97	141,58
		Сальса	10							
		Земельный	6							
7	7	Сфера	3,5	72	3,96	41	31	575,2	4,04	145,25
		Садко	8,5							
		Арахисовый	8							
8	8	Теперское	7	78	5,15	49	29	704,8	2,41	136,85
		Тарханы	7							
		Клатч	4,5							
9	9	Златоцвет	6	62	4,48	31	31	562	3,39	125,45
		Каража	9,5							
		Рубра	3,5							
10	10	Агизеппе	7,5	60	3,52	31	29	487,6	2,95	138,52
		Арбеково	5,5							
11	11	Кундудо	2	58	3,97	26	32	386,4	3,12	97,33
		Стоматоскоп	9,5							
		Авокадо	4							
12	12	Коммунист	10	50	3,08	30	20	544	4,16	176,62
		Деление	6							
13	13	Пукетовый	2,5	52	2,87	24	28	248	2,79	86,41
		Рисан	7,5							
14	14	Кубист	6	74	3,7	65	9	486,4	2,49	131,46
		Грейви	1							
		Плюшевый	4,5							
15	15	Бессоновка	15,5	82	3,4	40	42	1016,8	3,65	299,06
16	16	Свисток	6,5	58	3,55	44	14	576	4,39	162,25
		Беляевский	8							
		Грамотей	5							
Итого				1066	63,43	620	446	9166,8	53,16	2328,87

На втором шаге определяем координаты грузового центра тяжести:

$$x_c = \frac{q_1 x_1 + q_2 x_2 + \dots + q_i x_i}{q_1 + q_2 + \dots + q_i} = \frac{6691,297937}{126} = 53,105 \text{ км}; \quad (6)$$

$$y_c = \frac{q_1 y_1 + q_2 y_2 + \dots + q_i y_i}{q_1 + q_2 + \dots + q_i} = \frac{5647.665079}{126} = 44,822 \text{ км}. \quad (7)$$

Таблица 2
Исходные данные
Источник: составлено автором.

Table 2
Initial data
Source: compiled by the author.

№ точки	х, км	у, км	№ точки	х, км	у, км
Пазл П1	53,195	45,019	Сальса П23	53,176	45,049
Кувольсан П2	53,196	45,058	Садко П24	52,478	44,215
Голдак П3	53,229	44,917	Подотчетность П25	53,131	45,020
Шарман П4	53,222	44,921	Бериллий П26	53,223	44,878
Кундудо П5	53,210	45,007	Тарханы П27	53,195	45,037
Лимпач П6	53,221	44,999	Клатч П28	53,223	44,890
Ризотто П7	52,861	45,472	Теперское П29	53,195	45,037
Голдак П8	53,229	44,917	Агизеппе П30	53,206	45,008
Брага П9	53,228	44,939	Сфера П31	53,248	45,245
Распоясывание П10	53,223	44,888	Коммунист П32	53,209	44,953
Тенор П11	53,163	44,985	Ахуны П33	53,223	44,915
Арбеково П12	53,198	45,015	Земельный П34	53,222	44,888
Деление П14	53,189	44,982	Златоцвет П35	53,229	44,916
Каража П15	53,186	44,963	Арахисовый П36	53,210	45,051
Рубра П16	53,224	44,921	Грамотей П37	53,377	45,063
Авокадо П17	53,180	44,999	Свисток П38	53,308	45,041
Бессоновка П18	53,309	45,041	Беляевский П39	53,220	45,252
Рисан П19	53,197	45,006	Пукетовый П40	53,223	44,8781
Кубист П20	53,215	45,055	Кундудо П41	53,210	45,007
Грейви П21	53,222	44,999	Плюшевый П22	53,210	44,971

На третьем шаге определяем расчетные узлы, которые наиболее близко расположены к грузовому центру тяжести, данными узлами будут являться – П27, П11, П16 (рисунок 1).

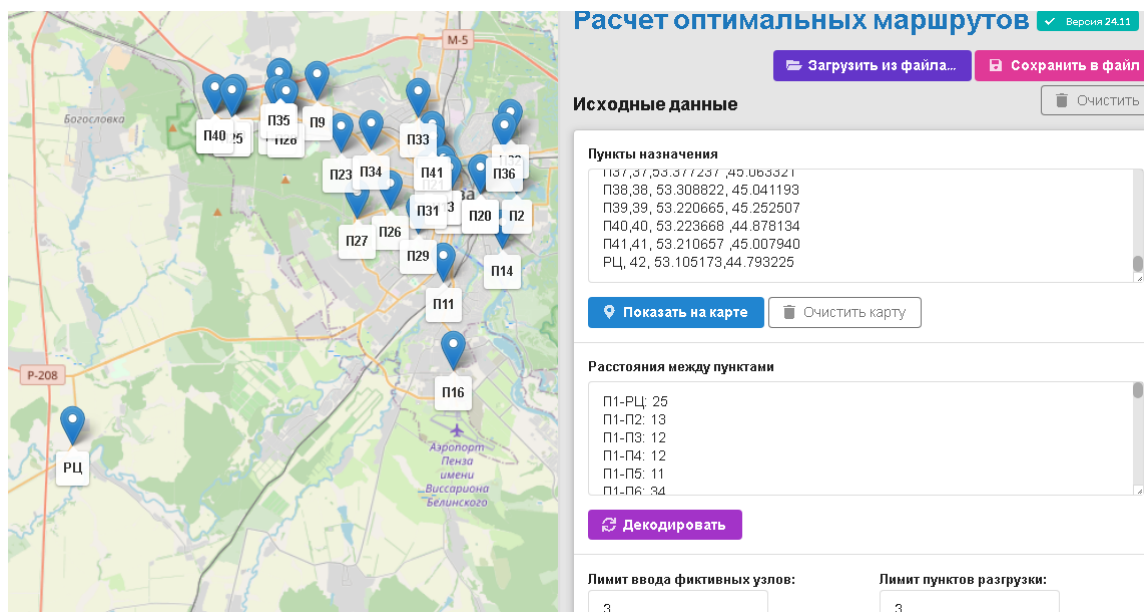


Рисунок 1 – Определение расчетных узлов, наиболее близко расположенных к грузовому центру тяжести с помощью программы Distribution Center
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Determination of the calculation nodes closest to the cargo center of gravity using the program "Distribution Center"
Source: compiled by the author.

Таблица 3
Показатели работы автотранспортных средств в расчетных узлах
Источник: составлено автором.

Table 3
Performance indicators of motor vehicles in the calculated nodes
Source: compiled by the author.

Начало отсчета	Длина маршрутов, км	Транспортная работа, т.км
П27	1027	8831,4
П11	1038	8926,02
П17	1018	8754,03

На четвертом шаге формируем кольцевые маршруты с каждого расчетного узла на основе использования метода фиктивных узлов и ветвей (ФУВ)² [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16], (рисунки 2, 3, 4). Проводим аппроксимацию ветвей полученных маршрутов и определяем

транспортную работу, результаты расчета сведены в таблицу 3.

На пятом шаге рассчитываем координаты расположения центров транспортной работы, результаты расчета сведены в таблицу 4.

² Лещёва М.М. Алгоритм Литтла – в решении задачи коммивояжера // Научному прогрессу – творчество молодых. 2018. № 3. С. 200–203.

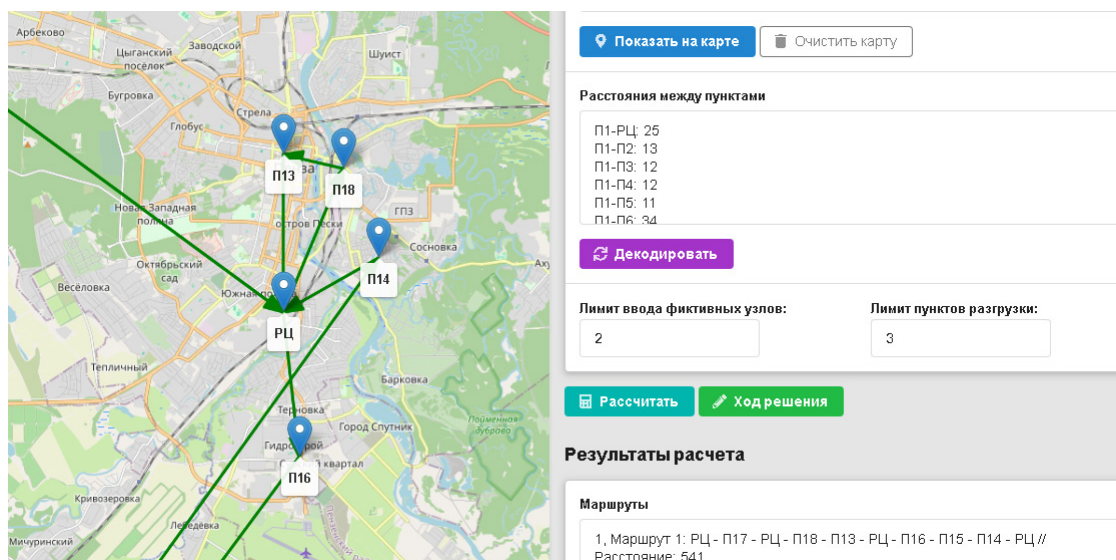


Рисунок 2 – Расчет маршрутов с учетом ограничений с расчетного узла P 27 с помощью программы *Distribution Center*
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Calculation of routes taking into account restrictions from the P 27 calculation node with the help of the program *"Distribution Center"*
Source: compiled by the author.

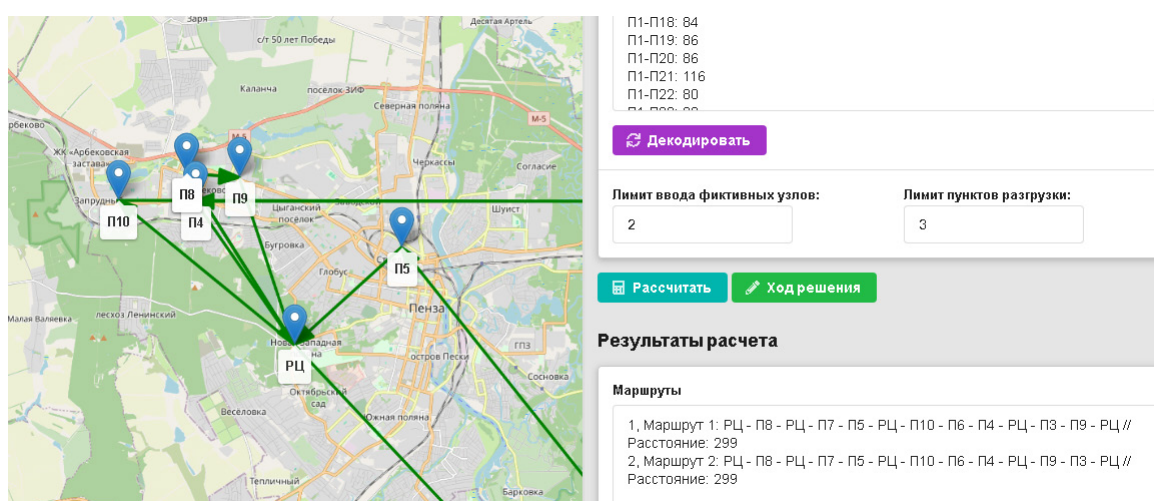


Рисунок 3 – Расчет маршрутов с учетом ограничений с расчетного узла P11 с помощью программы *Distribution Center*
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Calculation of routes taking into account restrictions from the P 11 calculation node with the help of the program *"Distribution Center"*
Source: compiled by the author.

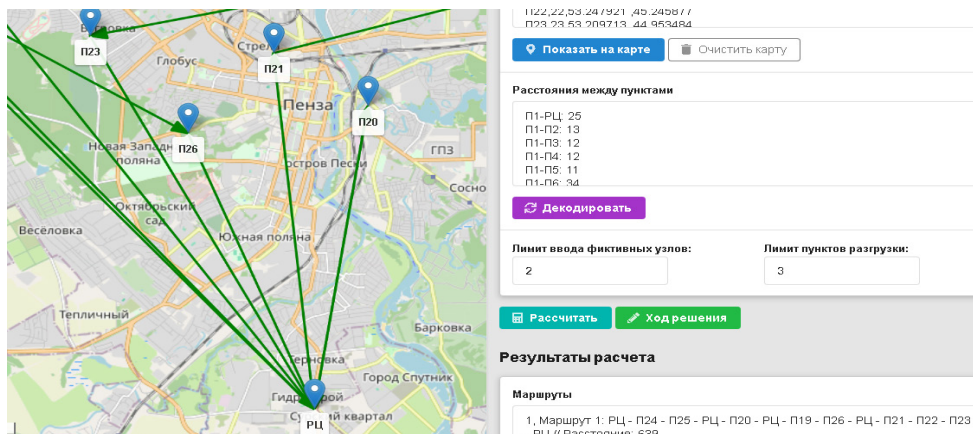


Рисунок 4 – Расчет маршрутов с учетом ограничений с расчетного узла P16 с помощью программы Distribution Center
 Источник: составлено автором.

Figure 4 – Calculation of routes taking into account restrictions from the P16 calculation node with the help of the program "Distribution Center"
 Source: compiled by the author.

На шестом шаге вычисляем среднее значение координат расположения центров транспортной работы и в полученной точке располагаем распределительный центр.

Таблица 4
Результаты расчета
 Источник: составлено автором.

Table 4
Calculation results for the optimal location of the material flow distribution centre
 Source: compiled by the author.

Начало отсчета	х, км	у, км
П27	53,178	44,727
П11	53,199	44,885
П17	53,150	44,896
РЦ	53,176	44,836

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для вычисления эффективности разработанной методики были определены показатели работы автотранспортных средств от расчет-

ного распределительного центра, маршруты формировались точным методом фиктивных узлов и ветвей (ФУВ) с учетом ограничений – вместимость подвижного состава 19 п/м и количество пунктов на маршруте 3.

Таблица 5

Показатели работы автотранспортных средств с расчётного
распределительного центра за смену

Источник: составлено автором.

Table 5

Performance indicators of vehicles from the calculated distribution center per shift

Source: compiled by the author.

№ авто-моби-ля	№ марш-рута	Пункт торговой точки	Кол-во пал-лет	Длина маршру-та, км	Вре-мя на маршру-те, ч	Длина гру-жёной ездки на маршру-те, км	Длина холосто-го про-бега на маршру-те, км	Транс-портная работа, т.км	Выра-ботка транс-порт-ного сред-ства, т/ч	Выра-ботка транс-порт-ного средства т.км/ч
1	1	Пазл	13,5	69	4,13	44	25	894	3,68	216,46
		Кувольсан	4							
		Голдак	1,5							
2	2	Шарман	5,5	62	3,8	22	40	595,4	4	156,68
		Кундудо	4,5							
		Лимпач	8							
3	3	Ризотто	5	59	4	31	28	592,8	3,8	148,2
		Голдак	5							
		Брага	9							
4	4	Распоясывание	9	57	3,17	31	26	645,2	4,79	205,5
		Тенор	6,5							
		Арбеково	3,5							
5	5	Аптека Арбеково	0,5	66	4,77	37	29	489,6	3,19	102,6
		Сальса	10							
		Садко	8,5							
6	6	Подотчетность	6	60	4,47	34	26	550,4	3,4	123,1
		Бериллий	6							
		Тарханы	7							
7	7	Клатч	4,5	71	4,68	50	21	592	3,25	126,5
		Теперское	7							
		Агизеппе	7,5							
8	8	Сфера	3,5	68	4,05	42	26	564,4	3,75	139,4
		Арбеково	5,5							
		Коммунист	10							
9	9	Ахуны	1,5	66	4,43	41	25	583,2	3,43	136,6
		Земельный	6							
		Стоматоскоп	9,5							
10	10	Деление	6	62	4,02	33	29	534,4	3,78	132,9
		Каража	9,5							
		Рубра	3,5							
11	11	Авокадо	4	77	4,03	56	21	1042,4	3,77	258,7
		Бессоновка	15							
12	12	Рисан	7,5	71	4,13	42	29	699,6	3,68	169,39
		Кубист	6							
		Грейви	1							
		Плюшевый	4,5							
13	13	Златоцвет	6	55	3,8	31	24	493,6	4	129,9
		Арахисовый	8							
		Грамотей	5							
14	14	Свисток	6,5	63	3,98	37	26	596,4	3,82	149,8
		Беляевский	8							
		Пукетовый	2,5							
		Кундудо	2							
Итого				906	57,46	531	375	8873,4	52,34	2195,73

Сравнивая показатели работы подвижного состава в таблице 1 и 5, можно сделать вывод, что применение разработанной методики позволило сократить время на 10% и пробег автотранспортных средств на 16%.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье были рассмотрены основные положения и принципиальные отличия известных моделей определения расположения распределительных центров. Их детальное рассмотрение выявило соответствующие недостатки и преимущества, что позволило разработать более практичную методику определения расположения распределительного центра товарных потоков при комбинированной схеме доставки товара. Предложенная методика позволяет определять расположение распределительного центра по критерию наименьшей полной транспортной работы, учитывать кривизну маршрутов, сформировать оптимальные маршруты доставки товара на основе использования точного метода ФУВ. Применение разработанной методики на примере компании ПАО «Магнит» позволило существенно снизить затраты на организацию и доставку товара в торговые точки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дыбская В.В., Сверчков П.А. Подход к проектированию рациональной сети распределения компании сетевой розничной торговли // *Логистика и управление цепями поставок*. 2015. № 1. С. 44–59.
2. Вольхин Е.Т. Модели размещения распределительных центров // *Управленец*. 2018. Т.9, № 2. С. 54–60.
3. Новиков А.Н., Жесткова С.А. Методика проектирования кольцевых маршрутов с обратным грузом. 2024. № 1-3(84). С.19–27.
4. Николин В.И., Витвицкий Е.Е., Мочалин С.М. Грузовые автомобильные перевозки: монография. Омск: Изд-во «Вариант-Сибирь», 2004. 482 с.
5. Убоженко Е.В., Соловьева Ю.Ю., Вдовин С.А. Определение координат месторасположения распределительного центра в логистике с учетом случайной составляющей // *Вестник Алтайской академии экономики и права*. 2024. № 3-3. С. 499–503.
6. Пугачёв И.Н., Бурков С.М. Практическое применение модели кластерных сетевых структур в решении задач повышения эффективности функционирования транспортно-распределительных систем городов // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2010. № 2 (17). С. 121–130.
7. Володина Е.В., Студентова Е.А. Практическое применение алгоритма решения задачи коммивояжера // *Инженерный вестник Дона*. 2015. № 2, ч. 2. С. 96–97.

8. Мартынов А.В., Курейчик В.М. Гибридный алгоритм решения задачи коммивояжера // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2015. № 4 (165). С. 36–44.
9. Бродецкий Г.Л. Применение метода аналитической иерархии для оптимизации места расположения регионального распределительного центра // *Логистика и управление цепями поставок*. 2005. № 6. С. 26–34.
10. Гусев С.А. Проблемы определения местоположения склада // *Логистика*. 2011. №. 2. С. 53–55.
11. Ельдештейн Ю.М., Шапорова З.Е. Управление цепями поставок в лесном комплексе // *Крымский научный вестник*. 2016. №1 (7). С. 323–342.
12. Константинов Р.В. Проектирование оптимальной складской сети // *Инженерный вестник Дона*. 2011. № 4. С. 1–8.
13. Sho S., Haruna M., Yoshifumi N. Ant colony optimization using genetic information for TSP // *Proceedings of the International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications OLT.A.2011. Japan: Kobe*. P. 48–51.
14. Sedighpour M., Yousefikhoshbakht M., Narges M.D. An effective genetic algorithm for solving the multiple traveling salesman problem. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*. 2012; Vol. Volume 4, no. 8: 73–79.
15. Harrath Y. [et al.] A novel hybrid approach for solving the multiple traveling salesmen problem. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*. 2019. Jan. Vol. 26. P. 103–112.
16. Littl J.D.C., Murty K.G., Sweeney D., Karel C. An algorithm for the traveling salesman problem. *Operations Research*. 1963. Vol. 11. P. 972–989.

REFERENCES

1. Dybskaya V.V., Sverchkov P.A. An approach to designing a rational distribution network of a retail chain company. *Logistics and Supply Chain Management*. 2015; 1: 44–59. (in Russ.)
2. Volkhin E.T. Location models for distribution centres. *Upravlenets (The Manager)*. 2018; T.9, 2: 54–60. (in Russ.)
3. Novikov A.N., Gestkova S.A. Methodology for designing ring routes with return cargo. *World of transport and technological machines*. 2024; 1-3(84): 19–27. (in Russ.)
4. Nikoline V.I., Vitvitskyi E.E., Mochalin S.M. Road freight transport: Monograph. Omsk: Edition of «Option-Siberia», 2004: 482. (in Russ.)
5. Ubozhenko E.V., Solovyova Yu.Y., Vdovin S.A. Determining the coordinates of the location of the distribution center in logistics taking into account the random component. *Vestnik Altajskoj akademii je-konomiki i prava*. 2024; 3-3: 499–503. (in Russ.)
6. Pugachev I.N., Burkov S.M. Practical application of the model of cluster network structures in solving problems of increasing the efficiency of urban transport and distribution systems. *Bulletin of PNU*. 2010; 2 (17): 121–130. (in Russ.)
7. Volodina, E.V., Studentova E.A. Practical application of the algorithm for solving the traveling

salesman problem. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2015; 2, part 2: 96–97. (in Russ.)

8. Martynov A.V., Kureichik V.M. Hybrid algorithm for solving the traveling salesman problem. *Izvestiya SFU. Technical sciences*. 2015; 4 (165): 36–44. (in Russ.)

9. Brodetsky G. L. Application of the analytical hierarchy method to optimize the location of a regional distribution center. *Logistics and Supply Chain Management*. 2005; 6: 26–34. (in Russ.)

10. Gusev S. A. Problems of determining the location of a warehouse. *Logistika*. 2011; 2: 53–55. (in Russ.)

11. Eldestein Yu.M., Shaporova Z.E. Supply chain management in the forest complex. *The Crimean Scientific Bulletin*. 2016; 1 (7): 323–342. (in Russ.)

12. Konstantinov R.V. Designing an optimal warehouse network. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2011; 4: 1–8. (in Russ.)

13. Sho S., Haruna M., Yoshifumi N. Ant colony optimization using genetic information for TSP. Proceedings of the International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications OLTA.2011. Japan: Kobe. P. 48 – 51.

14. Sedighpour M., Yousefikhoshbakht M., Narges M.D. An effective genetic algorithm for solving the multiple traveling salesman problem. *Journal of Opti-*

mization in Industrial Engineering. 2012; Vol. Volume 4, no.8: 73–79.

15. Harrath Y. [et al.] A novel hybrid approach for solving the multiple traveling salesmen problem. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*. 2019; Jan. Vol. 26: 103–112.

16. Littl J.D.C., Murty K.G., Sweeney D., Karel C. An algorithm for the traveling salesman problem. *Operations Research*. 1963; Vol. 11: 972–989.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Жесткова Светлана Анатольевна – канд. техн. наук, доц. Пензенского государственного университета архитектуры и строительства (440028, г. Пенза, ул. Г. Титова, 28).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2638-2093>,

SPIN-код: 2680-6016,

e-mail: s.zhestkova@yandex.ru

INFORMATION ABOUT AUTHOR

Zhestkova Svetlana A. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Penza State University of Architecture and Construction (28, Titov Street, Penza, 440028).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2638-2093>,

SPIN-code: 2680-6016,

e-mail: s.zhestkova@yandex.ru

Научная статья
УДК 621.357
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-222-237>
EDN: SOUFGW



ОБОСНОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОСАДОЧНЫХ МЕСТ ПОД ПОДШИПНИКИ ВАЛОВ ТРАНСМИССИИ ТРАНСПОРТА ЖЕЛЕЗО-ХРОМОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

А.Н. Котомчин ✉, А.С. Янута, Е.Ю. Ляхов

Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко,
г. Тирасполь, Молдова

✉ ответственный автор
aleshka81@list.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В процессе эксплуатации автомобилей и другого транспорта происходят изменения технического состояния деталей и узлов агрегатов. С увеличением наработки и пробегов интенсивность отказов возрастает, что приводит к потребности в поддержании техники в работоспособном состоянии путём качественного обслуживания и ремонта. Ремонт деталей выступает как способ продления службы техники путём замены или восстановления изношенных деталей. Известно, что из-за проблем качественного снабжения актуальность восстановления становится очевидной. Из-за возникающих проблем в качественных запасных частях восстановление выступает как способ преодоления выше названных проблем. Однако для целесообразности применения способа восстановления необходимо соблюдать определенные правила, а именно: затраты на ремонт не должны превышать 50% от стоимости новой детали и долговечность должна быть на уровне 80–100%. Поэтому в данной статье приведены результаты анализа нового способа восстановления деталей железо-хромовыми покрытиями, с целью поддержания техники в исправном состоянии.

Материалы и методы. При исследовании использовались литературные и другие источники информации для анализа способов по различным критериям – долговечности, себестоимости использования, износостойкости и другие показатели. Также на основании предварительного анализа был выбран один из перспективных – железохромовое покрытие. Произведены предварительные исследования влияния кислотности на производительность и качество покрытия.

Результаты. Полученные результаты изучения железохромового покрытия, полученного из исследуемого состава электролита с кислотностью 0,4–0,6, дал возможность получить покрытие с достаточно высокой микротвёрдостью (до 8500 МПа), выходом по току (до 40%) и скоростью осаждения (до 200 мкм/ч). Также получаемое покрытие было с небольшим количеством микротрещин, которые позволяли задерживать смазку с возможным увеличением износостойкости.

Обсуждение и заключение. В результате полученное покрытие обладает хорошими физико-механическими свойствами. Поэтому данный способ, возможно, будет использоваться для восстановления посадочных мест под подшипники валов трансмиссии, работающих при абразивном изнашивании.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автомобили, запасные части, оригинальные детали, восстановление, долговечность, износостойкость, железохромовое покрытие, кислотность

БЛАГОДАРНОСТИ: благодарность рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 15.01.2025; одобрена после рецензирования 12.02.2025; принята к публикации 17.04.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Котомчин А.Н., Янута А.С., Ляхов Е.Ю. Обоснование восстановления посадочных мест под подшипники валов трансмиссии транспорта железо-хромовыми покрытиями // Вестник СибаДИ. 2025. Т. 22, № 1. С. 222–237. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-222-237>

© Котомчин А.Н., Янута А.С., Ляхов Е.Ю., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-222-237>

EDN: SOUFGW

SUBSTANTIATING RESTORATION OF BEARINGS MOUNTING AREA IN TRANSPORT TRANSMISSION SHAFTS WITH IRON-CHROME COATINGS

Aleksei N. Kotomchin ✉, **Anton S. Januta**, **Evgenii Yiu. Lyakhov**

*Pridnestrovian State University. named after T.G. Shevchenko,
Tiraspol, Moldavia*

✉ corresponding author
aleshka81@list.ru

ABSTRACT

Introduction. During the operation of cars and other vehicles, the process of changing technical condition of parts and units takes place. With increased operation time and mileage, the failure rate increases, which leads to the problem of maintaining equipment in working condition through high-quality maintenance and repair. Parts repair has been a way to extend the service life of equipment by replacing or restoring the worn parts. Due to the problems of quality supply, the urgency of restoration becomes obvious. Numerous problems with high-quality spare parts cause the restoration as a way to overcome the above-mentioned problems. However, the restoration method should meet certain requirements, in particular, repair costs should not exceed 50% of the cost of a new part and durability should be at the level of 80-100% of the new part. Therefore, this article presents the results of research on a new method of restoring parts with iron-chromium coatings in order to maintain equipment in good condition.

Materials and methods. The investigation was based on literature analysis to study the restoration methods according to various criteria, such as durability, cost of use, wear resistance and other indicators. Also, based on a preliminary analysis, one of the promising methods was selected – iron-chromium coating. Preliminary research into the effect of acidity on the performance and quality of the coating has been carried out.

Results. The study of iron-chromium coating obtained from the composition of an electrolyte with 0.4-0.6 acidity has made it possible to obtain a coating with a sufficiently high microhardness (up to 8,500 MPa), current output (up to 40%) and deposition rate (up to 200 microns/hour). The resulting coating also has demonstrated a small number of microcracks, which made it possible to delay lubrication and provide increase in wear resistance.

Discussion and conclusion. As a result, the coating obtained has shown good physical and mechanical properties. Therefore, it will be possible to use this method to restore the mounting area of bearings in transmission shafts operating under abrasive wear.

KEYWORDS: cars, spare parts, original parts, restoration, durability, wear resistance, iron-chrome coating, acidity

THANKS. Thanks to the reviewers of the article.

The article was submitted: January 15, 2025; approved after reviewing: February 12, 2025; accepted for publication: April 17, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Kotomchin A.I., Januta A.S., Lyakhov E.Y. Substantiating restoration of bearings mounting area in transport transmission shafts with iron-chrome coatings. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (2): 222-237. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-222-237>

© Kotomchin A.I., Januta A.S., Lyakhov E.Y., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

При проведении исследований ремонтного фонда техники, которая эксплуатируется предприятиями Приднестровья, выявлено, что наибольшее количество ресурсопределяющих деталей имеют износ в пределах от 0,05 до 0,5 мм. Для восстановления таких деталей рационально выбирать методы, обеспечивающие наименьшие затраты по материалам, высокую производительность процесса и минимальную последующую механическую обработку восстановленной поверхности. Рассмотренные наиболее широко используемые на практике способы восстановления изношенных поверхностей снижают ресурс деталей на 50% из-за неблагоприятного воздействия на структуру поверхностей или детали в целом¹ [1, 2, 3].

В процессе эксплуатации автомобилей, специализированного автотранспорта, дорожно-строительных машин и другой техники происходят различные этапы изменения технического состояния и надёжности. Известно [4, 5, 6], что с увеличением пробега надёжность снижается, это обусловлено действиями, возникающими в процессе работы механизмов и узлов, которые подвержены износам различного характера². Каждый автомобиль и другая техника в зависимости от своих характеристик и заложенной ещё заводом-изготовителем надёжности имеют свои предельные параметры, при которых может наступать отказ. Это обусловлено многими факторами, из которых выделим основные, влияющие на надёжность и работоспособность техники³ [7, 8, 9, 10, 11]:

1. Условия эксплуатации. Известно, что работа техники в более запыленных и тяжёлых дорожных условиях снижает ресурс высоконагруженных деталей узлов и агрегатов в 2–3 раза.

2. Использование качественных материалов изготовления и упрочнения деталей. Это является важным фактором, так как основная закладка надёжности узла, агрегата происходит при производстве (изготовлении) и если соблюдены все технические требования и характеристики, то деталь будет функционировать практически весь ресурс, который заложен для её работы. Кроме того, часто можно на рынке запасных частей встретить «контрафактные» не оригинальные детали, что приводит к снижению ресурса сопряжения и часто к потере работоспособности узлов или агрегатов в целом.

3. Восстановление деталей. В условиях мирового кризиса, санкционной политики некоторых государств и по другим причинам происходит разрыв связей между государствами, что, в свою очередь, нарушает снабжение качественными оригинальными запасными частями. Поэтому восстановление оригинальных деталей, которые ещё имеют достаточный ресурс, – важное экономическое значение. Также восстановление деталей даёт возможность сократить влияние на экологию в связи со снижением производства стали и другого металла, необходимого для производства новых деталей⁴.

Ввиду того что на современных автомобилях и технике многие детали, имеющие незначительный износ (до 0,1–0,5 мм) [12, 13, 14], могут приводить к потере работоспособности, при этом ресурс самой детали имеет достаточный запас. Поэтому восстановление становится актуальным и необходимым способом поддержания в работоспособном состоянии техники с соблюдением необходимых технико-экономических критериев, а именно ресурса после ремонта и себестоимости восстановления⁵ [13, 14]. Для того чтобы этого достичь необходимо разрабатывать и использовать технологии восстановления, отвечающие современным требованиям и имеющие техниче-

¹ Котомчин А.Н. Восстановление деталей автомобилей, работающих при гидроабразивном изнашивании электролитическим хромированием / А.Н. Котомчин, Е.Ю. Ляхов, В.А. Зорин. Тирасполь: Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, 2024. 176 с. ISBN 978-9975-3610-8-8.

² Поляков А.П., Галушак Д.О. Оценка влияния надёжности автомобиля на формирование номенклатуры и количества запасных частей // Вісник СевНТУ. 2012. № 134. С. 83–85.

³ Скрыпников А.В. Современные ресурсосберегающие методы технического сервиса / А.В. Скрыпников, Е.В. Кондрашова, Т.В. Скворцова. Саарбрюкен: LAP LAMBER, 2012. 105 с. ISBN 978-3-659-28194-5.

⁴ Зорин В.А. Анализ влияния качества запасных частей на долговечность строительных машин / В.А. Зорин, Д.В. Серегин // Техника и технология транспорта. 2019. № S(13). С. 30.

⁵ Павлишин С.Г. Обеспечение надёжности автомобилей КамАЗ в гарантийный период эксплуатации // Автотранспортное предприятие. 2015. № 2. С. 25–28.

ские возможности использования в условиях ремонтных предприятий⁶.

Выполненный анализ существующих способов [15, 17, 18, 19, 20], которые используются при восстановлении деталей техники, установил, что каждый способ имеет свою область применения в зависимости от факторов, перечисленных выше. Кроме того, к способу восстановления предъявляются следующие требования:

1. Небольшие энергетические и материальные затраты (не более 50% от новой).
2. Достаточный ресурс восстановленной детали (не менее 80% от новой).
3. Возможность увеличения технических параметров за счёт увеличения износостойкости, прочности и т.п.

Проведенный анализ отказов автомобилей и другой техники в источниках [19, 20, 21] показал, что при использовании в тяжёлых эксплуатационных условиях износые характеристики (износ поверхности, наличие микротрещин, царапины, сколы), снижающие ресурс деталей, увеличиваются, что снижает работоспособность в целом. Так, из [19, 20, 21] известно, что при таких условиях внешнего воздействия на технику именно трансмиссия подвержена наибольшему износу и снижению надёжности. Это обусловлено наличием высоких нагрузок на детали, что приводит к появлению продуктов износа, приводящих к повышенному абразивному износу. Особенно это касается посадочных мест под подшипники, зубьев шестерен и шлицев.

Так, согласно [22, 23, 24] причинами отказов трансмиссии более чем в 60% случаев являются детали, подверженные абразивному изнашиванию⁷. В основном при достижении предельного ресурса или износа детали заменяют на новые или заранее отремонтированные. Однако исследования, приведенные в [25, 26, 27], показали, что применение новых деталей может приводить к значительному снижению надёжности из-за явлений, проис-

ходящих в процессе приработки⁸. Также известно, что использование восстановленных деталей, которые уже ранее были в неисправном узле или механизме, снижает вероятность возникновения абразивного износа из-за снижения времени приработки и наличия продуктов износа [28, 29, 30, 31, 32].

Поэтому на основании вышеизложенного можно сделать вывод, что восстановление деталей, при условии соблюдения технико-экономических критериев, имеет достаточно большую перспективу для использования как способа поддержания автомобилей и другой техники в работоспособном состоянии.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

После проведенного анализа существующих дефектов валов механических трансмиссий и задних мостов были сделаны выводы, что основными дефектами их являются: посадочные места под подшипники, износ шлицев и зубьев и др. деталей, которые подвержены абразивному изнашиванию. При износе более 0,05–0,5 мм посадочное место под подшипник становилось неработоспособным и приводило к отказу. Поэтому использование определенных способов восстановления устраняло данный дефект и давало возможность повторно использовать вал с необходимым запасом ресурса.

Для того чтобы рационально выбрать способ восстановления посадочных мест под подшипники валов механической трансмиссии, необходимо провести научно-техническое обоснование выбора способа с учётом требований к условиям эксплуатации техники. Далее решается задача по обоснованию использования восстановления как способа поддержания автомобиля в работоспособном состоянии с учётом требований к восстанавливаемой детали⁹.

Существует классический расчёт выбора способа восстановления, предложенный ещё профессором В.А. Шадричевым [33, 34, 35, 36, 37,38]:

⁶ Зорин В.А. Применение аддитивных технологий при изготовлении деталей машин / В.А. Зорин, М.И. Тимченко // Механизация строительства. 2018. Т. 79, № 1. С. 5–8.

⁷ Черных В.А., Аткишкин А.И., Песин М.В. Упрочняющее электромеханическое восстановление посадочных поверхностей валов под подшипники качения // Химия. Экология. Урбанистика. 2021. Т.1. С. 293–297.

⁸ Timokhova O., Burmistrova O., Shakirzyanov D. [et al.] Technological, cycle and actual productivity of the surfacing process in the restoration of parts of forest machines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Kuala Lumpur, 02–05 декабря 2019 года. Kuala Lumpur, 2020. P. 012015. DOI 10.1088/1757-899X/839/1/012015.

⁹ Корнейчук Н.И., Лялякин В.П. Перспективы использования промышленных методов восстановления изношенных деталей машин гальваническими и полимерными покрытиями в современных условиях развития агропромышленного технического сервиса // Труды ГОСНИТИ. 2018. Т.130. С. 254–264.

$$K_T = \frac{C_B}{K_d} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где C_B – себестоимость восстановления 1 дм² изношенной поверхности детали различными способами, руб./дм²;

K_d – коэффициент долговечности, характеризующий физико-механические и прочностные характеристики восстановленной поверхности детали.

Однако данный способ не учитывает многих факторов (организацию ремонта, физико-механические свойства покрытий, сравнение с новой деталью и т.п.), поэтому в современных условиях необходимо учитывать вновь создаваемые технологии и возможности их применения с учётом современного производства и технико-экономических требований¹⁰.

Также рассмотрим один из универсальных подходов при выборе способа восстановления деталей, в частности посадочных мест под подшипник вала трансмиссии (далее детали), данную А.Н. Батищевым А.Н. [38, 39, 40], который предложил для этого использовать энергетический критерий, определяемый по формуле¹¹

$$W = \frac{K_{1i} \cdot K_{2i}}{K_{di}} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где K_{1i}, K_{2i} – значение коэффициентов соответственно энергоёмкости и трудоёмкости технологического процесса восстановления деталей i -м способом;

K_{di} – коэффициент долговечности, восстановленного посадочного места под подшипник вала механической трансмиссии.

Кроме энергетического критерия оценки способа восстановления существуют другие, которые могут влиять на общее обоснование при его использовании¹².

Рассмотрим некоторые из них, проанализировав их по значению и применению.

Коэффициент технико-экономической эффективности [41, 42, 43] по формуле

$$K_{ТЭЭ} = \frac{C_B}{C_H \cdot K_{пр}}, \quad (3)$$

где C_B, C_H – себестоимость восстановления деталей и стоимость новой соответственно, руб.;

$K_{пр}$ – коэффициент приведения, учитывающий реальные условия ремонта [44], который зависит от параметров, определяемых по формуле

$$K_{пр} = K_{ор} + K_{св} + K_{кз}, \quad (4)$$

где $K_{ор}$ – коэффициент, определяющий способ организации технологии ремонта (чем больше партия восстанавливаемых деталей, тем ниже значение коэффициента);

$K_{св}$ – коэффициент, учитывающий связь предприятия с поставщиками запасных частей, материалов и т.п. (чем ближе к источнику снабжения расходными материалами и запасными частями, тем меньше его значение);

$K_{кз}$ – коэффициент, учитывающий конъюнктурный спрос на данную деталь, а это зависит от частоты отказов восстановленного посадочного места под подшипник вала механической трансмиссии.

Данный критерий определяет технико-экономические затраты на восстановление или ремонт. Однако различные способы восстановления имеют различные значения данного коэффициента, но при условии их использования для предприятий как в единичном, так и в массовом производстве. Данный коэффициент также используется при оценке технологии ремонта путем обычной замены детали. Однако его значение при этом будет очень сильно меняться в зависимости от места ремонта и возможностей снабжения предприятия запасными частями. Так, например, ремонт автомобиля КамАЗ в Набережных Челнах, в городе, где производятся сами автомобили, будет самым дешёвым, в виду доступности запасных частей, поэтому коэффициент будет иметь высокое значение. С удалением места ремонта автомобиля стоимость возрастает. Это связано с логистикой и ограничениями возможности снабжения запасными частями. При использовании способа восстановления детали такой критерий будет зависеть только от материальных и энергетических затрат. Условием реализации выбранной технологии восстановления на предприятии будет место расположения, где техника нуждается в ремонте, в достаточном количестве, т.е. возможность организации ремонта централизованно [44, 45].

¹⁰ Серебровская Л.Н., Серебровский А.В., Шутченко Д.Л. Электроосаждение сплавов железо–хром // Региональный вестник. 2016. № 1(2). С. 46–47.

¹¹ Серебровский В.В., Серебровская Л.Н., Сафронов Р.И. [и др.]. Прогнозирование свойств электроосажденных покрытий на основе железа // Электрика. 2015. № 11. С. 36–37.

¹² Серебровская Л.Н., Блинков Б.С., Павлов П.А. [и др.]. Легирование хромом электролитических железных покрытий // Региональный вестник. 2016. № 2(3). С. 37–38.

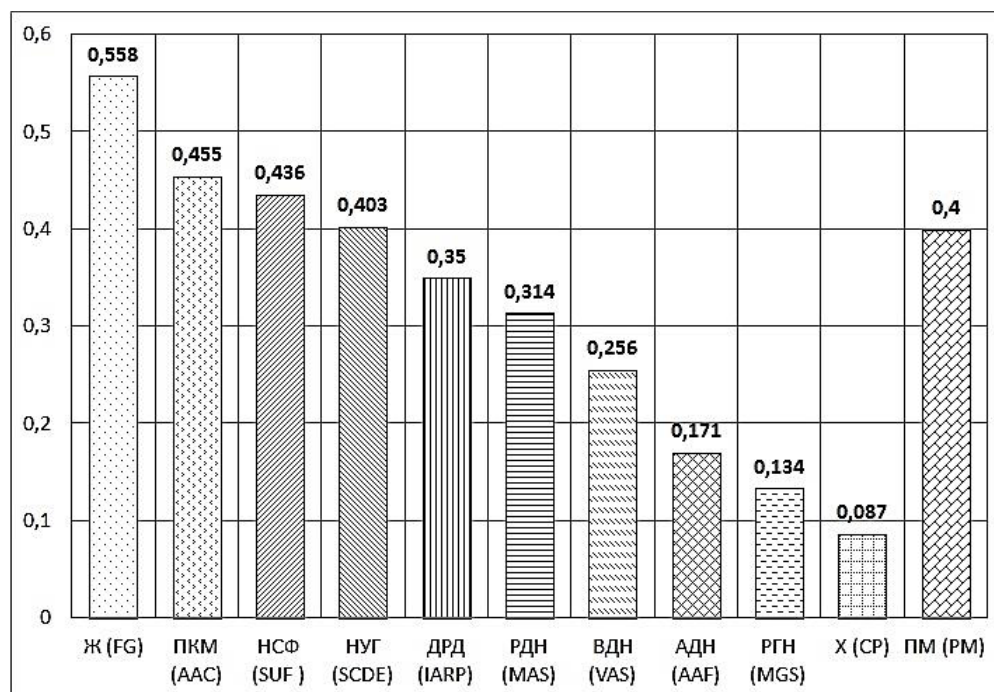


Рисунок 1 – Сравнительный анализ значений коэффициентов технико-экономической эффективности способов восстановления изношенной поверхности детали (C_e/K_e):

Ж – железнение с использованием постоянного тока; ПКМ – нанесение клеевых композиций; НСФ – наплавка под слоем флюса; НУГ – наплавка в среде углекислого газа; ДРД – постановка дополнительной ремонтной детали; РДН – ручная дуговая наплавка; ВДН – вибродуговая наплавка; АДН – аргоно-дуговая наплавка; РГН – ручная газовая наплавка; Х – хромирование; ПМ – плазменная металлизация [44, 45]

Figure 1 – Comparative analysis of the coefficients of technical and economic efficiency of methods for restoring a worn-out surface of a part (C_e/K_e):

FG – ferrugination, AAC – application of adhesive compositions, SUF – surfacing under a layer of flux, SCDE – surfacing in a carbon dioxide environment, IARP – installation of an additional repair part, MAS – manual arc welding surfacing, VAS – vibro-arc surfacing, AAF – argon-arc surfacing, MGS – manual gas surfacing, CP – chrome plating, PM – plasma metallization [44, 45]

На рисунке 1 рассмотрено значение коэффициента технико-экономической эффективности в зависимости от способа восстановления. Однако данный критерий не охватывает оценку применимости данного способа для деталей, работающих при определенных условиях эксплуатации, или не конкретизирует сравнение возможности их использования для одной и той же детали. Это обусловлено тем, что выбор способа зачастую зависит от области применения и условий эксплуатации, т.е. от конкретной детали. Она может быть изготовлена из различных материалов, с разными физико-механическими свойствами в зависимости от условий ее работы и эксплуатации [44, 45].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для того чтобы понять методику выбора способа восстановления детали, необходимо произвести анализ характеристик технологии восстановления, позволяющий получить информацию о целесообразности применения ее для выбранной детали техники.

Перечислим основные характеристики, которые имеют определяющее значение при выборе способа восстановления: износостойкость, выносливость, сцепляемость (адгезия с подложкой), толщина и микротвердость покрытия, себестоимость технологии восстановления.

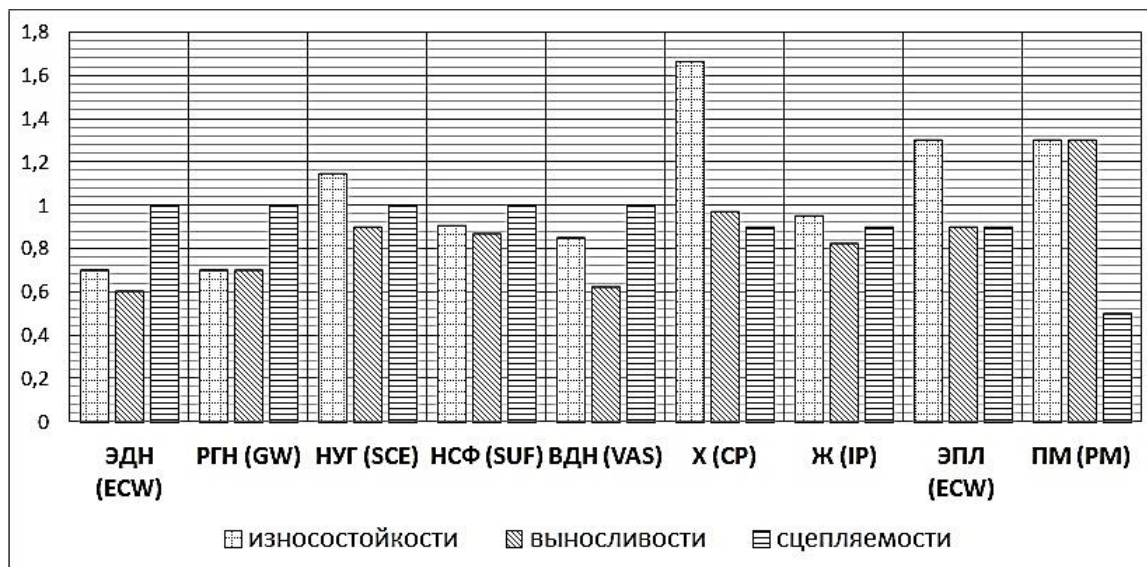


Рисунок 2 – Значение оценочных коэффициентов, в зависимости от способа восстановления:
 ЭДН – электродуговая наплавка; РГН – газовая сварка;
 НУГ – наплавка в среде CO_2 ; НСФ – наплавка под слоем флюса;
 ВДН – вибродуговая наплавка; Х – хромирование; Ж – железнение;
 ЭПЛ – электроконтактная приварка ленты;
 ПМ – плазменная металлизация [46, 47]

Figure 2 – The value of the estimated coefficients, depending on the recovery method:
 ECW – electric arc welding, GW – gas welding, SCE – surfacing in a CO_2 environment,
 SUF – surfacing under a layer of flu, VAS – vibro-arc surfacing, CP – chrome plating,
 IP – iron plating, ECW – electrocontact welding of tape, PM – plasma metallization [46, 47]

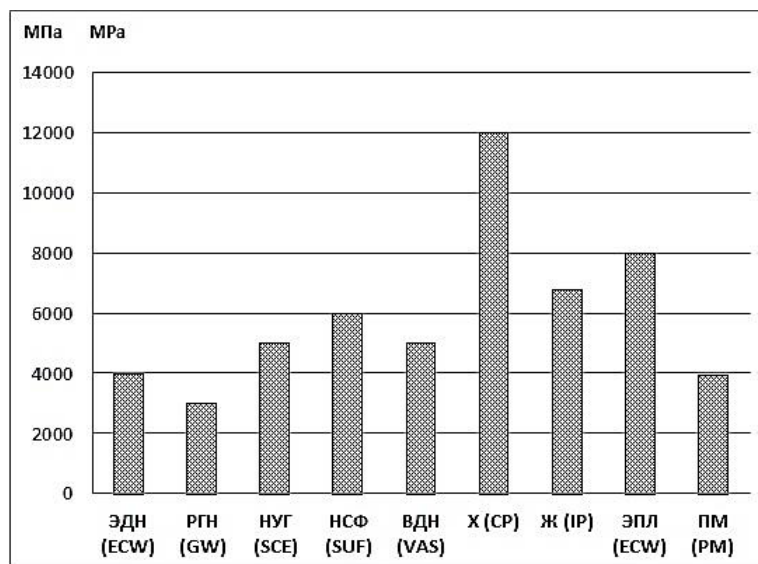


Рисунок 3 – Значение микротвёрдости поверхностей, восстановленных различными способами, МПа:
 ЭДН – электродуговая наплавка; РГН – газовая сварка; НУГ – наплавка в среде CO_2 ;
 НСФ – наплавка под слоем флюса; ВДН – вибродуговая наплавка; Х – хромирование;
 Ж – железнение; ЭПЛ – электроконтактная приварка ленты;
 ПМ – плазменная металлизация [46, 47]

Figure 3 – The value of the microhardness of the surfaces restored in various ways, MPa:
 ECW – electric arc welding, GW – gas welding, SCE – surfacing in a CO_2 environment,
 SUF – surfacing under a layer of flu, VAS – vibro-arc surfacing, CP – chrome plating, IP – iron plating,
 ECW – electrocontact welding of tape, PM – plasma metallization [46, 47]

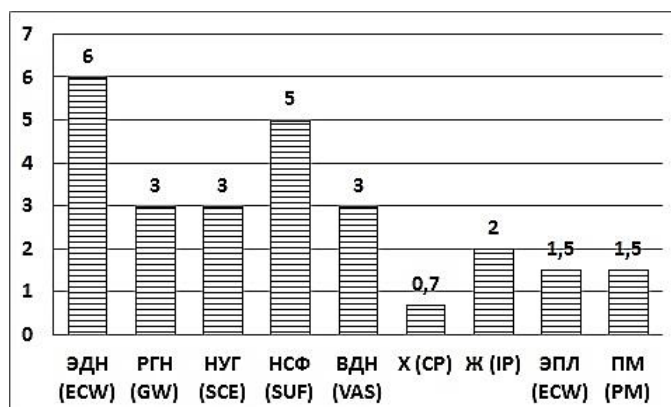


Рисунок 4 – Максимально возможная толщина слоя восстанавливаемого покрытия, мм:
 ЭДН – электродуговая наплавка; РГН – газовая сварка; НУГ – наплавка в среде CO_2 ;
 НСФ – наплавка под слоем флюса; ВДН – вибродуговая наплавка; Х – хромирование;
 Ж – железнение; ЭПЛ – электроконтактная приварка ленты;
 ПМ – плазменная металлизация [48, 49]

Figure 4 – Maximum possible thickness of the restored coating, mm:
 ECW – electric arc welding, GW – gas welding, SCE – surfacing in a CO_2 environment,
 SUF – surfacing under a layer of flu, VAS – vibro-arc surfacing, CP – chrome plating, IP – iron plating,
 ECW – electrocontact welding of tape, PM – plasma metallization [48, 50]

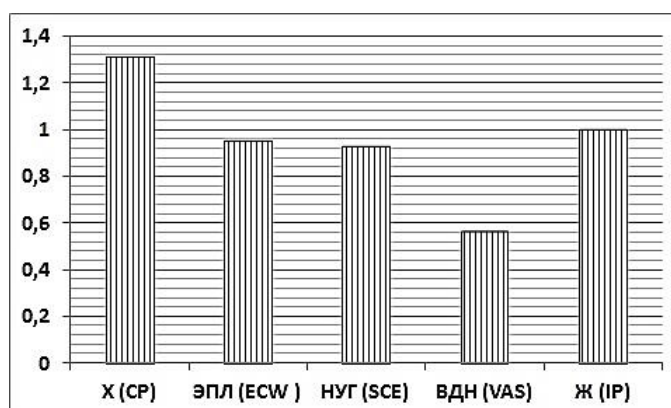


Рисунок 5 – Значение коэффициента долговечности при восстановлении посадочных мест под подшипники вторичного вала МКП автомобиля КамАЗ:
 Х – хромирование; ЭПЛ – электроконтактная приварка лент; НУГ – наплавка в среде CO_2 ;
 ВДН – вибродуговая наплавка; Ж – железнение [48, 49]

Figure 5 – The value of the durability coefficient during the restoration of mounting area for bearings of the secondary shaft of the manual transmission in KamAZ vehicle:
 CP – chrome plating, ECW – electrocontact welding of the tape, SCE – surfacing in a CO_2 environment,
 VAS – vibration arc surfacing, IP – iron plating [48, 49]

Проанализировав рисунки 2, 3, 4, в которых проведено сравнение характеристик различных способов восстановления, можно сделать вывод, что выбор способа должен осуществляться исходя из физико-механических характеристик детали, которую необходимо восстановить. Каждый способ имеет свои характеристики, однако область их применения ограничена следующими факторами: возможностью организации, себе-

стоимостью технологии восстановления, условиями работы детали значениями предельного износа.

Поэтому при выборе способа ремонта зачастую основополагающим критерием выступают физико-механические свойства восстанавливаемой поверхности детали в виде коэффициента долговечности, так как от него будет зависеть целесообразность использования восстановленной детали.

Рассмотрим в качестве примера расчёт коэффициента долговечности при восстановлении посадочных мест под подшипники вторичного вала МКП автомобиля КамАЗ наиболее перспективными способами (рисунок 5), которые применимы с учётом условий работы детали.

Из рисунка 5 видно, что хромирование и железнение имеют наибольшие значения коэффициента долговечности. Это обусловлено свойствами покрытий, получаемых электролитическим способом. Его преимуществом является отсутствие термического влияния, которое способствует снижению усталостной прочности, что снижает долговечность покрытия.

Известно [49], что хромирование из-за сложностей в организации технологического процесса, экологических требований и низкой производительности имеет ограничения на применение. Однако железнение по своей производительности и характеристикам может быть использовано, но требует совершенствования путем улучшения физико-механических свойств с учётом условий работы детали. Поэтому перспективным способом является применение сплава железа и хрома с получением высокой износостойкости при сохранении такой же высокой производительности, как у технологии железнения.

В результате оценки различных способов восстановления деталей, при использовании критерия долговечности, установлено, что одним из наиболее рациональных является железнение, поскольку оно не имеет себе равных при массовом восстановлении деталей с малыми износами.

Исследования показали, что получаемые покрытия из электролитического железа могут приближаться по твердости и износостойкости к закаленной среднеуглеродистой стали. Так, в качестве износостойкого покрытия их рационально использовать для деталей, не выше по содержанию углерода марок стали 45 или 50 [49, 50]. Так как для валов трансмиссии используют в основном малоуглеродистую легированную сталь, то железнение становится одним из перспективных. Однако легирующие добавки могут повлиять на прочность сцепления и физико-технические свойства, поэтому требуются дополнительные исследования. В связи с этим необходимо проводить упрочнение и повышение износостойкости низкоуглеродистых легированных сталей, которые используются для изготовления деталей, в частности валы МКП, работающие в услови-

ях абразивного изнашивания, путём создания прочных сплавов на основе железа. Также улучшение свойств покрытий, получаемых из сплавов железа, возможно путем полного изменения свойств покрытий, которые приобретаются ими в процессе электроосаждения и последующей термомеханической или химико-термической обработки [49, 50].

Опираясь на приведенные обоснования, дальнейшие исследования проводились для получения сплавов железа и хрома с целью улучшения физико-механических свойств для использования при восстановлении посадочных мест под подшипники деталей трансмиссии автомобилей и другой техники, работающих при повышенных нагрузках.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Известно, что одним из факторов, оказывающим влияние на выход по току (производительность) и качество покрытий при железнении, является кислотность, которая оценивается параметром pH. Поэтому с целью исследования сплавов железа и хрома необходимо было получить зависимость влияния этого параметра на производительность и качество покрытий, с целью определения целесообразности применения для восстановления посадочных мест под подшипники валов трансмиссии, работающих при абразивном изнашивании [50].

Для этого использовали электролит следующего состава: 150 г/л хлорид железа, 50 г/л сульфат хрома. Травление осуществляли в 30%-ном растворе соляной кислоты с добавлением 5% сульфата железа для мягкости травления при плотности тока 75–100 А/дм².

Размеры образцов круглого сечения для исследований выбирались из расчёта площади покрытия 0,1 дм². Их изготавливали из стали 45 по ГОСТ 1050–2013.

Кислотность измеряли pH-метром Smart Sensor AS218 с точностью измерения 0,01 ед., откалиброванным стандартными буферными растворами, температуру контролировали с помощью ртутного термометра.

Осаждение осуществляли на установке, имеющей механизм перемешивания и поддержания необходимой температуры с различными режимами.

Микротвёрдость измеряли с помощью микротвёрдомера ПМТ-3. Выход по току измеряли весовым способом на весах ВЛР-200. Микроструктуру изучали с помощью металлографического микроскопа ММУ-3 с приставкой для оцифровки изображения [50].

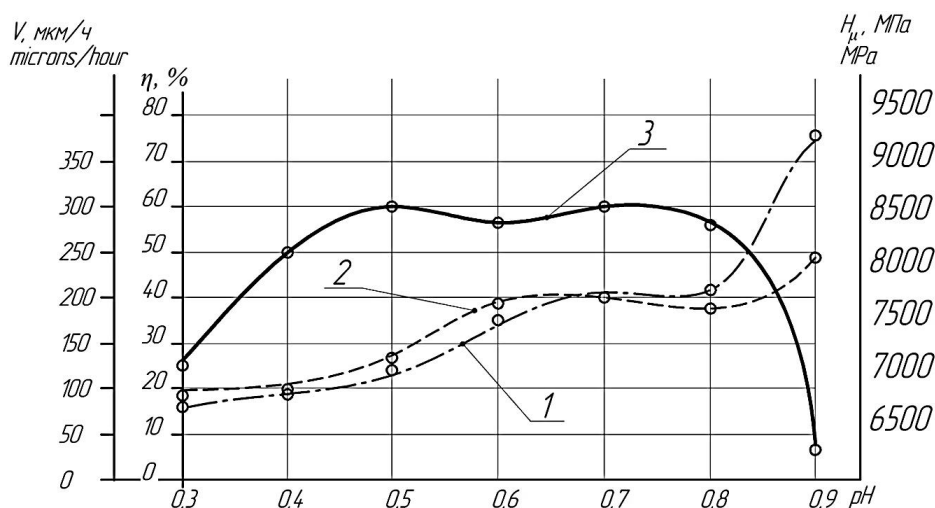


Рисунок 6 – Влияние кислотности pH на:
1 – выход по току η (%); 2 – скорость осаждения V (мкм/ч);
3 – микротвёрдость, H_μ (МПа) при получении покрытий в электролите железо-хромового раствора
(FeCl_2 – 150 г/л; $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ – 50 г/л), при температуре электролита $40 \pm 2^\circ\text{C}$ и плотности тока 40 A/dm^2
[50, 51]

Figure 6 – Effect of pH acidity on:
1 – current output η (%); 2 – deposition rate V (microns/hour),
3 – microhardness, H_μ (MPa) when coatings are obtained in an electrolyte of an iron-chromium solution
(FeCl_2 – 150 g/l; $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ – 50 g/l), at an electrolyte temperature of $40 \pm 2^\circ\text{C}$ and a current density of 40 A/dm^2
[50, 51]

В результате проведенных исследований были получены зависимости влияния кислотности и температуры электролита на производительность (скорость осаждения) и качество покрытий (микротвёрдость) (рисунок 6).

Исходя из существующих режимов железнения (30 – 50°C), в качестве температурных режимов при осаждении были приняты те же температуры. Это связано с тем, что в основе получаемого покрытия было железо, а хром присутствовал как элемент, по предположению, необходимый для увеличения износостойкости.

В результате проведенных экспериментов, результат которых приведен на рисунке 6, исследования железохромового сплава при режимах осаждения было установлено, что кислотность оказывает существенное влияние на основные параметры осаждения: выход по току, скорость осаждения и микротвёрдость. При значениях кислотности от $0,3$ до $0,9$, наиболее сильно происходило изменение данных результатов. Изменение выхода по току – от 15 до 75% , скорость осаждения от 75 до 250 мкм/ч и микротвёрдость от 7250 до 8500 МПа. При этом при значениях кислотности $0,4$ – $0,6$ наблюдались наилучшие показатели, которые в дальнейшем будут использовать в качестве базового режима [50, 51].

Для подтверждения полученных результатов изучены микроструктуры шлифов покрытий, получаемых при режимах кислотности от $0,3$ – $0,9$, при температурах электролита 30 – 50°C и плотности тока 30 – 50 A/dm^2 .

Шлифы выполняли путем разрезания образцов с использованием известной методики [50, 51] по подготовке шлифа для изучения микроструктуры.

В результате анализа микроструктуры получаемых железо-хромовых покрытий из исследуемого электролита, при плотности тока 40 A/dm^2 и температуре электролита 40°C , было установлено, что наиболее качественные покрытия получаются при кислотности в диапазоне $0,4$ – $0,6$ (рисунок 7, б и в), при котором покрытие образуется с небольшим количеством микротрещин, с единым направлением. Благодаря данной структуре, с наличием микротрещин, можно предположить, что будет происходить накопление смазки в них, это благоприятно будет сказываться на износостойкости и сопротивлению абразивному изнашиванию в процессе эксплуатации. Поэтому возможно использовать данный способ для восстановления посадочных мест под подшипники валов трансмиссии, которые подвержены абразивному изнашиванию, при недостаточном количестве на поверхности смазочных материалов.

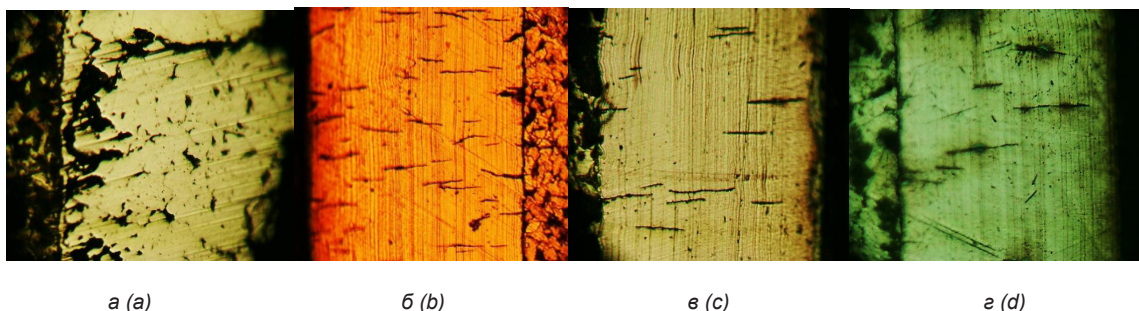


Рисунок 7 – Микроструктура железо-хромового покрытия, получаемого из электролита FeCl_2 – 150 г/л; $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ – 50 г/л, при плотности 40 А/дм², и температуре 40°С при значениях кислотности (рН): а – 0,3–0,4; б – 0,4–0,50; в – 0,5–0,6; г – 0,8–0,9 [50, 51]

Figure 7 – Microstructure of the iron-chromium coating obtained from the electrolyte FeCl_2 – 150 г/л; $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ – 50 г/л, at a density of 40 А/дм², and a temperature of 40°С at an acidity value (рН): а – 0.3-0.4; б – 0.4-0.50, в – 0.5-0.6; д – 0.8-0.9. [50, 51]

Покрyтия, получаеmые при значениях кислотности 0,3–0,4 и 0,8–0,9 имели явно увеличенные микротрещины при возможном возникновении усталостного разрушения в будущем, что делало данный режим нецелесообразным для применения при восстановлении деталей узлов агрегатов автомобилей и дорожно-строительной техники, в частности посадочных мест под подшипники валов трансмиссии [50, 51].

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований по обоснованию выбора метода восстановления посадочных мест под подшипники валов трансмиссии автомобилей и других видов самоходной техники были определены существующие способы восстановления. Они не отвечали техническим требованиям к детали и не давали необходимые физико-механические свойства восстанавливаемых поверхностей.

По предварительному анализу способов, при которых получают наиболее износостойкие и долговечные покрытия, было выявлено, что одним из них является – железнение.

Однако железнение не давало достаточные физико-механические свойства для поверхностей деталей, подверженных абразивному изнашиванию. Поэтому, проведя предварительный анализ литературных источников, предложен новый способ получения железо-хромовых покрытий с необходимыми свойствами, при следующем составе электролита – FeCl_2 – 150 г/л; $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ – 50 г/л.

Одним из существенных факторов, влияющих на производительность и качество покрытий, при использовании предложенного спо-

соба была кислотность. Поэтому дальнейшие исследования проведены по изучению влияния кислотности на выход по току, скорость осаждения и микротвердость. Также изучена микроструктура покрытий, получаемых при температуре электролита 40±2°С и плотности тока 40 А/дм². В результате можно выбрать следующие режимы для дальнейших исследований износостойкости:

1. Кислотность (рН) – 0,4-0,6.
2. Плотность тока 40 А/дм².
3. Температура электролита 40±2°С.

При данных режимах получают покрытия микротвердостью 8000–8500 МПа, с небольшой трещиноватостью, которая окажет, по нашему мнению, положительное влияние на износостойкость покрытия. При этом будет достаточно высокая производительность: выход по току – 20–40% и скорость осаждения 100–200 мкм/ч.

Поэтому предполагается в дальнейшем, после проведенных износных лабораторных и эксплуатационных испытаний, использовать данный способ для восстановления посадочных мест под подшипники трансмиссии автомобилей и другой техники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Котомчин А.Н., Корнейчук Н.И. Влияние условий эксплуатации дорожно-строительных машин и специализированного автотранспорта на ресурс их узлов и агрегатов // Технический сервис машин. 2019. № 2(135). С. 135–142.
2. Захаров Н.С., Попцов В.В., Сапоженков Н.О. Расчётное исследование надёжности автомобилей на основе фактических отказов // Научно-технический вестник Поволжья. 2022. № 11. С. 58–61.

3. Мусин К.С., Сабралиев Н.С., Адилбеков М.А. Исследование и повышение эксплуатационной надежности грузовых автомобилей // Вестник Алматинского технологического университета. 2018. № 3. С. 75–81.
4. Комов Е.А. Обеспечение повышения надежности автотранспортных средств // Грузовик. 2013. № 1. С. 16–18.
5. Макаренко А.В., Мороз А.В. Оценка эффективности автомобиля по показателям безотказности и долговечности // Воронежский научно-технический вестник. 2014. Т. 3, № 1(7). С. 110–115.
6. Белоковильский А.М. Надежность автомобильного транспорта: монография. Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2018. 172 с. ISBN 978-5-9282-1530-9.
7. Некрасов В.И., Зиганшин Р.А., Захаров Н.С. [и др.]. Исследование надежности агрегатов шасси автомобилей Mercedes-Benz Actros // Наука и бизнес: пути развития. 2021. № 4(118). С. 14–17.
8. Кондратьева В.В., Нугаева В.О. Влияние условий эксплуатации на надежность автомобиля // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2019. № 2(35). С. 152–155.
9. Яковлев К.А. Комплексный показатель оценки надежности автомобилей и агрегатов // Воронежский научно-технический вестник. 2013. Т. 2, № 3(5). С. 79–90.
10. Баженов С.П., Толстых Е.В. Проблема повышения эксплуатационной надежности специализированной автотранспортной техники // Мир транспорта и технологических машин. 2011. № 2(33). С. 31–40.
11. Козловский В.Н., Малеев Р.А., Панюков Д.И. [и др.]. Комплекс аналитических инструментов оценки эффективности мероприятий, направленных на улучшение надежности автомобилей // Известия МГТУ МАМИ. 2014. Т. 1, № 2(20). С. 31–36.
12. Choriev Kh.Sh. Performance Indicators of Vehicle Use in the Transportation Process // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2020. Vol. 13, No. 6. P. 766–771. DOI: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0265>.
13. Balgabekov T.K., Kongkybayeva A.N. The question of efficiency of using cargo cars // Science and Technology of Kazakhstan. 2019. No. 2. P. 36–43.
14. Хохлов П.И., Ильин П.А., Казиев Ш.М. Выбор рациональных способов восстановления сопряжения «вал–подшипники качения» коробки передач тракторов «Кировец» // Известия Международной академии аграрного образования. 2020. № S49. С. 60–64.
15. Федорова Л.В., Федоров С.К., Бохонов Г.Ю. Упрочняющее электромеханическое восстановление вторичного вала коробки перемены передач автомобилей семейства «Газель» // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2015. № 9. С. 14–16.
16. Фёдоров С.К., Иванова Ю.С., Лашуков М.А., Мехия Рамос Б.Х. Электромеханическое восстановление посадочных поверхностей валов под подшипники качения. Агроинженерия. 2019; (4): 29–34. DOI: <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-4-29-34>
17. Холов Д.Т. Влияние износ посадочных поверхностей подшипников и деформации осей валов передачи на условия работы зубчатых передач // Вестник Хорогского университета. 2023. № 1(25). С. 126–130.
18. Иванов В.П. Выбор способа восстановления деталей // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 1. С. 9–17. DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-1-9-17>
19. Доронина Н.П., Жевора Ю.И., Пантух М.Л. Совершенствование технологии и средств восстановления изношенных деталей // Научное обозрение. 2016. № 21. С. 75–78.
20. Марков В.А., Марков А.Н., Кретинин В.И. [и др.]. Оптимизация выбора технологических процессов восстановления деталей // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2016. № 217. С. 194–205. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2016.217.194-205>
21. Малыхин В.В., Гайдаш Н.М., Артеменко Ю.А. [и др.]. Технология восстановления деталей грузового и пассажирского транспорта // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. № 1(70). С. 16–23. DOI: <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-1-16-23>
22. Стребко С.В., Слободюк А.П., Бондарев А.В. Экономическое подтверждение объективной необходимости замещения импортных запасных частей восстановлением // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2015. № 3(7). С. 17–28.
23. Гирфанов Э.С. Восстановление деталей машин электроискровым легированием // Молодежь и наука. 2018. № 8. С. 28.
24. Фомин А.И., Сенин П.В., Власкин В.В. И [и др.]. Комбинированная технология восстановления работоспособности деталей типа «вал» // Техника и оборудование для села. 2020. № 5(275). С. 38–41. DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-5-38-41>
25. Lastovirya V.N., Novokreshchenov V.V., Rodyakina R.V. Restoration of the geometry and properties of rollers of the lower section of bearings by surfacing // Welding International. 2015. Vol. 29, No. 10. P. 815–818. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2014.986890>.
26. Истомин А.Б., Лизунов И.В., Дмитриев В.О. [и др.]. Способы восстановления деталей в ремонтном производстве // Главный механик. 2021. № 6. С. 59–73. DOI: <https://doi.org/10.33920/pro-2-2106-05>
27. Смолянский О.В., Бурков И.Л., Заньков П.Н. Способы восстановления деталей при ремонте технических средств // Научный вестник Вольского военного института материального обеспечения: военно-научный журнал. 2014. № 2(34). С. 342–344.
28. Кудряшов Е.А., Смирнов И.М. К выбору рационального способа восстановления работоспособности изношенных поверхностей деталей // Известия Юго-Западного государственного универ-

ситета. Серия: Техника и технологии. 2014. № 1. С. 8–13.

29. Бондарева Г.И. Методика выбора технологических процессов восстановления деталей машин // Международный технико-экономический журнал. 2010. № 3. С. 75–82.

30. Стародубцев И.Г., Смоленцев В.П., Мозгалин В.Л. [и др.]. Восстановление размеров и качества деталей комбинированным гальваномеханическим покрытием // Справочник. Инженерный журнал. 2021. № 12(297). С. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.14489/hb.2021.12.pp.003-009>

31. Нефелов И.С. Восстановление изношенных деталей машин при помощи дополнительных ремонтных деталей, изготовленных методами аддитивных технологий // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2018. № 11. С. 15–17. DOI: <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2018-0-11-15-17>

32. Гудонец В.А., Журавлев С.Ю. Восстановление деталей гидрооборудования машин электролитическим хромированием // Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века. 2017. № 8. С. 92–94.

33. Тихненко В.Г. Технология восстановления изношенных деталей хромированием // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2008. № 3(28). С. 115–116.

34. Makarenko V.D., Maksimov S.Yu., Mieshev Yu.Ye. [et al.] Technologies and materials for the renovation of erosion-worn parts of automobile equipment // Problems of Tribology. 2023. Vol. 28, No. 4/110. P. 6–12. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-110-4-6-12>.

35. Бомешко Е.В., Корнейчук Н.И. Электроосаждение двойных и тройных сплавов на основе железа и хрома: теоретические представления и практические рекомендации // Вестник Приднестровского университета. Серия: Физико-математические и технические науки. Экономика и управление. 2019. № 3(63). С. 153–165.

36. Голубев И.Г., Апатенко А.С., Севрюгина Н.С. [и др.]. Перспективные направления использования аддитивных технологий в ремонтном производстве // Техника и оборудование для села. 2023. № 6(312). С. 35–38. DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-6-35-38>

37. Корнейчук Н.И., Ерхан Ф.М., Бомешко Е.В. Влияние параметров периодического тока с обратным регулируемым импульсом на структуру и микротвердость электролитических железных покрытий // Вестник Приднестровского университета. Серия: Физико-математические и технические науки. Экономика и управление. 2017. № 3(57). С. 81–87.

38. Агеев Е.В., Серебровский В.И., Серникова О.С. Оценка износостойкости гальванопокрытий восстановленных деталей // Техника и оборудование для села. 2024. № 4(322). С. 36–39. DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2024-4-36-39>

39. Серебровский В.И., Серебровский В.В., Сафронов Р.И. [и др.]. Упрочняющее легирование электроосажденного железа // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 4. С. 68–71.

40. Серебровский В.В., Серникова О.С. Восстановление деталей машин упрочненными электроосажденными покрытиями // Современные материалы, техника и технологии. 2023. № 6(51). С. 42–48.

41. Серникова О.С., Серебровский В.И., Калущий Е.С. Исследование износостойкости электроосажденных покрытий // Современные материалы, техника и технологии. 2022. № 6(45). С. 77–82.

42. Юдин В.М., Шиповалов А.Н., Храпов Г.А. Восстановление деталей автомобилей // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2017. № 4. С. 11–13.

43. Юдин В.М., Серебровский В.В., Серебровская Л.Н., Гнездилова Ю.П. Выбор критерия оценки технологических процессов ремонтного производства // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 6. С. 72–73.

44. Lyakhov, E. Yu., Zorin V. A. The Influence of Technological Modes on the Quality of Coatings Made of Powder Polymer-Composite Materials // Polymer Science, Series D. 2023. Vol. 16, No. 1. P. 89–93. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1995421223010173>.

45. Котомчин А. Н. Влияние электрохимической обработки на прочность сцепления с подложкой при восстановлении деталей автотранспорта, работающих при гидроабразивном изнашивании // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 4(86). С. 546–559. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-546-559>.

46. Котомчин А.Н., Ляхов Е.Ю., Зорин В.А. Повышение производительности и качества нанесения полимерных композиций при восстановлении посадочных мест под подшипники агрегатов автомобилей и дорожно-строительной техники // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2024. № 2(77). С. 82–92.

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

48. Янута А.С., Корнейчук Н.И., Синельников А.Ф. Анализ применения электролитов для получения электролитических сплавов Fe-Cr при восстановлении деталей машин и оборудования // Вестник Приднестровского университета. Серия: Физико-математические и технические науки. Экономика и управление. 2021. № 3(69). С. 101–106.

49. Янута А.С. Исследование влияния режимов осаждения на структуру электролитического бинарного покрытия Fe-Cr, полученного из сульфатно-хлоридного электролита // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного

технического университета (МАДИ). 2022. № 3(70). С. 17–21.

50. Янута А.С., Штефан Ю.В., Федоров В.К. [и др.]. Моделирование процесса электролитического покрытия сплава железо–хром из сульфатно-хлоридного электролита при восстановлении деталей машин // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 2(90). С. 260–276. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-260-276>

51. Янута А.С., Корнейчук Н.И. Исследование влияния условий осаждения на содержание хрома в электролитическом железо-хромовом покрытии, применяемом для восстановления посадочных мест под подшипники // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. 2024. № 1(23). С. 72–76.

REFERENCES

1. Kotomchin A.N., Korneychuk N.I. Influence of the conditions of operation of road construction machines and specialized motor transport on the resource of their knots and units. *Technical service of cars*. 2019; 2 (135): 135–142. (In Russ.)
2. Zaharov N.S., Popcov V.V., Sapozhenkov N.O. Service frequency correction of heavy trucks braking system. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja=Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2022; 11: 58–61. (In Russ.)
3. Musin K.S., Sabraliev N.S., Adilbekov M.A. Research and improvement of the operational reliability of trucks *The Journal of Almaty Technological University*. 2018; (3): 75–81. (In Russ.)
4. Komov E.A. Ensuring increased reliability of motor vehicles. *Truck*. 2013; 1: 16–18. (In Russ.)
5. Makarenko A.V., Moroz A.V. Assessment of vehicle efficiency in terms of reliability and durability. *Voronezhskij nauchno-tehnicheskij Vestnik=Voronezh Scientific and Technical Journal*. 2014; V. 3, No1(7): 110–115. (In Russ.)
6. Belokovyl'skij A.M. Reliability of road transport: monografiya. Penza: Penzenskij gosudarstvennyj universitet arhitektury i stroitel'stva. 2018: 172. (In Russ.)
7. Nekrasov V.I., Ziganshin R.A., Zaharov N.S., Gorohov K.Ju. Investigation of the reliability of Mercedes-Benz Actros chassis units. *Science and business: development ways*. 2021; 4(118): 14–17. (In Russ.)
8. Kondrat'eva V.V., Nugaeva V.O. The influence of operating conditions on the reliability of the car. *Tehnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve=Transport construction*. 2019; 2(35): 152–155. (In Russ.)
9. Jakovlev K.A. Complex indicator of assessment of reliability of cars and aggregates. *Voronezhskij nauchno-tehnicheskij Vestnik=Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. 2013; V. 2, No 3(5): 79–90. (In Russ.)
10. Bazhenov S.P., Tolstyh E.V. The problem of increasing the operational reliability of specialized motor vehicles. *World of transport and technological machines*. 2011; 2(33): 31–40. (In Russ.)
11. Kozlovskij V.N., Maleev R.A., Panjukov D.I., L.A. Kudinova A set of analytical tools for evaluating the effectiveness of measures aimed at improving the reliability of cars. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2014; V. 1, No 2(20): 31–36. (In Russ.)
12. Choriev Kh.Sh. Performance Indicators of Vehicle Use in the Transportation Process. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2020; Vol. 13, No.6: 766–771. DOI: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0265>.
13. Balgabekov T.K., Kongkybayeva A.N. The question of efficiency of using cargo cars. *Science and Technology of Kazakhstan*. 2019; No. 2: 36–43.
14. Khokhlov P.I., Il'in, Sh. M. Kaziev The choice of rational methods for restoring the coupling “shaft-rolling bearings” of the kirovets gearbox. *Izvestiya Mezhdunarodnoj akademii agrarnogo obrazovanija=International Journal of Agrarian Science and Education*. 2020; S49: 60–64. (In Russ.)
15. Fedorova L.V., Fedorov S.K., Bohonov G.Ju. Strengthening electromechanical restoration of the secondary shaft of the gearbox of Gazelle family cars. *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya (Repair, Reconditioning, Modernization)*. 2015; 9: 14–16. (In Russ.)
16. Fedorov S.K., Ivanova Yu.S., Lashukov M.A., Mejia Ramos B. Electromechanical restoration of shaft seats under roller bearings. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2019; (4): 29–34. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-4-29-34>
17. Khokhlov D.T. The influence of wear on bearing mounting surfaces and deformation of transmission shaft axes on the working conditions of gears. *Bulletin of the Khorog university*. 2023; 1(25): 126–130. (In Russ.)
18. Ivanov V.P. Selection of method for restoration of parts. *Science & Technique*. 2016; 15(1): 9–17. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-1-9-17>
19. Doronina N.P., Zhevora Ju.I., Pantuh M.L. Enhancing the technology and recovery tools of worn-out parts. *Science Review*. 2016; 21: 75–78. (In Russ.)
20. Markov V.A., Markov A.N., Kretinin V. I., Sokolova V.A., Gaidukova P.A. Optimization of choice of technological processes of details' restoration. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*. 2016; 217: 194–205 (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2016.217.194-205>
21. Malihin V.V., Gaidah N.M., Artemenco Yu.A., Novikov S.G., Novikov F.V. Freight and passenger vehicles parts reconditioning technique. *Proceedings of the Southwest State University*. 2017; 21(1): 16–23. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-1-16-23>
22. Strebkov S.V., Slobodjuk A.P., Bondarev A.V. The economic proof of the objective necessity of replacement of imported parts restoration. *Innovations in Agricultural Complex: problems and perspectives*. 2015; No 3(7): 17–28. (In Russ.)
23. Girfanov Je.S. Restoration of details of cars spark alloying. *Youth and science*. 2018; 8: 28. EDN YWBFAT (In Russ.)

24. Fomin A.I., Senin P.V., Vlaskin V.V., Kurguzkin M.A. Mixed technology for restoring shaft part operability. *Tehnika i oborudovanie dlja sela=Machinery and equipment for rural area*. 2020; 5(275): 38–41. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-5-38-41>
25. Lastovirya V.N., Novokreshchenov V.V., Rodyakina R.V. Restoration of the geometry and properties of rollers of the lower section of bearings by surfacing. *Welding International*. 2015; Vol. 29, No.10: 815–818. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2014.986890>.
26. Istomin A.B., Lizunov I.V., Dmitriev V.O., Kozlov V.B. Methods of restoring parts in repairs. Chief Mechanical Engineer. 2021; 6: 59–73. DOI: <https://doi.org/10.33920/pro-2-2106-05>. (In Russ.)
27. Smoljanskij O.V. Burkov I.L., Zan'kov P.N. Methods of restoration of details at repair of a technical equipment. *Nauchnyj vestnik Vol'skogo voennogo instituta material'nogo obespechenija: voenno-nauchnyj zhurnal*. 2014; 2(34): 342–344. (In Russ.)
28. Kudrjashov E.A., Smirnov I.M. Towards the choice of a rational method for restoring the operability of worn-out surfaces of parts. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2014; 1: 8–13. (In Russ.)
29. Bondareva G.I. Methodology for selecting technological processes for restoring machine parts. *International Scientific Journal*. 2010; 3: 75–82. (In Russ.)
30. Starodubtsev I.G., Smolentsev V.P., Mozgalin V.L., Nenakhov N.N. Restoration of the size and quality of parts by combined galvanomechanical coating. *Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal*. 2021; 2(297): 3–9. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.14489/hb.2021.12.pp.003-009>.
31. Nefelov I.S. Renewal of worn-out parts of machines with application of additional repair parts made by additive technology methods. *Remont. Vostanovlenie. Modernizatsiya*. 2018; 11: 15–17. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2018-0-11-15-17>
32. Gudonec V.A., Zhuravlev S.Ju. Restoration of details of the hydraulic equipment of cars electrolytic chromium coating. Youth scientific and educational potential in solving actual problems of the XXI century. 2017; 8: 92–94. (In Russ.)
33. Tihnenko V.G. Technology of restoration of worn parts by chrome plating *Vestnik of federal state educational institution of higher professional education "Moscow state agroengineering university named after V. P. Goryachkin* 2008; 3(28): 115–116. (In Russ.)
34. Makarenko V.D., Maksimov S.Yu., Mieshkov Yu.Ye., Selieverstov I.A. Technologies and materials for the renovation of erosion-worn parts of automobile equipment. *Problems of Tribology*. 2023; Vol. 28, No.4/110: 6–12. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-110-4-6-12>
35. Bomesheko E.V., Kornejchuk N.I. Electrodeposition of double and triple alloys based on iron and chromium: theoretical concepts and practical recommendations. *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tehnichekie nauki. Jekonomika i upravlenie*. 2019; (63): 153–165. (In Russ.)
36. Golubev I.G., Apatenko A.S., Sevrjugina N.S. [i dr.]. Promising directions of using additive technologies in repair production]. *Tehnika i oborudovanie dlja sela=Machinery and equipment for rural area*. 2023; (312): 35–38. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-6-35-38>.
37. Kornejchuk N.I., Erhan F.M., Bomesheko E.V. The influence of periodic current parameters with a reverse controlled pulse on the structure and microhardness of electrolytic iron coatings. *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tehnichekie nauki. Jekonomika i upravlenie*. 2017; 3(57): 81–87. (In Russ.)
38. Ageev E.V., Serebrovskij V.I., Sernikova O.S. Evaluation of the wear resistance of electroplated parts. *Tehnika i oborudovanie dlja sela*. 2024; 4(322): 36–39. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2024-4-36-39>
39. Serebrovskij V.I., Serebrovskij V.V., Safronov R.I., Gnezdilova Ju.P. Strengthening alloying of electrodeposited iron. *Vestnik Kurskoj gosudarstvennoj sel'skohozjajstvennoj akademii*. 2015; 4: 68–71. (In Russ.)
40. Serebrovskij V.V., Sernikova O.S. Restoration of machine parts with hardened electrodeposited coatings. *Sovremennye materialy, tehnika i tehnologii*. 2023; 6(51): 42–48. (In Russ.)
41. Sernikova O.S., Serebrovskij V.I., Kaluckij E.S. Study of wear resistance of electrodeposited coatings. *Sovremennye materialy, tehnika i tehnologii*. 2022; 6(45): 77–82. (In Russ.)
42. Judin V.M., Shipovalov A.N., Hrapkov G.A. Restoration of car parts. *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya*. 2017; 4: 11–13. (In Russ.)
43. Judin V.M., Serebrovskij V.V., Serebrovskaja L.N., Gnezdilova Ju.P. Selection of criteria for evaluating technological processes of repair production. *Vestnik Kurskoj gosudarstvennoj sel'skohozjajstvennoj akademii* 2015; 6: 72–73. (In Russ.)
44. Lyakhov E.Yu., Zorin V.A. The Influence of Technological Modes on the Quality of Coatings Made of Powder Polymer-Composite Materials. *Polymer Science, Series D*. 2023; Vol. 16, No. 1: 89–93. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1995421223010173>.
45. Kotomchin A.N. The effect of electrochemical processing on the strength of adhesion to the substrate during the restoration of vehicle parts working during hydroabrasive wear. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022. 19(4): 546–559. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-546-559>. EDN PYNRLX.
46. Kotomchin A.N., Ljahov E.Ju., Zorin V.A. Improving the productivity and quality of applying polymer compositions during the restoration of seats for bearings of car units and road construction equipment. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta (MADI)*. 2024; 2(77): 82–92 (In Russ.)

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

48. Ianuta A.S., Kornejchuk N.I., Sinel'nikov A.F. Analysis of the use of electrolytes for the production of electrolytic Fe-Cr alloys in the restoration of machine and equipment parts]. *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Serija: Fiziko-matematicheskie i tehnicheckie nauki. Jekonomika i upravlenie*. 2021; No 3(69): 101–106. (In Russ.)

49. Ianuta A.S. Investigation of the effect of deposition modes on the structure of an electrolytic binary Fe-Cr coating obtained from a sulfate-chloride electrolyte. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tehnicheckogo universiteta (MADI)*. 2022; 3(70): 17–21 (In Russ.).

50. Lanuta A.S., Shtefan Yu.V., Fiodorov V.K., Korneichuk N.I. Electrolytic coating of iron-chromium alloy of sulphate-chloride electrolyte in machine parts recovery process modelling. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(2): 260–276. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-260-276>. EDN: CBHVWL

51. Ianuta A.S., Kornejchuk N.I. Investigation of the effect of deposition conditions on the chromium content in an electrolytic iron-chromium coating used to restore bearing seats. *Bulletin of Vologda State University*. 2024; 1(23): 72–76 (In Russ.).

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Котомчин А.Н. Работа по аналитическому анализу результатов исследований с оформлением статьи.

Янута А.С. Проведение и анализ исследований железо-хромовых покрытий. Участие в оформлении статьи.

Ляхов Е.Ю. Работа по аналитическому анализу результатов исследований с оформлением статьи.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Kotomchin A.N. Theoretical analysis, analysis of the research results, writing the manuscript.

Ianuta A.S. Conducting experiments, analyzing studies on iron-chromium coatings, writing the manuscript.

Lyakhov E.Y. Analysis of the research results, writing the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Котомчин Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Транспортно-технологические машины и комплексы» (3300, Молдова, Приднестровье, г. Тирасполь, ул. 25 Октября, 128).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4750-5255>,

SPIN-код: 9826-9350,

e-mail: aleshka81@list.ru

Янута Антон Сергеевич – ст. преподаватель кафедры «Транспортно-технологические машины и комплексы» (3300, Молдова, Приднестровье, г. Тирасполь, ул. 25 Октября, 128).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7134-6979>,

SPIN-код: 2532-4888,

e-mail: ianyta_anton@mail.ru

Ляхов Евгений Юрьевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Транспортно-технологические машины и комплексы» (3300, Молдова, Приднестровье, г. Тирасполь, ул. 25 Октября, 128).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6777-6899>,

SPIN-код: 3201-4938,

e-mail: sami77752@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kotomchin Aleksei N. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Transport and technological machines and complexes (3300, Moldova, Tiraspol, 128, 25-go Oktyabrya St.).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4750-5255>,

SPIN-code: 9826-9350,

e-mail: aleshka81@list.ru

Ianuta Anton S. – senior lecturer of the Department of "Transport and Technological machines and Complexes" (3300, Moldova, Tiraspol, 128, 25-go Oktyabrya St.).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7134-6979>,

SPIN-code: 2532-4888,

e-mail: ianyta_anton@mail.ru

Lyakhov Evgenii Yiu. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Transport and technological machines and complexes (3300, Moldova, Tiraspol, 128, 25-go Oktyabrya St.).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6777-6899>,

SPIN-code: 3201-4938,

e-mail: sami77752@gmail.com

Научная статья
УДК 656.025
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-238-247>
EDN: PPKZFC



ОБЗОР И ВЫБОР МЕТОДОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОДСЧЕТА ПАССАЖИРОВ НА ОБЩЕСТВЕННОМ НАЗЕМНОМ ТРАНСПОРТЕ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕВОЗКАМИ

А.Д. Плахтий¹ ✉, Д.С. Корчагин²

¹Санкт-Петербургский государственный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия
✉ ответственный автор
st110081@student.spbu.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Цель исследования заключается в обзоре современных методов автоматического подсчета пассажиропотоков в общественном транспорте. Исследование посвящено актуальной проблеме подсчета пассажиропотока в общественном транспорте с использованием современных технологий, таких как видеонаблюдение, инфракрасные сенсоры и LiDAR.

Материалы и методы. Представлен обзор технологий, включая датчики, камеры, LiDAR и RFID, а также методы анализа, основанные на теоретических и эмпирических подходах. Использована информация от компаний-разработчиков для сравнения точности технологий в реальных условиях.

Результаты. Сравнения показывают, что наилучшую точность обеспечивают LiDAR и камеры с машинным обучением, особенно в условиях высокой плотности пассажиров. Технологии на основе Wi-Fi и Bluetooth имеют ограниченную точность, но комбинированные решения могут преодолеть их недостатки.

Обсуждение и заключение. Для точного подсчета пассажиров наиболее эффективны LiDAR и видеонаблюдение с машинным обучением. Рекомендуется дальнейшее тестирование комбинированных технологий и развитие гибких систем, а также использование инновационных подходов в обучении нейронных сетей для улучшения точности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пассажиропоток, автоматический подсчет, общественный транспорт, транспортная аналитика, управление транспортом, интеллектуальные системы

БЛАГОДАРНОСТИ: выражаем благодарность Санкт-Петербургскому государственному университету, Санкт-Петербургскому государственному архитектурно-строительному университету и ООО «Современные технологии» за поддержку и предоставленные возможности, а также нашим научным руководителям за их ценную помощь и наставничество. Благодарим рецензентов за их ценную работу и конструктивные комментарии.

Статья поступила в редакцию 23.12.2024; одобрена после рецензирования 13.03.2025; принята к публикации 17.04.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Плахтий А.Д., Корчагин Д.С. Обзор и выбор методов автоматизированного подсчета пассажиров на общественном наземном транспорте для эффективного управления перевозками // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 2. С. 238-247. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-238-247>

© Плахтий А.Д., Корчагин Д.С., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-238-247>
EDN: PPKZFC

REVIEW AND SELECTION OF METHODS FOR AUTOMATED PASSENGER COUNTING ON PUBLIC LAND TRANSPORT FOR EFFECTIVE TRANSPORTATION MANAGEMENT

A.D. Plakhtii¹ ✉, D.S. Korchagin²

¹Saint-Petersburg State University,
St. Petersburg, Russia

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

✉ corresponding author
st110081@student.spbu.ru

ABSTRACT

Introduction. The study aims to analyze modern automatic passenger counting methods in public transport. The study addresses the pressing issue of passenger flow counting in public transport using modern technologies such as video surveillance, infrared sensors, and LiDAR.

Materials and Methods. An overview of technologies is provided, including sensors, cameras, LiDAR, and RFID, along with analysis methods based on theoretical and empirical approaches. Information from development companies is used to compare the accuracy of technologies in real-world conditions.

Results. The comparison results indicate that LiDAR and cameras with machine learning offer the highest accuracy, particularly in high passenger density scenarios. Wi-Fi and Bluetooth-based technologies have limited accuracy, but combined solutions can overcome their drawbacks.

Discussions and Conclusions. The conclusion emphasizes that LiDAR and video surveillance with machine learning are the most effective for accurate passenger counting. Further testing of combined technologies and the development of flexible systems are recommended, along with innovative approaches in neural network training to enhance accuracy.

KEYWORDS: passenger flow, automatic counting, public transport, transport analytics, transport management, smart systems

ACKNOWLEDGEMENTS. We express our gratitude to St. Petersburg State University, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, and Modern Technologies LLC for their support, and to our supervisors for their valuable help and mentoring. We thank the reviewers for their valuable work and constructive comments.

The article was submitted: December 23, 2024; approved after reviewing: March 13, 2025; accepted for publication: April 17, 2025..

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Plakhtii A.D., Korchagin D.S. Review and selection of methods for automated passenger counting on public ground transport for effective transportation management. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (2): 238-247. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-238-247>

© Plakhtii A.D., Korchagin D.S., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Описание проблемы, с которой связано исследование

Подсчет пассажиропотоков в наземном общественном транспорте – автобусах, троллейбусах, трамваях – представляет собой одну из ключевых задач для транспортных систем современных городов. Точные данные о количестве пассажиров, местах их посадки и высадки необходимы для оптимизации работы транспорта, повышения качества обслуживания и рационального использования ресурсов. Однако отсутствие таких данных приводит к множеству проблем: неравномерной загрузке транспортных средств (переполненность на одних участках маршрутов и недогруженность на других), увеличению эксплуатационных затрат, снижению удовлетворенности пассажиров из-за неудобных расписаний или переоплаченности, а также затруднениям в стратегическом планировании транспортной инфраструктуры. Например, в крупных мегаполисах, таких как Москва или Санкт-Петербург, переоплаченность автобусов в часы пик давно стала хронической проблемой, а недостаток точной информации о пассажиропотоках мешает эффективно распределять транспортные ресурсы.

Как подчеркивается в «Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом до 2035 года»¹, качественное улучшение транспортных услуг и оптимизация городской инфраструктуры невозможны без внедрения современных систем учета пассажиропотоков. Эта задача актуальна не только для мегаполисов, но и для небольших городов, где общественный транспорт часто является основным средством передвижения. Например, по данным П.В. Зюзина (2022)², в Москве ежедневно фиксируются значительные нагрузки на транспортную систему и отсутствие точных данных о движении пассажиров усложняет разработку новых маршрутов, корректировку расписаний и планирование закупок подвижного состава.

Традиционные методы подсчета пассажиров, такие как ручной подсчет или анализ продаж билетов, давно показали свою ограниченность. Ручной подсчет, выполняемый сотрудниками транспортных компаний или волонтерами, требует значительных трудовых ресурсов, подвержен человеческому фактору (ошибкам и субъективности) и не позволяет получать данные в реальном времени, что делает его непригодным для оперативного управления. Анализ билетных систем, в свою очередь, не учитывает пассажиров-безбилетников, не фиксирует точек выхода и не отражает реальной картины распределения пассажиропотоков по маршруту. Современные автоматизированные технологии, такие как видеоаналитика, LiDAR (Light Detection and Ranging), инфракрасные датчики и другие, предлагают решения этих проблем, обеспечивая высокую точность и оперативность. Однако выбор подходящей технологии осложняется разнообразием условий эксплуатации (например, плотность пассажиров, освещенность, тип транспорта), требованиями к точности, а также бюджетными ограничениями, что делает данный анализ особенно актуальным.

Исследование R.A. Kuipers, C.-W. Palmqvist [1], проведенное на пригородных поездках, показало, что автоматический подсчет пассажиров с помощью датчиков улучшает управление загрузкой и временем стоянки. Хотя работа касается железнодорожного транспорта, она подчеркивает общую полезность таких методов для оптимизации перевозок.

Обзор литературы, связанной с исследованием

Изучение методов подсчета пассажиропотоков активно ведутся как в России, так и за рубежом, охватывая широкий спектр технологий и подходов. В российской научной литературе акцент часто делается на необходимости перехода от устаревших методов к автоматизированным системам. О.А. Лебедева (2014)³ отмечает, что ручной подсчет и билетные системы не отвечают современным требованиям и предлагает интегрировать автоматизированные технологии с GPS для повышения

¹ Транспортная стратегия РФ на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. Официальный интернет-сайт Федерального дорожного агентства. Доступ: 30 окт. 2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/transportnaya-strategiya-rf-na-period-do-2030-goda-s-prognozom-na-period-do-2035-goda> (дата обращения: 23.10.2024)

² Зюзин П.В. Транспортные системы городов России: современное состояние и перспективы развития // докл. к XXIII Ясинской (Апрельской) Междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества. М.: НИУ ВШЭ, 2022. С. 80.

³ Лебедева О.А. Совершенствование методов мониторинга пассажиропотоков на маршрутах городского общественно-го транспорта: дис. ... канд. техн. наук, 05.22.10. М.: МГТУ им. Баумана, 2014. 150 с.

точности и географической привязки данных. В.М. Власов и др. (2014)⁴ обсуждают использование телематических систем и цифровой инфраструктуры в городском транспорте, выделяя их роль в создании «умных» транспортных систем, способных адаптироваться к изменениям спроса. Как показано в работе К.П. Андреева [2], использование современных технологий для сбора и анализа данных о пассажирах позволяет оптимизировать маршруты и расписания, что особенно важно для повышения эффективности транспортного обслуживания населения. Д.В. Петрова [3] рассматривает использование современных технологий для мониторинга пассажиропотоков в крупных городах, таких как камеры видеонаблюдения с алгоритмами распознавания лиц, а также использование мобильных данных. А.М. Ковалев и др. [4] анализируют системы подсчета пассажиропотока (инфракрасные и ультразвуковые датчики, камеры), протестированные в реальных условиях на городских маршрутах. В статье отмечается важность испытаний для оценки точности и устойчивости систем. Д.Ж. Сайфутдинов (2025)⁵ подчеркивает потенциал цифровых технологий, таких как видеоаналитика и датчики присутствия, для управления пассажирскими потоками в реальном времени.

Зарубежные исследования предлагают более детализированный анализ конкретных технологий. М. Radovan и др. (2024)⁶ классифицирует методы подсчета на ручные (например, подсчет по билетам или визуальный контроль) и автоматизированные (видеоаналитика, LiDAR, RFID (Radio Frequency Identification)), подчеркивая преимущества последних. I. Grgurević и др. [5] проводят сравнение современных систем, отмечая высокую точность LiDAR (95–96%) и камер с машинным обучением (92–99%) в условиях высокой плотности пассажиров. А. Kotz и др. [6] исследуют весовые датчики, указывая на их ограниченную точность (80–90%) из-за вариаций веса пассажиров и багажа. М. Nitti и др. [7] и Н. Jiang и др. [8] анализируют использование Wi-Fi и Bluetooth для подсчета, подчеркивая их зави-

симость от наличия у пассажиров активных устройств и относительно низкую точность (75–94% и 73–77% соответственно).

Особое внимание в зарубежной литературе уделяется видеоаналитике с применением машинного обучения. S. Khan и др. [9], С. Labit-Bonis и др. [10], R. Seidel и др. [11] и С. Pronello, X.R.G. Ruiz [12] подчеркивают её высокую точность (до 99%) и гибкость, но отмечают сложность обработки больших объемов данных и чувствительность к условиям освещения. Y.-W. Hsu и др. [13] исследуют применение глубокого обучения для подсчета пассажиров в автобусах, указывая на проблемы с распознаванием в условиях низкой видимости или высокой плотности. Тепловизоры, рассмотренные I. Grgurević и др. [5], демонстрируют эффективность в условиях плохой освещенности (точность 70–98%), но теряют точность в переполненных транспортных средствах из-за наложения тепловых сигнатур.

Кроме того, интеграция данных из различных источников, таких как GPS, видеокамеры и инфракрасные датчики, как отмечают L. Ge и др. [14] и J. Zhang и др. [15], значительно повышает точность анализа пассажиропотока в условиях высокой плотности пассажиров и сложных маршрутов. M.G. Demissie и др. [16] демонстрируют, что мобильные данные могут служить ценным инструментом для оценки пассажиропотока, особенно в развивающихся странах, где традиционные методы могут быть недоступны. С. McCarthy и др. [17] показывают, что развитие IT-системы (Internet of Things) будет не только повышать точность подсчета, но и обеспечивать гибкое управление транспортными потоками.

Описание белых пятен в проблеме

Несмотря на значительное количество исследований, в данной области остаются нерешенные вопросы, требующие дальнейшего изучения. Во-первых, отсутствует единое мнение о том, какой метод является оптимальным для различных эксплуатационных сценариев, таких как переполненные автобусы в часы пик, транспорт в ночное время или маршруты с низким пассажиропотоком. Во-вторых, боль-

⁴ Власов В.М., Ефименко Д.Б., Богумил В.Н. Информационные технологии на автомобильном транспорте: учебник / под ред. В.М. Власова. М.: Академия, 2014.

⁵ Сайфутдинов Д.Ж. Совершенствование организации мониторинга пассажиропотоков в системе городского транспорта общего пользования: дис. ... канд. техн. наук: 2.9.1. Екатеринбург, 2025. Режим доступа: <https://www.usurt.ru/science/dissertatsionnye-sovety/d-44200802/dissertatsii/sajfutdinov-d-zh> (дата обращения: 11.03.2025).

⁶ Radovan M., Mršić Z., Novak D. A Review of Passenger Counting in Public Transport: Concepts, Methodologies, and Applications // Proceedings of the International Conference on Public Transport and Smart Mobility. – Irvine, CA : Algebra University College, 2024. – P. 45–52.

шинство работ сосредоточены на отдельных технологиях (например, LiDAR или видеоаналитика), но не проводят их комплексного сравнения с учетом всех ключевых критериев – точности, стоимости, простоты внедрения и применимости в реальных условиях. В-третьих, недостаточно внимания уделяется практическим аспектам внедрения технологий: как адаптировать их к существующей транспортной инфраструктуре, какие затраты потребуются на обучение персонала и как обеспечить совместимость с другими системами (например, билетными или диспетчерскими).

Российские исследования^{7,8} часто ограничиваются общими выводами о необходимости автоматизации, не предоставляя детализированных рекомендаций или сравнительных таблиц. Зарубежные работы [5, 18]⁹ более подробно описывают технологии, но редко учитывают специфику развивающихся стран, где бюджетные ограничения и состояние транспорта могут существенно влиять на выбор метода. Таким образом, существует потребность в систематизированном анализе, который бы объединил существующие данные, предложил практические рекомендации и заполнил пробелы в понимании того, как различные технологии могут быть адаптированы к конкретным условиям эксплуатации.

Формулирование цели и задач исследования

Цель данного исследования заключается в проведении всестороннего обзора и сравнительного анализа современных методов автоматизированного подсчета пассажиропотоков в наземном общественном транспорте с целью выявления наиболее эффективных решений для управления перевозками. Для достижения данной цели поставлены следующие задачи:

1. Систематизировать существующие автоматизированные методы подсчета пассажиров, включая их технические характеристики и области применения.
2. Провести сравнение методов по ключевым критериям: точность подсчета (в процентах), стоимость внедрения и эксплу-

атации (низкая, средняя, высокая), простота интеграции в существующую инфраструктуру (высокая, средняя, низкая), применимость к различным типам транспорта и условиям эксплуатации, а также уровень защиты конфиденциальности пассажиров.

3. Разработать практические рекомендации по выбору методов подсчета, которые позволят транспортным операторам оптимизировать управление перевозками в зависимости от их потребностей, бюджета и технических возможностей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения исследования были проанализированы данные из научной литературы, технических отчетов компаний-разработчиков и официальных сайтов производителей систем подсчета пассажиров. Основное внимание уделялось автоматизированным методам, реализуемым с использованием различных технологий. Так, видеоаналитика с машинным обучением предполагает применение камер высокого разрешения, оборудованных алгоритмами глубокого обучения, что позволяет анализировать видеопоток и распознавать пассажиров в режиме реального времени. Технология LiDAR использует лазерные сенсоры для создания трехмерных карт, отображающих движение пассажиров на основе отражения световых импульсов. Другой подход реализуется с помощью инфракрасных датчиков, которые фиксируют прерывание инфракрасных лучей при прохождении пассажиров через дверные проемы, а ультразвуковые датчики – посредством использования звуковых волн для обнаружения движения и подсчета людей. В условиях низкой освещенности применяются тепловизоры, регистрирующие тепловое излучение тел пассажиров, что обеспечивает дополнительную точность в сложных условиях. Помимо этого, системы, основанные на технологиях Wi-Fi и Bluetooth, осуществляют подсчет пассажиров через обнаружение сигналов от мобильных устройств, а технология RFID позволяет учитывать пассажиров с помощью радиочастотных меток, прикрепленных к билетам или картам.

⁷ Лебедева О.А. Совершенствование методов мониторинга пассажиропотоков на маршрутах городского общественного транспорта: дис. ... канд. техн. наук, 05.22.10. М.: МГТУ им. Баумана, 2014. 150 с.

⁸ Сайфутдинов Д.Ж. Совершенствование организации мониторинга пассажиропотоков в системе городского транспорта общего пользования. ...

⁹ Radovan M., Mršić Z., Novak D. A Review of Passenger Counting in Public Transport: Concepts, Methodologies, and Applications // Proceedings of the International Conference on Public Transport and Smart Mobility. Irvine, CA: Algebra University College, 2024. P. 45–52.

Таблица 1
Сравнение методов подсчета пассажиров
Источник: составлено авторами.

Table 1
Comparison of passenger counting methods
Source: compiled by the authors.

Метод	Точность (%)	Стоимость	Простота внедрения	Применимость
Инфракрасные датчики	80–95	Низкая	Высокая	Автобусы, трамваи
Видеоаналитика (ML)	92–99	Высокая	Средняя	Все виды транспорта
Весовые датчики	80–90	Средняя	Низкая	Автобусы, поезда
RFID	82–98	Высокая	Низкая	Контролируемый доступ
Wi-Fi	75–94	Низкая	Высокая	Все виды транспорта
Bluetooth	73–77	Низкая	Высокая	Все виды транспорта
LiDAR	95–96	Высокая	Средняя	Все виды транспорта
Тепловизоры	70–98	Средняя	Средняя	Низкая освещённость
Ультразвуковые датчики	88–89	Низкая	Высокая	Автобусы, трамваи

Также в анализ включены весовые датчики, способные оценивать количество пассажиров по изменению веса транспортного средства.

Методология исследования была построена на теоретическом подходе, включающем систематический обзор литературы и сравнительный анализ технологий. В процессе оценки методов были выделены несколько ключевых критериев. Первый критерий – точность – отражает процент правильного определения количества пассажиров, подтвержденный эмпирическими данными. Второй критерий – стоимость, который оценивается с точки зрения затрат на оборудование, установку и обслуживание, при этом низкая стоимость определяется как до 500 долл. за единицу, средняя – в диапазоне от 500 до 2000 долл., а высокая – свыше 2000 долл. Также важен критерий простоты внедрения, определяющий уровень сложности интеграции предлагаемой системы в существующую транспортную инфраструктуру: высокий уровень означает минимальные

изменения, средний – требует определенной настройки, а низкий уровень внедрения предполагает необходимость значительных модификаций. Кроме того, был учтен критерий применимости, отражающий возможность использования системы на различных типах транспорта – автобусах, трамваях, троллейбусах – и в разных условиях, независимо от времени суток и плотности пассажиропотока.

Эмпирические данные были собраны из научных статей и технических отчетов компаний, таких как DILAX (инфракрасные датчики и видеоаналитика)¹⁰, Foorir (3D-камеры)¹¹, Infotech (видеоаналитика)¹², Hikvision (тепловизоры и видеоаналитика)¹³ и Eurotech (LiDAR и датчики)¹⁴. Например, точность LiDAR в 95–96% подтверждена Р. Kuchár и др. [18], а видеоаналитика с точностью 92–99% – С. Pronello и Х.Р.Г. Ruiz [12]. Все данные обобщены в таблицах, представленных в разделе «Результаты».

¹⁰ DILAX [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dilax.com/en> (дата обращения: 25.02.2025).

¹¹ Infotech [Электронный ресурс]. URL: <https://infotech.group/en> (дата обращения: 25.02.2025).

¹² Hikvision [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hikvision.com/en/> (дата обращения: 25.02.2025).

¹³ Eurotech [Электронный ресурс]. URL: <https://www.eurotech.com> (дата обращения: 26.02.2025).

¹⁴ SensorTech [Электронный ресурс]. URL: <https://sensortecinc.com/> (дата обращения: 26.02.2025).

Таблица 2
Сравнение решений компаний по подсчету пассажиропотока
Источник: составлено авторами.

Table 2
Comparison of companies' passenger counting solutions
Source: compiled by the authors.

Компания	Технология	Точность (%)	Стоимость (\$ за единицу)	Простота внедрения	Применимость	Описание решения
DILAX	Инфракрасные датчики	95–99	300–500	Высокая	Автобусы, трамваи, поезда	Устройства устанавливаются над дверями, фиксируют вход/выход с высокой точностью
Foorir	3D-камеры (ToF)	>98	1000–1500	Средняя	Все виды транспорта	Использует Time-of-Flight для создания 3D-моделей пассажиров, работает в темноте
Infotech	Видеоаналитика (ML)	97–99	1500–2000	Средняя	Все виды транспорта	Камеры с глубоким обучением, распознают пассажиров даже в толпе
Hikvision	Тепловизоры+ ML	92–98	800–1200	Средняя	Низкая освещённость	Комбинация теплового и видеоанализа, эффективна ночью и в плохих условиях
Eurotech	LiDAR	95–96	2000–3000	Средняя	Все виды транспорта	Лазерные сенсоры для точного подсчета в сложных условиях (толпа, движение)
Axis	Видеоаналитика	90–95	1000–1800	Средняя	Автобусы, трамваи, метро	Камеры с базовой аналитикой, подходят для умеренной плотности пассажиров

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты исследования включают общий сравнительный анализ методов подсчета пассажиров (таблица 1) и детальное сравнение решений различных компаний (таблица 2).

Анализ таблицы 1 показывает, что технологии LiDAR и видеоаналитика с применением машинного обучения демонстрируют наивысшую точность – от 95 до 99%. Это делает их оптимальными для работы в сложных условиях, например, при переполненных автобусах в часы пик. Однако высокая стоимость оборудования и необходимость в мощных вычислительных ресурсах для обработки данных ограничивают их широкое внедрение, особенно в небольших городах с ограниченным бюджетом.

В то же время инфракрасные и ультразвуковые датчики обеспечивают более сбалансированное соотношение цены и качества, достигая точности в диапазоне 80–95%. Такие системы представляют интерес для транспортных операторов, которым достаточно базового уровня мониторинга пассажиропотока без значительных затрат на инфраструктуру.

Технологии, основанные на использовании Wi-Fi и Bluetooth, характеризуются простой установкой и низкими затратами, однако их точность, в пределах от 73 до 94%, оставляет желать лучшего для использования в целях точного планирования маршрутов. Основным ограничением этих решений является зависимость от количества и типа мобильных устройств у пассажиров.

Наконец, тепловизоры показывают хорошую эффективность в условиях низкой освещенности, демонстрируя точность от 70 до 98%. Однако их преимущество снижается в условиях плотного скопления людей, когда перекрывающиеся тепловые сигналы затрудняют корректное определение каждого пассажира.

Анализ таблицы 2 демонстрирует конкурентное положение различных производителей на рынке технологий подсчета пассажиропотока. Компания DILAX предлагает доступное решение, использующее инфракрасные датчики, которые легко интегрируются в существующие транспортные средства и обеспечивают высокую точность – до 99%. Такое сочетание параметров делает их популярным выбором для муниципальных операторов, стремящихся оптимизировать затраты при обеспечении точности мониторинга. В свою очередь компании Foorir и Infotech применяют передовые технологии, включая 3D-камеры и видеоаналитику, что позволяет достигать точности выше 98%; однако выбор этих систем требует значительных финансовых вложений и наличия квалифицированного сервиса для обслуживания. Продукция Hikvision основана на сочетании тепловизоров и методов машинного обучения, что делает её оптимальной для ночных маршрутов или регионов с переменной погодой, несмотря на несколько завышенную стоимость по сравнению с другими решениями. Eurotech предлагает системы на базе LiDAR, которые идеально подходят для крупных транспортных систем, где требуется максимально высокая точность в сложных условиях, однако высокая цена (до \$3000) существенно ограничивает применение данной технологии. Производство компании Axis ориентировано на создание сбалансированных решений для условий умеренной нагрузки, при этом их показатели точности уступают лидерам рынка, что отражается в общем сравнительном анализе.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа подтверждают, что выбор метода подсчета пассажиров зависит от множества факторов: бюджета, типа транспорта, условий эксплуатации и требуемой точности. LiDAR и видеоаналитика с машинным обучением демонстрируют наивысшую точность (95–99%), что согласуется с выводами

P. Kuchár и др. [18], M. Radovan и др. (2024)¹⁵. Эти технологии особенно эффективны в переполненных транспортных средствах, где традиционные методы, такие как инфракрасные датчики, могут давать сбои из-за наложения сигналов. Однако их внедрение требует значительных финансовых вложений и технической экспертизы, что делает их менее доступными для малобюджетных систем.

Инфракрасные датчики, такие как решения от DILAX, обеспечивают точность до 99% при низкой стоимости и простоте установки, что делает их практичным выбором для небольших городов или маршрутов с умеренной загрузкой. Это подтверждается выводами Grgurević et al. [5], где подчеркивается их надежность в базовых сценариях. Wi-Fi и Bluetooth, несмотря на простоту внедрения, не могут конкурировать по точности (73–94%) и подходят только для грубых оценок пассажиропотоков, как отмечено в работах M. Nitti и др. [7], H. Jiang и др. [8]. Тепловизоры, такие как решения Hikvision, выделяются в условиях низкой освещенности, но их эффективность снижается в толпе, что ограничивает их универсальность.

Сравнение решений компаний показывает, что рынок предлагает широкий выбор технологий, от бюджетных (DILAX) до премиальных (Eurotech, Infotech). Однако ни одна технология не является универсальной: выбор зависит от приоритетов оператора. Например, для мегаполисов с высокой плотностью пассажиров предпочтительны LiDAR или видеоаналитика, тогда как для пригородных маршрутов достаточно инфракрасных датчиков.

Исследование показало, что наиболее эффективными методами автоматизированного подсчета пассажиров в наземном транспорте являются LiDAR (Eurotech) и видеоаналитика с машинным обучением (Infotech, Foorir), обеспечивающие точность до 99%. Для бюджетных систем оптимальны инфракрасные датчики (DILAX) с точностью до 95% и низкой стоимостью. Рекомендуется комбинировать технологии (например, LiDAR с видеоаналитикой) для компенсации их недостатков и повышения общей эффективности. В дальнейшем целесообразно проводить полевые испытания гибридных систем и разрабатывать алгоритмы машинного обучения, адаптированные к динамичным условиям общественного транспорта.

¹⁵ Radovan M., Mršić Z., Novak D. A Review of Passenger Counting in Public Transport: Concepts, Methodologies, and Applications P. 45–52.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kuipers R.A., Palmqvist C.-W. Passenger Volumes and Dwell Times for Commuter Trains: A Case Study Using Automatic Passenger Count Data in Stockholm // *Appl. Sci.* 2022. T. 12, №12. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12125983>.
2. Андреев К.П. Совершенствование транспортного обслуживания населения // *Транспортное Дело России*. 2017. № 3. С. 7–9.
3. Петрова Д.В. Современные подходы к организации мониторинга пассажиропотоков общественного транспорта городских агломераций // *Int. J. Open Inf. Technol.* 2020. T. 8, № 1. С. 47–57.
4. Ковалев А.М., Егоров К.В., Санжапов Р.Р., Прыткова Е.Г. Тестирование системы аппаратного учета пассажиропотока в реальных условиях городского маршрута // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2021. № 4 (58). С. 12–18.
5. Grgurević I., Juršić K., Rajič V. Review of Automatic Passenger Counting Systems in Public Urban Transport. 5th EAI International Conference on Management of Manufacturing Systems. Cham: Springer, 2022. pp. 1–15. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-67241-6_1.
6. Kotz A., Kittelson D.B., Northrop W.F. Novel Vehicle Mass-Based Automated Passenger Counter for Transit Applications // *Transp. Res. Rec.* 2016. T. 2536. DOI: <https://doi.org/10.3141/2536-05>.
7. Nitti M., Pinna F., Pintor L., et al. iABACUS: A Wi-Fi-Based Automatic Bus Passenger Counting System // *Energies*. 2020. T. 13, no 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13061446>.
8. Jiang H., Chen S., Xiao Z., et al. Pa-Count: Passenger Counting in Vehicles Using Wi-Fi Signals // *IEEE Trans. Mob. Comput.* 2024. T. 23, no 4. pp. 2684–2697. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMC.2023.3263229>.
9. Khan S., Yousaf M.H., Murtaza F., Velastin S. Passenger Detection and Counting for Public Transport System // *NED Univ. J. Res.* 2020. T. XVII. pp. 35–46. DOI: <https://doi.org/10.35453/NEDJR-ASCN-2019-0016>.
10. Labit-Bonis C., Thomas J., Lerasle F. Visual and Automatic Bus Passenger Counting Based on a Deep Tracking-by-Detection System. [Электронный ресурс]. URL: <https://hal.science/hal-03363502> (режим доступа: 30.10.2024)
11. Seidel R., Jahn N., Seo S., et al. NAPC: A Neural Algorithm for Automated Passenger Counting in Public Transport on a Privacy-Friendly Dataset // *IEEE Open J. Intell. Transp. Syst.* 2022. T. 3. pp. 33–44. DOI: <https://doi.org/10.1109/OJITS.2021.3139393>.
12. Pronello C., Ruiz X.R.G. Evaluating the Performance of Video-Based Automated Passenger Counting Systems in Real-World Conditions: A Comparative Study // *Sensors*. 2023. T. 23, no 18. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23187719>.
13. Hsu Y.-W., Wang T.-Y., Perng J.-W. Passenger Flow Counting in Buses Based on Deep Learning Using Surveillance Video // *Optik*. 2020. T. 202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163675>.
14. Ge L., Sarhani M., Voß S., Xie L. Review of Transit Data Sources: Potentials, Challenges and Complementarity // *Sustainability*. 2021. T. 13, no 20. pp. 11450. DOI: <https://doi.org/10.3390/su132011450>.
15. Zhang J., et al. A Real-Time Passenger Flow Estimation and Prediction Method for Urban Bus Transit Systems // *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2017. T. 18, no 11. DOI: <https://doi.org/10.1109/tits.2017.2686876>.
16. Demissie M.G., et al. Inferring Passenger Travel Demand to Improve Urban Mobility in Developing Countries Using Cell Phone Data: A Case Study of Senegal // *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2016. T. 17, no 9. pp. 2466–2478. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2521830>.
17. McCarthy C., et al. A Field Study of Internet of Things-Based Solutions for Automatic Passenger Counting // *IEEE Open J. Intell. Transp. Syst.* 2021. T. 2. pp. 384–401. DOI: <https://doi.org/10.1109/OJITS.2021.3111052>.
18. Kuchár P., Pirník R., Janota A., et al. Passenger Occupancy Estimation in Vehicles: A Review of Current Methods and Research Challenges // *Sustainability*. 2023. T. 15, no 2. pp. 1332. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15021332>.

REFERENCES

1. Kuipers, R. A., & Palmqvist, C.-W., "Passenger Volumes and Dwell Times for Commuter Trains: A Case Study Using Automatic Passenger Count Data in Stockholm". *Appl. Sci.* 2022; vol. 12, no. 12: 5983, Jun. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12125983>.
2. Andreev K.P. The Improvement of Transport Services of the Population. *Transport Business in Russia*. 2017; 3: 7–9. (In Russ.)
3. Petrova D.V. Modern Approaches to the Organization of Public Transport Passenger Traffic Monitoring in Urban Agglomerations. *International Journal of Open Information Technologies*. 2020; Vol. 8, No. 1: 47–57 (In Russ.)
4. Kovalev A.M., Egorov K.V., Sanzhapov R.R., Prytkova E.G. Testing of the system of hardware accounting of passenger traffic in real conditions of the city route. *Technical and technological problems of the service*. 2021; 4 (58): 12–18 (In Russ.)
5. Grgurević I., Juršić K., Rajič V. Review of Automatic Passenger Counting Systems in Public Urban Transport. *5th EAI International Conference on Management of Manufacturing Systems*. Cham: Springer. 2022: 1–15. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-67241-6_1.
6. Kotz A., Kittelson D.B., Northrop W.F. Novel Vehicle Mass-Based Automated Passenger Counter for Transit Applications. *Transp. Res. Rec.* 2016. T. 2536. DOI: <https://doi.org/10.3141/2536-05>.
7. Nitti M., Pinna F., Pintor L., et al. iABACUS: A Wi-Fi-Based Automatic Bus Passenger Counting System. *Energies*. 2020; T. 13, no 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13061446>.
8. Jiang H., Chen S., Xiao Z., et al. Pa-Count: Passenger Counting in Vehicles Using Wi-Fi Signals. *IEEE Trans. Mob. Comput.* 2024; T. 23, no 4: 2684–2697. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMC.2023.3263229>.

9. Khan S., Yousaf M.H., Murtaza F., Velastin S. Passenger Detection and Counting for Public Transport System. *NED Univ. J. Res.* 2020; T. XVII: 35–46. DOI: <https://doi.org/10.35453/NEDJR-ASCN-2019-0016>.

10. Labit-Bonis C., Thomas J., Lerasle F. Visual and Automatic Bus Passenger Counting Based on a Deep Tracking-by-Detection System. Available at: <https://hal.science/hal-03363502> (accessed: 30.10.2024)

11. Seidel R., Jahn N., Seo S., et al. NAPC: A Neural Algorithm for Automated Passenger Counting in Public Transport on a Privacy-Friendly Dataset. *IEEE Open J. Intell. Transp. Syst.* 2022; T. 3: 33–44. DOI: <https://doi.org/10.1109/OJITS.2021.3139393>.

12. Pronello C., Ruiz X.R.G. Evaluating the Performance of Video-Based Automated Passenger Counting Systems in Real-World Conditions: A Comparative Study. *Sensors.* 2023; T. 23, no 18. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23187719>

13. Hsu Y.-W., Wang T.-Y., Perng J.-W. Passenger Flow Counting in Buses Based on Deep Learning Using Surveillance Video. *Optik.* 2020; T. 202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163675>.

14. Ge L., Sarhani M., Voß S., Xie L. Review of Transit Data Sources: Potentials, Challenges and Complementarity. *Sustainability.* 2021; T. 13, no 20[^] 11450. DOI: <https://doi.org/10.3390/su132011450>.

15. Zhang J., et al. A Real-Time Passenger Flow Estimation and Prediction Method for Urban Bus Transit Systems. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2017; T. 18, no 11. DOI: <https://doi.org/10.1109/tits.2017.2686876>.

16. Demissie M.G., et al. Inferring Passenger Travel Demand to Improve Urban Mobility in Developing Countries Using Cell Phone Data: A Case Study of Senegal. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2016; T. 17, no 9: 2466–2478. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2521830>.

17. McCarthy C., et al. A Field Study of Internet of Things-Based Solutions for Automatic Passenger Counting. *IEEE Open J. Intell. Transp. Syst.* 2021; T. 2: 384–401. DOI: <https://doi.org/10.1109/OJITS.2021.3111052>.

18. Kuchár P., Pirník R., Janota A., et al. Passenger Occupancy Estimation in Vehicles: A Review of Current Methods and Research Challenges. *Sustainability.* 2023; T. 15, no 2: 1332. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15021332>.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Плахтий А.Д. Поиск источников, проведение обзора литературы и оформление текста. Изучение существующих исследований и систематизация информации, что стало основой для дальнейшего анализа.

Корчагин Д.С. Анализ найденных решений и проверка статьи. Оценка достоверности и актуальности информации, исследование представленных данных, что способствовало повышению качества работы.

альности информации, исследование представленных данных, что способствовало повышению качества работы.

CONTRIBUTION OF AUTHORS

Plakhtii A.D. Was responsible for sourcing references, conducting a literature review, and formatting the manuscript. Their work involved a thorough investigation of existing studies and the systematic organization of information, which laid the foundation for further analysis.

Korchagin D.S. Focused on analyzing the identified solutions and verifying the article. They assessed the reliability and relevance of the information, as well as conducted a critical evaluation of the presented data, which contributed to enhancing the overall quality of the work.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Плахтий Андрей Дмитриевич – аспирант, 2.3.4. «Управление в организационных системах», Санкт-Петербургский государственный университет (199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб. 7/9).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3334-5106>

e-mail: st110081@student.spbu.ru

Корчагин Денис Сергеевич – аспирант, 2.9.5. «Эксплуатация автомобильного транспорта», Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4). Генеральный директор ООО «Современные технологии» (192019, г. Санкт-Петербург, Хрустальная улица, 18 Литера А, Офис 414А).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7163-3453>

e-mail: Dsk@transportsoft.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Plakhtii Andrei D. – postgraduate student, 2.3.4. Management in Organizational Systems, St. Petersburg State University (Universitetskaya emb., 7-9, St. Petersburg, 199034).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3334-5106>

e-mail: st110081@student.spbu.ru

Korchagin Denis S. – postgraduate student, 2.9.5. Operation of Road Transport, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering” (4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., St Petersburg, 190005). CEO, Modern Technologies LLC (Khrustalnaya Street, 18 Liter A, Office 414A, St Petersburg, 192019).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7163-3453>

e-mail: Dsk@transportsoft.ru

Научная статья
УДК 656.021
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-248-265>
EDN: AZLV LX



ВЫБОР ВМЕСТИМОСТИ АВТОБУСОВ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

А.И. Фадеев ✉, А.М. Ильянков, А.С. Поляков
Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Россия
✉ ответственный автор
9135335784@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Для городских агломераций общественный транспорт имеет важнейшее значение – он обеспечивает удовлетворение мобильности населения при минимальных затратах ресурсов и городского пространства, а также с приемлемым отрицательным влиянием на окружающую среду.

В настоящей статье рассматривается задача выбора пассажироместимости транспортных средств для работы на городских маршрутах общего пользования, решение которой основывается на оптимальном соотношении параметров эффективности и качества функционирования общественного транспорта.

Материалы и методы. В статье на основании практических данных транспортных организаций показано, что стоимость эксплуатации автобусов линейно зависит от их вместимости. С другой стороны, затраты, приходящиеся на пассажиро-место, имеют нелинейный характер. При одинаковых тарифах для обеспечения рентабельной перевозки автобусы меньшей вместимости должны эксплуатироваться с более высокой степенью заполнения салона, в результате снижается качество транспортного обслуживания.

Приведены рекомендации по выбору вместимости транспортных средств для обслуживания городских регулярных маршрутов с учетом неравномерности пассажирских потоков, а также влияния используемого класса подвижного состава на эффективность (экономические параметры) перевозочного процесса.

Обсуждение и заключение. Эффективность разработанной методики определения вместимости подвижного состава для обслуживания регулярных городских маршрутов показана на тестовых расчетах реального маршрута г. Красноярска.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пассажирский поток, транспортный спрос, транспортное предложение, общественный городской транспорт, вместимость автобуса, использование вместимости

Статья поступила в редакцию 14.12.2024; одобрена после рецензирования 18.03.2025; принята к публикации 17.04.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Фадеев А.И., Ильянков А.М., Поляков А.С. Выбор вместимости автобусов городского пассажирского транспорта общего пользования // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 2. С. 248-265. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-248-265>

© Фадеев А.И., Ильянков А.М., Поляков А.С., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-248-265>
EDN: AZLV LX

EVALUATING PASSENGER CARRYING CAPACITY OF BUSES FOR URBAN PUBLIC TRANSPORTATIONS

Alexander I. Fadeev ✉, Alexei M. Ilyankov, Andrei S. Polyakov
Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russia
✉ corresponding author
9135335784@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. For urban agglomerations, public transportation is of crucial importance - it provides mobility of population at minimal cost and within minimum urban space, acceptable negative environmental impact being achieved. This paper considers the problem of estimating passenger carrying capacity of vehicles for operation on urban public routes. The solution is based on determining optimal ratio between parameters of efficiency and quality of public transportation.

Materials and Methods. In this article based on empirical data from transport organizations it has been shown that the cost of bus operation is linearly dependant on its capacity. On the other hand, the costs per passenger-seat are of non-linear character. With the same tariffs to ensure profitable transportation buses of smaller capacity should be operated with a higher degree of passenger compartment occupancy, as a result the quality of transportation suffers. Recommendations on selecting vehicle passenger carrying capacity for operation on urban regular routes taking into account the unevenness of passenger flows, as well as the influence of the used class of rolling stock on the efficiency (economic parameters) of the transportation process have been given.

Discussion and conclusion. The effectiveness of the developed methodology for determining the passenger carrying capacity of rolling stock to operate on regular urban routes is shown based on test calculations for a real route of Krasnoyarsk city.

KEYWORDS: passenger flow, transport demand, transport supply, public urban transport, bus capacity, capacity utilization

The article was submitted: December 14, 2024; **approved after reviewing:** March 18, 2025; **accepted for publication:** April 17, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Fadeev A.I., Ilyankov A.I.M., Polyakov A.S. Evaluating passenger carrying capacity of buses for urban public transportations. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (2): 248-265. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-248-265>

© Fadeev A.I., Ilyankov A.I.M., Polyakov A.S., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Для городских агломераций общественный транспорт имеет важнейшее значение – он обеспечивает удовлетворение мобильности населения при приемлемых затратах ресурсов и городского пространства, а также с минимальным отрицательным влиянием на окружающую среду. Сбалансированное развитие общественного транспорта, скоординированное с другими элементами городской инфраструктуры, соответствие транспортного спроса и предложения, формирование и реализация эффективных стратегий развития пассажирского автомобильного транспорта общего пользования является важнейшей современной проблемой¹.

В процессе проектирования и реализации транспортного предложения решаются такие задачи, как разработка системы маршрутов, установление интенсивности (интервалов) движения по ним, выбор вместимости и определение числа подвижного состава и др. [1]. Применяемые при этом математические модели, как правило, путем минимизации взвешенной суммы затрат учитывают цели пассажиров, операторов и общества, компромисс между которыми обуславливает устойчивое функционирование транспортной системы [2]. Затраты оператора зависят от числа и вместимости автобусов, оборудования, необходимого для их эксплуатации. Расходы пассажира состоят из пассажирских тарифов, затрат времени на ожидание, поездки и пересадки. Загрязняющие вещества, выбрасываемые транспортными средствами, могут рассматриваться как общественные (экологические) затраты [3]. Для получения средневзвешенных затрат применяются коэффициенты приведения [4], посредством которых учитывается разница между расходами участников транспортного процесса.

Используемые для решения рассматриваемых задач подходы зачастую имеют существенные ограничения, они не обязательно приводят к оптимальным результатам, иногда опираются на ряд нереалистичных допущений и упрощений, таких как неизменный спрос, отсутствие сбоев в расписании, фиксированный размер автопарка или неограниченная вместимость транспортных средств [1].

Одной из наиболее актуальных задач является совершенствование структуры парка подвижного состава [5, 6, 7]. Выбор пассажировместимости транспортных средств для городских маршрутов осуществляется на основе факторов, которые могут быть разделены на экономические, социальные, технические, эксплуатационные и нормативные². Важнейшим фактором для данной задачи является пассажирский спрос.

От вместимости транспортных средств зависит интенсивность (интервал) движения. При использовании подвижного состава большей вместимости интервал движения по маршруту увеличивается, что обуславливает повышение затрат времени пассажиров на ожидание автобуса. Также необходимо учитывать, что снижение интервала движения ограничивается пропускной способностью маршрутов [8], т.к. с увеличением частоты движения повышается вероятность возникновения заторов на улично-дорожной сети и остановочных пунктах общественного транспорта.

Интервалы движения по маршрутам устанавливаются в зависимости от мощности пассажирских потоков и имеющегося парка подвижного состава [9, 10, 11]. По причине сложности рассматриваемых процессов данная задача традиционно решается после проектирования транспортной сети. Только в последнее время предпринимаются попытки разработки маршрутов и настройки частоты движения осуществлять в комплексе [11].

Следует отметить проблему, которая заключается в том, что в разных исследованиях применяются неодинаковые допущения. Как следствие, далеко не всегда возможно сопоставление полученных результатов. В некоторых работах используются данные, не в полной степени соответствующие реальным условиям функционирования общественного транспорта [9]. Зачастую при решении задачи используется один критерий, в то время как к транспортной системе предъявляется множество противоречивых требований. Обычно рассматривается автопарк, состоящий только из одного типа транспортных средств; на практике же, как правило, эксплуатируется подвижной состав, обладающий разными параметрами.

¹ Вукан Р. Вучик. Транспорт в городах, удобных для жизни – Transportation for Livable Cities. Территория будущего, 2011. 576 с.

² Антошвили М.Е., Либерман С.Ю., Спирин И.В. Оптимизация городских автобусных перевозок. М.: Транспорт. 1985. 102 с.

В некоторых работах ставится задача определения интервалов движения по маршруту при условии заданного (известного) парка транспортных средств. Например, в статье [12] приводится модель, которая позволяет распределить доступные автобусы между временными периодами и маршрутами, чтобы максимизировать чистую социальную выгоду при ограничениях на общий объем субсидий, размер парка и степень загрузки транспортных средств.

В работе [13] предлагается модель настройки частоты движения по маршрутам, помогающая проектировщику минимизировать общее время в пути по сети для заданного размера автобусного парка за счет оптимального распределения интервалов движения между автобусными маршрутами, принимая во внимание интересы пассажиров.

Задача определения рациональной интенсивности движения подвижного состава по маршрутной сети в общем виде до настоящего времени не имеет однозначного решения. Во многих исследованиях игнорируется возможное превышение вместимости транспортных средств [14]. Обычно предполагается, что все автобусы имеют одинаковый размер, хотя в некоторых исследованиях ставилась задача неоднородного парка разной вместимости [8] или модификации (например, применение электробусов дополнительно к обычным автобусам) [2]. В работе [15] предлагается для снижения времени сообщения использовать полужэкспрессные и скоростные маршруты с транспортными средствами особо малого, малого и среднего класса. Очевидно, что недостаток данного подхода – это отсутствие учета эффективности работы перевозчика.

Определение интенсивности движения заключается в установлении соответствующих интервалов для каждого периода, на которые подразделяется время работы транспорта. Рациональный интервал движения должен быть достаточно коротким, чтобы удовлетворять пассажиров, и, соответственно, при этом необходимо учитывать расходы оператора [1, 16]. Низкая интенсивность движения автобусов в городских условиях равносильна отсутствию

обслуживания: из-за недостаточного качества услуг пассажиры переориентируются на другие доступные виды транспорта. Поэтому разумно устанавливать приемлемый компромисс с точки зрения и пассажиров, и перевозчиков [16, 17].

На основании упомянутого компромисса определяется баланс спроса и предложения, который формулируется исходя из пассажирооборота за определенный период времени (час, сутки, месяц, год и т.д.) или мощности пассажирских потоков на наиболее загруженном участке сети. Время работы подразделено на пиковые и нормальные периоды [18, 19]. Баланс часового пассажирооборота записывается следующим образом³:

$$P_h = A_m q_n \gamma_d v_e, \quad (1)$$

где A_m – количество транспортных средств;
 γ_d – коэффициент использования вместимости;

q_n – номинальная вместимость транспортного средства;

P_h – часовой пассажирооборот;

v_e – эксплуатационная скорость.

Баланс мощности пассажирских потоков⁴:

$$N_h = q_n \lambda k_h, \quad (2)$$

где N_h – мощность пассажирского потока на наиболее загруженном участке маршрута, пасс/ч;

λ – интенсивность движения подвижного состава по маршруту ед./ч;

k_h – коэффициент внутрисуточной неравномерности пассажирских потоков.

Таким образом, баланс транспортного спроса и предложения предусматривает необходимость по выбранному значению вместимости рассчитать интервал движения по маршруту и, наоборот, по установленному интервалу определить вместимость транспортных средств.

При решении указанной задачи предлагается выполнять следующие условия, во-первых, соблюдение максимально-допустимого интервала движения, определенного стандар-

³ Ефремов И.С., Кобозев В.М., Юдин В.А. Теория городских пассажирских перевозок: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1980. 535 с.

⁴ Transit Capacity and Quality of Service Manual, 2nd Edit / TCRP Web Document 6 (Project A-15) Contractor's Final Report, 1999. p 62

том транспортного обслуживания⁵. Во-вторых, обеспечить удовлетворение спроса на транспортные услуги без превышения вместимости подвижного состава на наиболее загруженных участках маршрутов [20].

В работе [21] рассматривается задача обслуживания сложившегося спроса населения на перевозки посредством выполнения минимально необходимой транспортной работы автобусами на городских регулярных маршрутах.

В [22] предложена модель работы подвижного состава городского пассажирского общественного транспорта, сочетающая элементы системы массового обслуживания и конечных автоматов. Посредством данной модели предлагается осуществлять оценку удовлетворенности обслуживанием, под которой понимается количество пассажиров, дождавшихся подходящего подвижного состава.

Основной недостаток ранее разработанных рекомендаций по выбору вместимости транспортных средств – отсутствие учета влияния используемого класса подвижного состава на эффективность (экономические параметры) функционирования маршрутов. Таким образом, выбор пассажировместимости транспортных средств для работы на городских маршрутах является непростой задачей, решение которой связано с пропускной способностью линий, эффективностью и качеством функционирования общественного транспорта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Постановка задачи. Затраты перевозчика на эксплуатацию автобуса (C) линейно зависят от вместимости транспортного средства (q_n) [18, 24]:

$$C = C_0 + C_1 q_n, \quad (3)$$

где C_0 , C_1 – постоянные коэффициенты (константы).

Автобусы в соответствии с техническим регламентом⁶ подразделяются на категории М2

(с максимальной массой до 5 т) и М3 (свыше 5 т). Кроме этого, автобусы вместимостью до 22 пассажиров делятся на классы А и В, свыше 22 пассажиров – на классы I, II, III. В автобусах классов В и III допускается перевозка только по местам сидения, в автобусах классов А, I и II – как сидящих, так и стоящих пассажиров. В 220ФЗ⁷ в зависимости от длины автобусы подразделяются на следующие классы: особо малый, малый, средний, большой и особо большой. Для каждого класса в литературе дается примерная пассажировместимость, которая несколько варьируется в разных источниках. Действующими нормативными документами классификация автобусов по вместимости не установлена. Номинальная вместимость автобуса определяется производителем, исходя из площади пассажирского салона и предельно допустимой массы транспортного средства.

В настоящей статье рассматриваются перевозки общего пользования по регулярным городским маршрутам; будем использовать следующие значения вместимости классов подвижного состава (которые не противоречат другим источникам): до 22 пассажиров – особо малый; от 22 до 40 – малый; от 40 до 80 – средний; от 80 до 110 – большой и свыше 110 – особо большой.

Для обслуживания маршрута вместимость подвижного состава ограничивается мощностью пассажирских потоков и интенсивностью движения транспортных средств:

$$q_n \geq \frac{N_l^{\max} k_h}{\lambda_h}, \quad (4)$$

$N_l^{\max}$ – мощность пассажирского потока наиболее загруженного участка маршрута (пассажиров в час);

λ_h – интенсивность движения подвижного состава по маршруту (единиц в час);

q_n – номинальная вместимость подвижного состава;

k_h – коэффициент внутричасовой неравномерности пассажиропотока.

⁵ При отсутствии стандарта транспортного обслуживания параметры функционирования общественного транспорта задаются другими муниципальными документами, например контрактом с перевозчиком.

⁶ Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011 О безопасности колесных транспортных средств.

⁷ Федеральный закон от 13.07.2015 № 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».

Коэффициент внутрисалонной неравномерности⁸:

$$k_h = q_{\tau}^{\max} / \bar{q}_{\tau}, \quad (5)$$

где $q_{\tau}^{\max}$ – наибольшее количество пассажиров в расчетном периоде τ , который, например, может составлять 15 мин;

$\bar{q}_{\tau}$ – среднее количество пассажиров в периоде τ .

Внутрисалонная неравномерность пассажирских потоков также может быть определена через коэффициент неравномерности часа пик⁹:

$$HPF = Q_h / (4Q_{15}), \quad (6)$$

где Q_h – пассажиропоток в час пик;

Q_{15} – число пассажиров в пиковые 15 мин часа наибольшей интенсивности пассажиропотока.

Очевидно, что

$$k_h = 1/HPF. \quad (7)$$

Из выражения (4) следует, что интенсивность движения по маршруту:

$$\lambda_h \geq \frac{N_l^{\max} k_h}{q_n}, \quad (8)$$

интервал в минутах:

$$I_h = \frac{60}{\lambda_h} \leq \frac{q_n}{N_l^{\max} k_h}. \quad (9)$$

Степень заполнения салона автобуса оценивается посредством коэффициента статического (Y) и динамического ($\bar{Y}$) использования вместимости¹⁰:

$$\gamma_i = q_i / q_n \leq 1, \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{\sum_i q_i l_i}{\sum_i q_n l_i} = \frac{P}{L_m q_n} \leq 1, \quad (11)$$

где q_i – фактическое число пассажиров в салоне транспортного средства на i -м перегоне маршрута;

l_i – длина i -го перегона маршрута;

P – пассажирооборот;

L_m – пробег по маршруту.

Пассажирские потоки неравномерны во времени и в пространстве (рисунок 1). Неравномерность во времени (рисунок 1, б) оценивается посредством коэффициента неравномерности по часам суток¹¹:

$$k_t = \frac{N_t^{\max}}{\bar{N}_t}, \quad (12)$$

$N_t^{\max}$, $\bar{N}_t$ – наибольшая и среднечасовая мощность пассажиропотока.

Динамика пассажирского потока в пространстве (рисунок 1, а) определяется посредством коэффициента неравномерности по длине рейса или оборота по маршруту:

$$k_l = \frac{N_l^{\max}}{\bar{N}_l}, \quad (13)$$

где $N_l^{\max}$, $\bar{N}_l$ – наибольшая и средняя мощность пассажирского потока на перегоне рейса или оборота.

⁸ Ефремов И.С., Кобозев В.М., Юдин В.А. Теория городских пассажирских перевозок ... 535 с.

⁹ Highway Capacity Manual 2000 / Transportation Research Board; National Research Council. Washington, DC, 2000. 1134 p.

¹⁰ Spirin I.V. Transportation of passengers by urban transport : a reference guide. Moscow: Akademkniga, 2004. 413 p.

¹¹ Ефремов И.С., Кобозев В.М., Юдин В.А. Теория городских пассажирских перевозок ... 535 с.

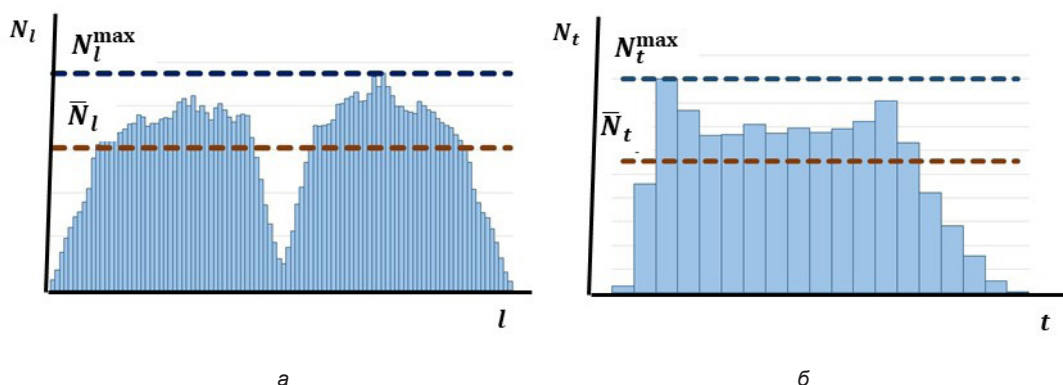


Рисунок 1 – Распределение мощности пассажирских потоков по длине оборота (а) и времени работы транспорта (б)
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Distribution of passenger flow capacity by turnover length (а) and time of transport operation (б)
Source: compiled by the authors.

Для среднего числа пассажиров в транспортном средстве за рейс или оборот по маршруту в соответствии с выражением (4) должно выполняться следующее неравенство:

$$q_o \leq \frac{q_n}{k_h k_l}. \quad (14)$$

Коэффициент использования вместимости за рейс или оборот по маршруту не должен превышать [23.1]

$$\bar{\gamma} \leq \frac{1}{k_h k_l}. \quad (15)$$

По результатам натурного обследования пассажирских потоков общественного транспорта г. Красноярска: $k_h = 1,02 \dots 1,09$; $k_l = 1,3 \dots 2,1$. Таким образом, максимально допустимое значение коэффициента использования вместимости за оборот находится в пределах от 0,44 до 0,75.

Рассмотрим задачу выбора вместимости подвижного состава для обслуживания регулярных городских маршрутов на примере автобуса.

2. Решение задачи. Как упоминалось выше, при формировании транспортного предложения рекомендуется исходить из компромисса между показателями эффективности и качества транспортного процесса.

Наиболее значимыми оценками пассажиров качества транспортных услуг является доступность, комфорт, удобство и безопасность. К важнейшим показателям комфорта транспортного обслуживания относятся: частота (интервал) движения и использование вместимости подвижного состава¹². В настоящей работе для определения эффективности и качества транспортного обслуживания используем следующие показатели, которые зависят от вместимости используемого транспортного средства: стоимость перевозок, частота (интервал) движения и степень наполнения (использования вместимости) салона.

Стоимость эксплуатации будем оценивать в приведенных единицах к автобусу большого класса вместимостью 100 пассажиров, которая принята за 1. На рисунке 2 дана зависимость приведенных расходов на эксплуатацию от вместимости автобусов, полученная по информации муниципальных транспортных организаций г. Красноярска. Она, как и в других работах [24], достаточно хорошо описывается линейной зависимостью (коэффициент детерминации 0,93):

$$c = a q_n + b, \quad (16)$$

где q_n – номинальная вместимость автобуса;
 c – приведенные затраты;
 a и b – постоянные коэффициенты.

¹² Highway Capacity Manual 2000 / Transportation Research Board ...1134 p.

Относительные расходы на пассажиро-место, приведенные к автобусу большого класса:

$$c_p = \frac{cq'_n}{q_n}, \quad (17)$$

где q'_n – номинальная вместимость автобуса большого класса.

При условии одинакового использования вместимости транспортного средства интервал движения по маршруту составляет

$$I_\gamma = \frac{I'q_n}{q'_n}, \quad (18)$$

где I' – интервал движения автобуса большого класса.

Для случая равной стоимости перевозок пассажира интервал движения можно определить

$$I_c = I'c. \quad (19)$$

Точку безубыточности, при которой расходы и доходы от перевозок равны, можно записать следующим образом:

$$S_{km} = \frac{t^r \gamma_c q_n}{l_p}, \quad (20)$$

где t^r – пассажирский тариф;

γ_c – коэффициент безубыточного использования вместимости подвижного состава;

S_{km} – себестоимость одного километра пробега транспортного средства по маршруту.

Коэффициент безубыточного использования вместимости:

$$\gamma_c = c_p \gamma'_c, \quad (21)$$

где γ'_c – коэффициент безубыточного использования вместимости автобуса большого класса.

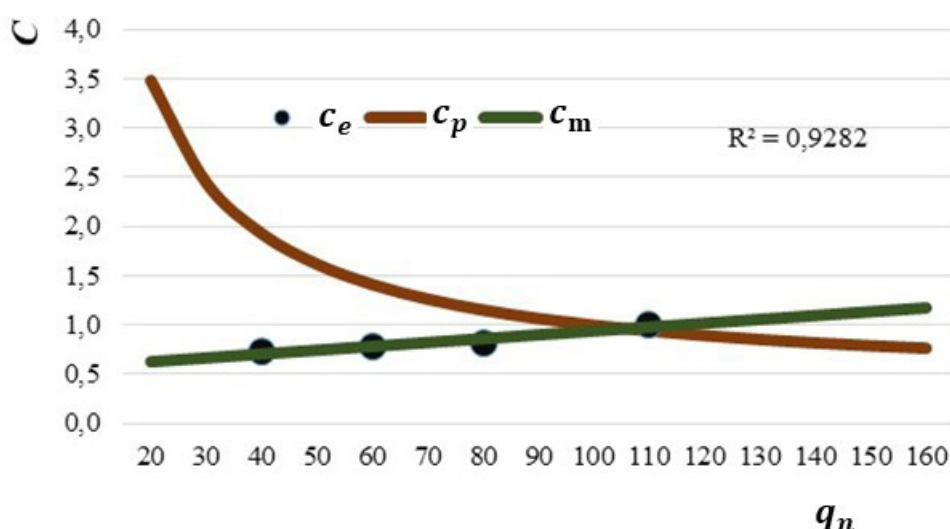


Рисунок 2 – Зависимость приведенных затрат на эксплуатацию (C) от вместимости автобуса (q):
 c_e – фактические приведенные затраты;
 c_p – затраты, приходящиеся на одно пассажиро-место;
 c_m – теоретическая зависимость
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Dependence of operation costs (C) on bus capacity (q), where:
 c_e – actual present costs;
 c_p – costs per passenger-seat;
 c_m – theoretical dependence
 Source: compiled by the authors.

На практике имеется взаимное влияние маршрутов общественного транспорта как через общие остановочные пункты, так и через остановочные пункты, находящиеся в пешеходной доступности. В результате наблюдается перераспределение пассажирских потоков между маршрутами в зависимости от интенсивности движения по ним, т.е. при уменьшении интервала между автобусами возможно увеличение числа перевезенных пассажиров [25]. В настоящей работе для простоты будем рассматривать изолированный маршрут, который не взаимодействует с другими маршрутами.

В связи с неравномерностью пассажирских потоков по часам суток интервалы движения для каждого маршрута устанавливаются дифференцированно по периодам работы транспорта таким образом, чтобы обеспечивать требуемое качество транспортного обслуживания и рентабельную работу операторов. Интервал движения для каждого периода обуславливается мощностью пассажирского потока или стандартом качества транспортного обслуживания. Если интервал движения, рассчитанный в соответствии с выражением (9), превышает величину, заданную стандартом транспортного обслуживания, применяется значение данного параметра из стандарта.

В результате на практике в связи с неравномерностью пассажирских потоков по часам суток на городских регулярных маршрутах средний коэффициент использования вместимости существенно ниже, чем в пиковый период. Как правило, в среднем за день работы транспорта он составляет порядка 0,3 [26]. Например, для городского общественного транспорта г. Красноярска при нормировании пассажирских тарифов¹³ применяется коэффициент использования вместимости 0,28. Величину среднего безубыточного коэффициента использования вместимости можно определить следующим образом:

$$\bar{\gamma}_c = \frac{\bar{\gamma}}{1+r/100}, \quad (22)$$

где r – уровень рентабельности, применяемый при нормировании пассажирских тарифов, %;

$\bar{\gamma}$ – средний коэффициент использования вместимости, используемый при определении пассажирских тарифов.

Обычно для общественного транспорта в тарифах рентабельность принимается порядка 5%, т.е. для г. Красноярска точка безубыточности коэффициента использования вместимости составляет 0,267.

В г. Красноярске более 90% перевозок по регулярным маршрутам осуществляется транспортными средствами большой и средней вместимости, исходя из себестоимости эксплуатации которых определяются пассажирские тарифы. На маршрутах работает 60% автобусов большого класса и 30% среднего. Таким образом, средняя вместимость автобусов среднего и большого класса, использующихся на маршрутах: $(0,6 \cdot 100 + 0,3 \cdot 60) / 0,9 = 86,7$. Из условия равной стоимости перевозки пассажира безубыточный коэффициент использования вместимости автобуса большого класса составит

$$\gamma'_c = \bar{\gamma}_c / c'_p, \quad (23)$$

где c'_p – стоимость перевозки пассажира автобусом вместимости, по которой рассчитаны тарифы (86,7 в нашем примере), отнесенная к автобусу большого класса.

Таким образом, для г. Красноярска $\gamma'_c = 0,24$. Определим коэффициент безубыточного использования вместимости при работе на маршруте:

$$\gamma_c = \gamma'_c c_p l_p / \bar{l}_p, \quad (24)$$

где l_p – среднее расстояние поездки пассажира по маршруту;

$\bar{l}_p$ – расстояние поездки пассажира в среднем по сети.

На рисунке 3 даны зависимости от вместимости автобуса относительного интервала движения при одинаковом коэффициенте использования вместимости (I_γ), одинаковой стоимости перевозки пассажира (I_c), а также коэффициента безубыточного использования вместимости (γ_c). Интервал движения по маршруту автобуса большого класса принят за 1. Применение автобусов малого или среднего класса по сравнению с большими обуславливает уменьшение интервала движения по маршруту, чтобы исключить превышение наполнения салона транспортного средства свыше номинальной вместимости.

¹³ Постановление Правительства Красноярского края от 28.09.2012 № 492-п «Об утверждении Методики формирования регулируемых тарифов на регулярные перевозки пассажиров и багажа автомобильным транспортом по муниципальным и межмуниципальным маршрутам регулярных перевозок на территории Красноярского края».

Рассмотрим применение автобуса вместимостью 20 пассажиров по сравнению с большим классом. В соответствии с рисунком 3 коэффициент использования вместимости будет соответствовать большому автобусу, если интервал движения по маршруту уменьшится в 5 раз (составит 0,2 интервала большого автобуса). Однако по условиям равной стоимости перевозок пассажира интервал движения двадцатиместного автобуса допускается снизить только на 30% (0,7 интервала большого автобуса). В противном случае стоимость перевозки одного пассажира автобусом малого класса будет выше, чем у большого автобуса.

Для двадцатиместного автобуса стоимость пассажирского места практически в три раза превышает автобус большого класса. Из этого следует, что при сопоставимых затратах на перевозку одного пассажира, если двадцатиместный автобус заполнен на 100%, использование вместимости автобуса большого класса составит всего 30%. В этом случае для большого автобуса на регулярном маршруте потребует-

ся увеличить интервал движения только в 1,52 раза (например, с 4 до 6 мин) по сравнению с двадцатиместным. Среднее время ожидания пассажира составляет половину интервала движения¹⁴, т.е. в нашем примере оно возрастет с 2 до 3 мин. Очевидно, что для пассажира более важным является меньшая заполненность транспортного средства, чем дополнительная минута ожидания на остановке.

Сравним автобус вместимостью 50 пассажиров с подвижным составом большого класса при условии равных затрат на одного пассажира. Расчеты показывают, что применение большого автобуса вместо пятидесятиместного на условиях равных затрат на пассажира обуславливает увеличение в 1,27 раза интервала движения по маршруту. При этом коэффициент использования вместимости составит 64% от пятидесятиместного, а время ожидания большого автобуса увеличится только на 13,5%, но степень использование вместимости транспортного средства будет снижена на 36%.

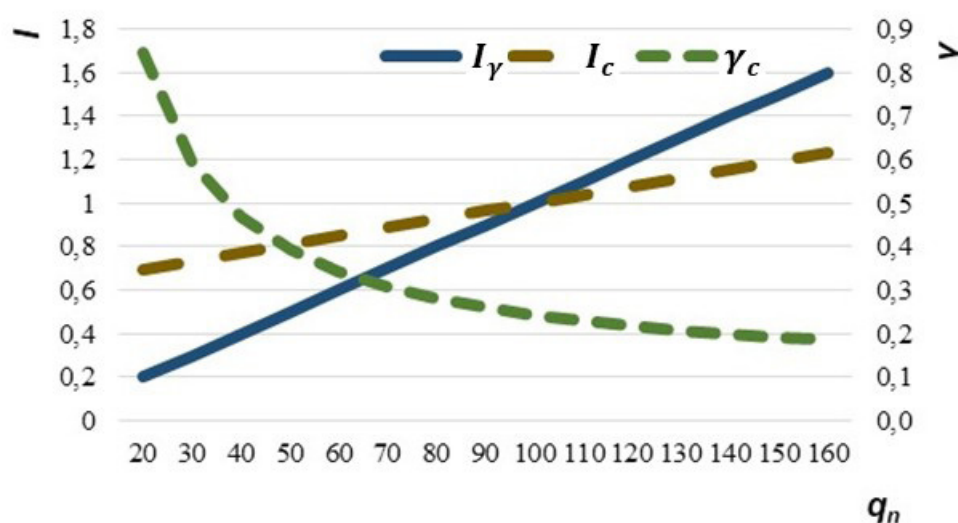


Рисунок 3 – Зависимость I_γ , I_c и γ_c от вместимости автобусов:
 I_γ – интервал движения при одинаковом коэффициенте использования вместимости;
 I_c – интервал движения при одинаковой стоимости перевозки пассажира;
 γ_c – коэффициент безубыточного использования вместимости
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Dependence of I_γ , I_c and γ_c on bus capacity; where:
 I_γ – travel interval at the same capacity utilization factor;
 I_c – travel interval at the same cost of passenger transportation;
 γ_c – coefficient of break-even capacity utilization.
 Source: compiled by the authors.

¹⁴ Ortuzar J.D., Willumsen L.G. Modelling transport. John Wiley & Sons, 2011. 586 p.

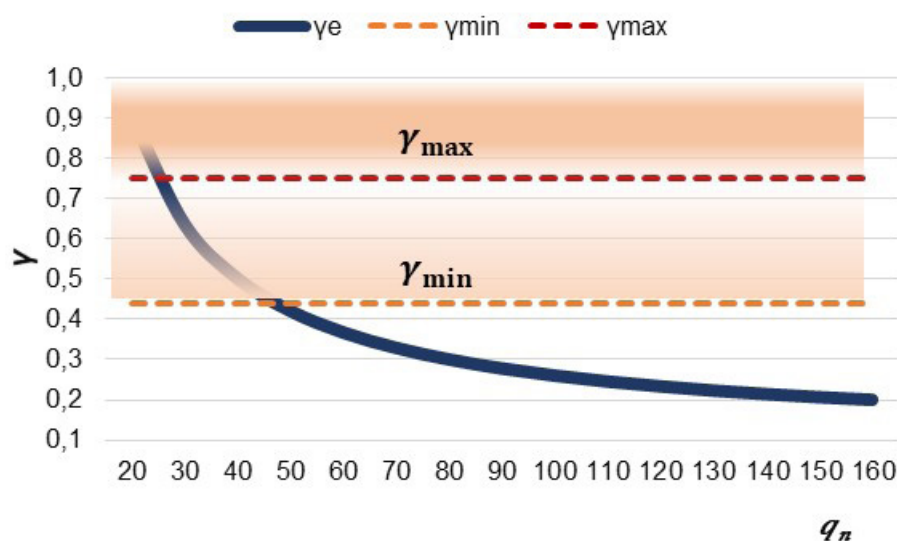


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента безубыточного использования вместимости (γ_c) от вместимости автобусов:
 $\gamma_{\min}, \dots, \gamma_{\max}$ – пределы варьирования коэффициента использования вместимости за оборот на маршрутах городского общественного транспорта
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Dependence of the break-even capacity utilization coefficient (γ_c) on the capacity of buses; where: $\gamma_{\min}, \dots, \gamma_{\max}$ – limits of variation of the capacity utilization factor per turnover on urban public transport routes
 Source: compiled by the authors.

У автобусов особо большого класса коэффициент использования вместимости, равной стоимости перевозки одного пассажира от большого класса, отличается несущественно (кривая зависимости коэффициента использования вместимости в правой части графика более пологая). Например, коэффициент безубыточного использования вместимости 160-местного автобуса ниже на 20% по сравнению с автобусом большого класса. Применение автобусов особо большого класса целесообразно при ограниченной пропускной способности линии на направлениях с мощным пассажирским потоком.

На рисунке 4 приведена зависимость коэффициента безубыточного использования вместимости (γ_c) от вместимости автобусов. На рисунке также даны пределы варьирования максимально-возможного коэффициента использования вместимости, обусловленного неравномерностью пассажиропотоков внутрисетевой и по длине оборота по маршруту. Эти пределы рассчитаны по данным общественного транспорта г. Красноярск (они

корреспондируют с другими источниками¹⁵). В этих пределах находятся все маршруты общественного транспорта. Выше $\gamma_{\max}$ коэффициент использования вместимости за оборот не может быть достигнут ни на одном маршруте при условии, если переполнение автобусов допускаться не будет.

Из рисунка 4 можно заключить следующее: применение автобусов особо малого класса на городских маршрутах регулярных перевозок не обеспечивает выполнение ограничений вместимости транспортного средства. На наиболее напряженных участках маршрута вследствие неравномерности пассажирских потоков будет наблюдаться превышение вместимости салона автобуса или отказ пассажиру в обслуживании.

Автобусы малого класса могут использоваться на ограниченном числе маршрутов со стабильными пассажирскими потоками, мощность которых недостаточна для обеспечения установленного стандартом транспортного обслуживания минимального интервала движения автобусов большого или среднего класса.

¹⁵ Ефремов И.С., Кобозев В.М., Юдин В.А. Теория городских пассажирских перевозок ... 535 с.

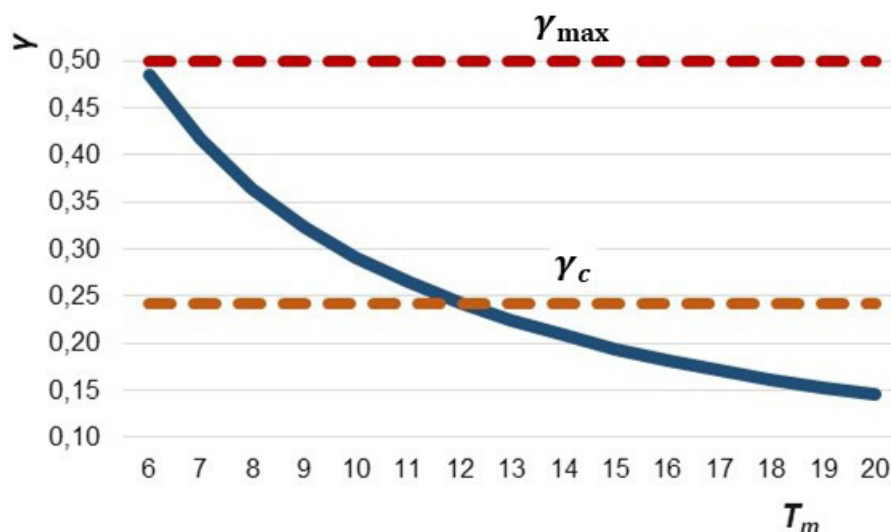


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента использования вместимости ($\bar{\gamma}_m$) от среднего времени работы подвижного состава на маршруте (T_m):
 γ_c – коэффициент безубыточного использования вместимости;
 $\gamma_{\max}$ – максимальный коэффициент использования вместимости маршрута
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Dependence of capacity utilization factor ($\bar{\gamma}_m$) on the average time of rolling stock operation on the route (T_m);
 where: γ_c – coefficient of break-even capacity utilization capacity;
 $\gamma_{\max}$ – maximum capacity utilization factor of the route
 Source: compiled by the authors.

Необходимо учитывать, что нормативная рентабельность автобусов малого класса достигается при коэффициенте использования вместимости большим 0,5, который не обеспечивается на многих маршрутах городского общественного транспорта. Использование автобусов малого класса возможно по специальным тарифам (для «маршруток») или посредством бюджетного субсидирования.

Число транспортных средств для обслуживания маршрута можно рассчитать:

$$A \geq \frac{N_l^{\max} k_h t_o}{q_n}, \quad (25)$$

где t_o – время оборота по маршруту, ч.

Как упоминалось выше, из-за неравномерности пассажирских потоков интервалы движения по маршруту устанавливаются дифференцированно по периодам времени. В периоды снижения интенсивности пассажирских потоков водителям предоставляются обеденные перерывы, также практикуется применение отстойно-разрывного режима работы. От сформированного расписания движения зависит среднее время работы автобуса на маршруте ($\bar{T}_m$). Средний коэффициент использования вместимости за день работы транспорта:

$$\bar{\gamma}_m = \frac{Q_m l_p t_o}{A_m q_n \bar{T}_m l_o}, \quad (26)$$

где Q_m – объем перевозок по маршруту;
 A_m – число транспортных средств на маршруте;
 l_o – длина оборота.
 При этом

$$\gamma_{\max} \geq \bar{\gamma}_m \geq \gamma_c, \quad (27)$$

где $\gamma_{\max}$ – предельный коэффициент использования вместимости за оборот в период пассажиропотоков наибольшей мощности, выражение (15).

Среднее время работы подвижного состава на маршруте:

$$\bar{T}_m = \frac{Q_m l_p t_o}{A_m q_n \bar{\gamma}_m l_o}. \quad (28)$$

На рисунке 5 приведена зависимость коэффициента использования вместимости от среднего времени работы подвижного состава на маршруте. В данном примере коэффициент безубыточного использования вместимости составляет 0,24, а наибольший коэффициент

использования вместимости в соответствии с неравномерностью пассажирских потоков по длине оборота равен 0,5. Из рисунка видно, что для рассматриваемого примера рентабельная эксплуатация подвижного состава обеспечивается, если среднее время работы подвижного состава на маршруте находится в пределах от 6 до 12 ч. Более 12 ч приводит к уменьшению коэффициента использования вместимости ниже точки безубыточности, работа менее 6 ч влечет переполнение салона транспортных средств и отказы пассажирам в обслуживании.

3. Практическая реализация. Рассмотрим задачу выбора вместимости подвижного состава для реального маршрута общественного транспорта г. Красноярск, параметры которого приведены в таблице 1. В таблице 2 даны рассчитанные технико-эксплуатационные показатели автобусов большого, среднего и малого классов при работе на рассматриваемом маршруте.

Минимальное число автобусов рассчитывается в соответствии с выражением (25) и зависит от наибольшей мощности и неравномерности пассажирского потока. Из таблицы 2 видно, что для рассматриваемого маршрута требуется 20 автобусов большого класса, 25 среднего и 50 малого. При этом интервал движения по маршруту в период наибольшей мощности пассажирского потока составит 9 мин автобуса большого класса, 7 – среднего и 4 – малого.

Наибольший коэффициент использования вместимости, который обусловлен неравномерностью пассажирского потока, для данного маршрута составит 0,55. Если в течение работы маршрута наполнение автобусов выдерживать как в пиковый период, среднее время работы подвижного состава на маршруте должно быть не менее 6,9 ч. Максимальное время работы подвижного состава ограничено коэффициентом безубыточного использования вместимости.

Таблица 1
Параметры маршрута
Источник: составлено авторами

Table 1
Route parameters
Source: compiled by the authors.

Наименование параметра	Значение
Объем перевозок, пасс./сут	23345
Транспортная работа, пасс-км/сут	153251
Время работы маршрута, ч	18
Среднее расстояние поездки пассажира по маршруту, км	6,6
Среднее расстояние перевозки пассажира по сети, км	6,4
Коэффициент безубыточного использования вместимости автобуса большого класса	0,22
Длина оборота, км	62,7
Скорость сообщения, км/ч	22
Простой на конечных за оборот, ч	0,25
Время оборота, ч	3,1
Коэффициент внутрисуточной неравномерности пассажиропотока	1,1
Коэффициента неравномерности по длине оборота по маршруту	1,65
Коэффициент неравномерности по часам суток	1,74
Наибольшая мощность пассажирского потока (на наиболее напряженном участке маршрута в пиковый период), пасс./ч	587

Таблица 2
Сравнительные параметры автобусов
Источник: составлено авторами

Table 2
Comparative parameters of buses
Source: compiled by the authors.

Наименование параметра	Класс автобуса		
	Большой	Средний	Малый
Вместимость номинальная, пасс.	100	80	40
Интенсивность движения по маршруту в период наибольшей мощности пассажиропотока, ед./ч	6,5	8,1	16,1
Интервал движения по маршруту в период наибольшей мощности пассажиропотока, мин	9	7	4
Максимальный коэффициент использования вместимости подвижного состава	0,55		
Коэффициент безубыточного использования вместимости подвижного состава	0,23	0,29	0,52
Число автобусов на маршруте, ед.	20	25	50
Минимальное среднее время работы подвижного состава на маршруте, ч	6,9		
Максимальное среднее время работы подвижного состава на маршруте, ч	16,8	13,1	7,3
Средний интервал движения точки безубыточности, мин	10	10	9
Средний интервал движения (при среднем времени работы подвижного состава на маршруте 11 ч), мин	15	12	
Коэффициент использования вместимости	0,32	0,32	

Из таблицы 2 видно, что рассматриваемый маршрут можно обслуживать автобусами большого или среднего класса. Применение автобуса малого класса нецелесообразно из-за высокого значения коэффициента безубыточного использования вместимости (0,52), который близок к максимальному значению коэффициента использования вместимости маршрута (0,55).

На городских маршрутах г. Красноярска подвижной состав работает на маршрутах в среднем 11 ч в день. В этой связи в таблице 2 даны средний интервал движения по маршруту и коэффициент использования вместимости при 11 ч работы на маршруте.

Преимущества использования автобуса большого класса по сравнению со средним:

- меньшее число подвижного состава на пять единиц, что актуально в условиях дефицита водителей;

- ниже значение коэффициента безубыточного использования вместимости, что обеспечивает более высокую эффективность перевозочного процесса;

- выше значение максимально возможного среднего времени работы на маршруте, что позволяет повысить качество обслуживания, например, за счет увеличения времени работы маршрута.

Недостатки применения на рассматриваемом маршруте автобусов большого класса по сравнению со средним: более высокий средний интервал движения по маршруту при одинаковой продолжительности работы автобусов, равной 11 ч.

При среднем времени работы на маршруте 11 ч оба рассматриваемых класса автобусов обеспечивают коэффициент использования вместимости, равный 0,32 в среднем за день работы транспорта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор пассажировместимости транспортных средств для обслуживания городских маршрутов является непростой задачей, решение которой связано с пропускной способностью линий, эффективностью и качеством функционирования общественного транспорта.

В статье на основании практических данных транспортных организаций показано, что стоимость эксплуатации автобусов линейно зависит от их вместимости. С другой стороны, затраты, приходящиеся на пассажиро-место, имеют нелинейный характер (см. рисунок 2). При одинаковых тарифах для обеспечения рентабельной перевозки автобусы меньшей вместимости должны эксплуатироваться с более высокой степенью заполнения салона, в результате снижается качество транспортного обслуживания.

В настоящей работе приведены рекомендации по выбору вместимости транспортных средств для обслуживания городских регулярных маршрутов с учетом неравномерности пассажирских потоков, а также влияния используемого класса подвижного состава на эффективность (экономические параметры) перевозочного процесса. Показано, что автобусы малого класса при использовании на регулярных маршрутах со значительной неравномерностью пассажирских потоков не обеспечивают нормативные параметры эффективности и качества транспортного обслуживания. Рентабельная эксплуатация данных автобусов достигается при использовании вместимости салона более 50%, что невозможно на многих маршрутах общественного транспорта вследствие неравномерности пассажирских потоков.

Выбор вместимости подвижного состава для обслуживания маршрута обуславливается следующими факторами:

мощность пассажирских потоков и заданные (стандартами и пропускной способностью линии) значения интенсивности движения транспортных средств;

верхний предел коэффициента использования вместимости, который обуславливается неравномерностью пассажиропотоков внутри часовой и по длине оборота по маршруту;

нижний предел коэффициента использования вместимости, который определяется точкой безубыточной эксплуатации подвижного состава, зависящей от доходов на одного перевезенного пассажира (складываются из пассажирского тарифа и бюджетных субсидий).

Таким образом, в данной работе предложено решение задачи выбора вместимости подвижного состава, исходя из компромисса между качеством и эффективностью транспортного обслуживания. Решение задачи проиллюстрировано на примере реального маршрута пассажирского транспорта общего пользования г. Красноярска.

Направления дальнейших исследований:

1. Осуществить решение задачи с учетом взаимного влияния маршрутов общественного транспорта.

2. Рассмотреть условия, возникающие при финансировании по брутто-контрактам, в соответствии с которыми оплата работы перевозчиков зависит от выполненной транспортной работы (пробега по маршруту или времени его обслуживания без учета перевезенных пассажиров).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Guihaire V., Hao J-K. Transit network design and scheduling: A global review // *Transp. Res. Part A: Policy Pract.* 2008. Vol. 42, Iss. 10. P. 1251–1273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.03.011>.
2. Pternea M., Kepaptsoglou K., Karlaftis MG (2015) Sustainable urban transit network design. *Transp Res Part A Policy Pract* 77:276–291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.024>
3. Duran-Micco J., Vermeir E., Vansteenwegen P Considering emissions in the transit network design and frequency setting problem with a heterogeneous fleet. *Eur J Oper Res.* 2020. 282: 580–592. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.09.050>
4. Owais M. Osman M.K. Complete hierarchical multi-objective genetic algorithm for transit network design problem. *Expert Syst Appl.* 2018. 114:143–154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.07.033>
5. Дрючин Д.А., Майоров М.А. Основные направления повышения качества транспортного обслуживания населения городским пассажирским транспортом по регулярным маршрутам // *Вестник Оренбургского государственного университета.* 2015. № 4. (179). С. 30–36.
6. Дрючин Д.А. Оптимизация численности автотранспортных средств, обслуживающих регулярные маршруты городских агломераций / Д. А. Дрючин, Т. В. Коновалова, Е. А. Лебедева [и др.]; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Оренбургский государственный университет, Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ). Краснодар: Издательский дом «Юг», 2024. 177 с.
7. Дрючин Д.А. Совершенствование структуры городского пассажирского наземного транспортного комплекса на основе согласованного развития подсистем // *Вестник СибАДИ.* 2024; 21(1): 74–87.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-1-74-87>. EDN: TOXJIX

8. Manser P., Becker H., Hörl S., Axhausen K.W. Designing a large-scale public transport network using agent-based microsimulation. *Transp Res Part A Policy Pract.* 2020.137: 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.04.011>

9. Durán-Micco J., Vansteenwegen P. A survey on the transit network design and frequency setting problem // *Public Transport.* 2022. Vol. 14, Iss. 1. P. 155–190. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12469-021-00284-y>.

10. Farahani R.Z., Miandoabchi E., Szeto W.Y., Rashidi H. A review of urban transportation network design problems // *European Journal of Operational Research.* 2013. Vol. 229, Iss. 2. P. 81–302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.01.001>.

11. López-Ramos F. Integrating network design and frequency setting in public transportation networks: a survey // *SORT.* 2014. Vol. 38, Iss. 2. P. 181–214.

12. Furth P.G., and Wilson N.H. M. Setting Frequencies on Bus Routes: Theory and Practice. In *Transportation Research Record* 818, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1981. pp. 1–7.

13. Sharma A., Parida M., Sekhar C.R., Kathuria A. Capacity analysis of Bhopal BRTS using empirical and simulation model // *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies.* 2015. 11. 1575–1593.

14. Durán-Micco J., Vansteenwegen P. A survey on the transit network design and frequency setting problem // *Public Transp.* 2021. 14. 155–190.

15. Кулев А.В., Ломакин Д.О. Социально-ориентированный подход назначения подвижного состава на маршруты городского пассажирского транспорта // *Мир транспорта и технологических машин*, №4-1(87). 2024. С. 38–45.

16. BUBA, Ahmed & E, Lai. (2018). A Differential Evolution For Simultaneous Transit Network Design And Frequency Setting Problem. *Expert Systems with Applications.* 106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.04.011>.

17. Фадеев А.И., Фомин Е.В. Определение оптимальной структуры парка подвижного состава городского пассажирского транспорта общего пользования с учетом взаимного влияния маршрутов // *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2018. №8 (139) С. 189–198

18. Wang Yu-Lan & Chen, Ming-Li & Lin, Scott. A Formulated Approximated Solution for a Bus Transit System with Peak and Normal Periods. *Journal of Advanced Transportation.* 2023. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/9011415>.

19. Liu Huasheng & Zhao, Yuqi & Li, Jin & Li, Yu & Gao, Xiangtao. Optimization Model of Transit Route Fleet Size Considering Multi Vehicle Type. *Sustainability.* 2021; 14. 193. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14010193>.

20. Рассоха В.И., Дрючин Д.А., Надирян С.Л. Оптимизация структуры парка безрельсовых транспортных средств, обслуживающих городские пассажирские маршруты, на основе результатов

математического моделирования // *International Journal of Advanced Studies.* 2023. Том 13, № 3. С. 180–202. DOI: <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-3-180-202>

21. Паршакова К.А., Якунин Н.Н., Якунина Н.В. Влияние характеристик пассажиропотоков на эффективность суточных планов интервалов движения городского транспорта // *Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике.* 2024; (4): 43–46.

22. Потафеева Е.С., Огар Т.П., Панфилов А.Э., Харитонов И.М. Модель подвижного состава городского пассажирского общественного транспорта // *Известия ТулГУ. Технические науки.* 2024. Вып. 3. С. 172–174.

23. Фадеев А.И., Фомин Е.В., Алхуссейни С. Определение предельно допустимого коэффициента использования вместимости городского пассажирского транспорта // *Вестник СибАДИ.* 2019; 16(3): 290–301. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-290-301>

24. Jara-Díaz, Sergio & Gschwender, Antonio The effect of financial constraints on the optimal design of public transport services // *Transportation.* 2009. 36. 65–75. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11116-008-9182-8>.

25. 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):362–386. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-362-386>. EDN: YNNWNU

REFERENCES

1. Guihaire V., Hao J-K. Transit network design and scheduling: A global review. *Transp. Res. Part A: Policy Pract.* 2008; Vol. 42, Iss. 10: 1251–1273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.03.011>.

2. Pternea M., Kepaptsoglou K., Karlaftis MG (2015) Sustainable urban transit network design. *Transp Res Part A Policy Pract.* 77: 276–291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.024>

3. Duran-Micco J., Vermeir E., Vansteenwegen P. Considering emissions in the transit network design and frequency setting problem with a heterogeneous fleet. *Eur J Oper Res.* 2020; 282: 580–592. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.09.050>

4. Owais M. Osman M.K. Complete hierarchical multi-objective genetic algorithm for transit network design problem. *Expert Syst Appl.* 2018; 114: 143–154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.07.033>

5. Dryuchin D.A., Mayorov M.A. The main directions of improvement of quality of transport service of the population city passenger transport along regular routes. *Vestnik of the Orenburg State University.* 2015; 4 (179): 30–36. (in Russ.)

6. Driuchin D.A., Konovalova T.V., Lebedeva E.A. [i dr.] Optimization of the number of vehicles serving regular routes of urban agglomeration; *Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniia Rossiiskoi Federatsii, Orenburgskii gosudarstvennyi universitet, Kubanskii*

gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet (KubGTU). Krasnodar: Izdatel'skii dom «IUG», 2024:177. (in Russ.)

7. Dryuchin D.A. Improvement of urban passenger ground transport structure based on coordinated development of subsystems. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(1): 74–87. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-1-74-87>. EDN: TOXJIX

8. Manser P., Becker H., Hörl S., Axhausen K.W. Designing a large-scale public transport network using agent-based microsimulation. *Transp Res Part A Policy Pract.* 2020; 137: 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.04.011>

9. Durán-Micco J., Vansteenwegen P. A survey on the transit network design and frequency setting problem. *Public Transport*. 2022; Vol. 14, Iss. 1: 155–190. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12469-021-00284-y>.

10. Farahani R.Z., Miandoabchi E., Szeto W.Y., Rashidi H. A review of urban transportation network design problems. *European Journal of Operational Research*. 2013; Vol. 229, Iss. 2: 81–302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.01.001>.

11. López-Ramos F. Integrating network design and frequency setting in public transportation networks: a survey. *SORT*. 2014; Vol. 38, Iss. 2: 181–214.

12. Furth P.G., and Wilson N.H. M. Setting Frequencies on Bus Routes: Theory and Practice. In *Transportation Research Record 818*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1981: 1–7.

13. Sharma A., Parida M., Sekhar C.R., Kathuria A. Capacity analysis of Bhopal BRTS using empirical and simulation model. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. 2015; 11: 1575–1593.

14. Durán-Micco J., Vansteenwegen P. A survey on the transit network design and frequency setting problem. *Public Transp.* 2021; 14: 155–190.

15. Kulev A.V., Lomakin D.O. Socially-oriented approach to assigning rolling stock to urban passenger transport routes. *World of transport and technological machines*. 2024; 4-1(87); 38–45.

16. BUBA, Ahmed & E. Lai. A Differential Evolution For Simultaneous Transit Network Design And Frequency Setting Problem. *Expert Systems with Applications*. 2018; 106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.04.011>.

17. Fadeev A.I., Fomin E.V. Determination of the optimal structure of the fleet of rolling stock of public urban passenger transport, taking into account the mutual influence of routes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018; 8 (139): 189–198. (in Russ.)

18. Wang Yu-Lan & Chen, Ming-Li & Lin, Scott. A Formulated Approximated Solution for a Bus Transit System with Peak and Normal Periods. *Journal of Advanced Transportation*. 2023; 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/9011415>

19. Liu Huasheng & Zhao, Yuqi & Li, Jin & Li, Yu & Gao, Xiangtao. Optimization Model of Transit Route

Fleet Size Considering Multi Vehicle Type. *Sustainability*. 2021; 14. 193. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14010193>.

20. Rassokha V.I., Dryuchin D.A., Nadiryan S.L. Optimization of the structure of the fleet of trackless vehicles serving urban passenger routes based on the results of mathematical. *International Journal of Advanced Studies*. 2023; Vol. 13, No. 3: 180–202. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-3-180-202>

21. Parshakova K.A., Yakunin N.N., Yakunina N.V. The influence of passenger flow characteristics on the efficiency of daily urban transport interval plans. *Transport of the Russian Federation*. 2024; (4): 43–46. (In Russ.)

22. Potafeeva E.S., Ogar T.P., Panfilov A.E., Kharitonov I.M. Model of the rolling stock of urban passenger public transport. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU)*. 2024; Issue 3: 172–174. (In Russ.)

23. Fadeev A.I., Fomin Ye.V., Alhusseini S. URBAN PUBLIC TRANSPORT: MARGINAL VALUE OF THE CAPACITY FACTOR. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019; 16(3): 290–301. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-290-301>

24. Jara-Díaz, Sergio & Gschwender, Antonio. The effect of financial constraints on the optimal design of public transport services. *Transportation*. 2009; 36: 65–75. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11116-008-9182-8>.

25. 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.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-362-386>. EDN: YNNWNU

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Фадеев А.И. Постановка задачи, разработка математической модели, анализ результатов, формулирование заключения.

Ильянков А.М. Участие в подготовке исходных данных и расчетах, обзор литературных источников.

Поляков А.С. Анализ состояния вопроса, обзор литературных источников, участие в подготовке исходных данных и расчетах.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Fadeev A.I. Problem statement, mathematical model development, analysis of results, formulation of conclusion

Ilyankov A.M. Participation in the preparation of initial data and calculations, review of literary sources

Polyakov A.S. Analysis of the issue status, review of literary sources, participation in the preparation of initial data and calculations

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фадеев Александр Иванович – д-р техн. наук, проф. кафедры транспорта Сибирского федерального университета (660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д.26).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6581-7087>,

Scopus ID: 57208356151,

SPIN-код: 1304-7849,

e-mail: 9135335784@mail.ru

Ильянков Алексей Михайлович – аспирант кафедры транспорта Сибирского федерального университета (660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д.26).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0924-9934>,

e-mail: ilyankov3322@mail.ru

Поляков Андрей Сергеевич – аспирант кафедры транспорта Сибирского федерального университета (660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д.26).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3860-5968>,

e-mail: polyak97@yandex.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Fadeev Alexander I. – Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Department of Transport, Siberian Federal University (26, Akademika Kirenskogo str., Krasnoyarsk, 660074).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6581-7087>,

Scopus ID: 57208356151,

SPIN code: 1304-7849,

e-mail: 9135335784@mail.ru

Ilyankov Alexey M. – postgraduate student of the Department of Transport, Siberian Federal University, (26, Akademika Kirenskogo str., Krasnoyarsk, 660074).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0924-9934>,

e-mail: ilyankov3322@mail.ru

Polyakov Andrey S. – postgraduate student of the Department of Transport, Siberian Federal University, (26, Akademika Kirenskogo str., Krasnoyarsk, 660074).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3860-5968>,

e-mail: polyak97@yandex.ru

Научная статья
УДК 656.132
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-266-280>
EDN: ZBDTWS



ИССЛЕДОВАНИЕ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ ГОРОДОВ НА ПРЕДМЕТ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫДЕЛЕНИЯ ПОЛОС ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

А.А. Цариков

Уральский государственный университет путей сообщения,
г. Екатеринбург, Россия
zarikof@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Существующие условия движения транспорта в крупных городах России не позволяют удовлетворять качественный спрос на перевозки пассажиров и грузов. Скорость сообщения в часы пик снижается в значительных пределах и на ряде участков сети соответствует скорости сообщения пешехода. Избыточный объем перемещений на личном транспорте требует реализации комплекса мероприятий, направленных на развитие городского пассажирского транспорта общего пользования. Одним из таких мероприятий является выделение отдельных полос для движения пассажирского транспорта. Вместе с этим существующая нормативная документация рекомендует организовать подобные полосы только на участках улично-дорожной сети с тремя и более полосами движения в одном направлении.

Цель данной работы – определить долю протяженности улично-дорожной сети городов, в которых существует возможность организовать полосы для движения пассажирского транспорта общего пользования без проведения работ по реконструкции проезжей части.

Материалы и методы. В процессе написания статьи использовался метод поиска «условного транспортного центра» города, предложенный автором. Для деления территории города применялся метод концентрических окружностей с шагом в 1 км. С помощью навигационной системы «Яндекс. Карты» были получены данные о количестве полос движения на улично-дорожной сети 17 городов России и Восточной Европы.

Результаты. Полученные в результате исследования данные показали, что доля улично-дорожной сети, на которой существует возможность выделения полос для движения пассажирского транспорта, может достигать значений 40% и более. При этом чем выше численность населения города, тем больше доля улиц с многополосным движением. В центральной части крупнейших городов России доля многополосных улиц достигает значений 60–80%. Вместе с этим по мере движения от центра к периферии доля подобных магистралей постепенно снижается до значений в 10–15%. Существенное влияние на формирование улиц с многополосным движением оказали исторические периоды, в которые развивались города, а также наличие трамвайного движения в существующих условиях и в прошлом.

Обсуждение и заключение. В результате проделанных исследований можно сделать вывод, что в большинстве крупных городов России доля улично-дорожной сети, на которой существует возможность организации отдельных полос для движения пассажирского транспорта, несколько выше, чем протяженность дорожных заторов. Одновременно с этим в наиболее крупных городах, таких как Екатеринбург, протяженность заторов превысила долю многополосных улиц в 1,5–2 раза. В городах с подобными дорожными условиями организация отдельных полос для движения пассажирского транспорта недостаточна для решения транспортных проблем. Здесь необходимы ограничительные мероприятия, снижающие объем использования личного автомобильного транспорта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: городской пассажирский транспорт, приоритетные условия движения, выделенная полоса, улично-дорожная сеть

Статья поступила в редакцию 13.01.2025; одобрена после рецензирования 14.04.2025; принята к публикации 17.04.2025.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

© Цариков А.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Цариков А.А. Исследование улично-дорожной сети городов на предмет возможности выделения полос для движения пассажирского транспорта // Вестник СиБАДИ. 2025. Т. 22, № 2. С. 266-280. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-266-280>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-266-280>

EDN: ZBDTWS

STUDY OF THE URBAN STREET AND ROAD NETWORK FOR THE POSSIBILITY OF ALLOCATING LANES FOR PASSENGER TRANSPORT

A.A. Tsarikov

Ural State University of Railway Transport,
Yekaterinburg, Russia
zarikof@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The existing traffic conditions in major Russian cities do not allow us to meet the high demand on the quality for passenger and cargo transportation. The speed of movement during peak hours decreases significantly and on some sections of the network corresponds to the pedestrian speed. The excessive volume of private transport movements requires the implementation of a set of measures aimed at the development of urban public passenger transport. One of these measures is the allocation of separate lanes for passenger transport. At the same time, the existing regulatory documentation recommends organizing such lanes only on sections of the road network with three or more lanes in one direction.

The purpose of this work is to determine the proportion of the length of the street and road network of cities in which it is possible to organize lanes for public passenger transport without carrying out roadway reconstruction work.

Materials and methods. Method of searching for the "conditional transport center" of the city proposed by the author was used in the process of writing the article. On order to divide the city territory, the method of concentric circles with a step of 1 kilometer was employed. Data on the number of traffic lanes on the road network of 17 cities in Russia and Eastern Europe were obtained applying the navigation system "Yandex. Maps".

Results. The data acquired as a result of the study showed that the share of the road network on which it is possible to allocate lanes for passenger transport can reach 40% or more. At the same time, the higher the population of a city, the greater the proportion of streets with multi-lane traffic. In the central part of the largest cities in Russia, the proportion of multi-lane streets reaches 60-80%. At the same time, as we move from the center to the periphery, the proportion of such highways gradually decreases to 10-15%.

The formation of streets with multi-lane traffic was significantly influenced by the historical periods of cities' development, as well as by the presence of tram traffic now and in the past.

Discussion and conclusion. As a result of the research carried out, it can be concluded that in most Russian cities, the share of the street and road network on which it is possible to organize separate lanes for public passenger transport is slightly higher than the length of traffic jams. At the same time, in the largest cities, such as Yekaterinburg, the length of traffic congestion exceeded the share of multi-lane streets by 1.5 - 2 times. In cities with similar road conditions, the organization of dedicated traffic lanes for passenger transport is not enough to solve transport problems. In these cases, restrictive measures are needed to be implemented to reduce the use of personal automobile transport.

KEYWORDS: urban passenger transport, priority traffic conditions, dedicated lane, road network

January 13, 2025; approved after reviewing: April 14, 2025; accepted for publication: April 17, 2025.

The author has 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. Tsarikov A.A. Study of the urban street and road network for the possibility of allocating lanes for passenger transport. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (2): 266-280. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-266-280>

© Tsarikov A.A., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Рост уровня автомобилизации населения городов России, с одной стороны, повысил мобильность и подвижность населения, а с другой стороны, стал причиной появления множества транспортных проблем. К данным проблемам стоит отнести рост интенсивности движения транспорта [1], появления транспортных заторов [2], снижение скорости сообщения [3], проблемы вредных выбросов [4, 5], дефицит парковочных мест [6, 7], а также повышение общего уровня аварийности [8, 9].

Для решения вышеперечисленных проблем, как указывают отечественные и зарубежные специалисты, необходимо развитие пассажирского транспорта общего пользования [10, 11, 12, 13], в том числе внеуличных видов, к которым стоит отнести скоростной автобус [14, 15, 16, 17, 18] и скоростной трамвай [19].

Одновременно с этим наиболее простым и эффективным мероприятием, позволяющим повысить качество и скорость перевозок пассажиров, является создание приоритетных условий для движения пассажирского транспорта. Прежде всего, здесь стоит отметить выделение отдельных полос для движения подвижного состава общественного транспорта. Вопросы выделения отдельных полос достаточно подробно рассмотрены в работах¹ [19, 20, 21, 22, 23].

Однако геометрические размеры улиц не всегда позволяют выделять отдельные полосы для движения пассажирского транспорта, без существенного снижения пропускной способности или реконструкции проезжей части. Особенно это касается магистралей с четырьмя и менее полосами движения в двух направлениях. В таких условиях подобное мероприятие может в два раза снизить пропускную способность улицы и привести к сетевым заторам как в отдельных районах, так и во всем городе.

Как указано в СП 396.1325800.2018², выделенные полосы для наземного пассажирского транспорта общего пользования допускается предусматривать при наличии более двух полос движения транспорта в одном направле-

нии. Подобные магистрали не требуют значительных финансовых вложений и позволяют в кратчайшие сроки создать приоритетные условия для движения пассажирского транспорта.

Вместе с этим возникает логичный вопрос: «Какую долю от общей протяженности улично-дорожной сети составляют магистрали, отвечающие вышеперечисленным требованиям?» Кроме того, важна не только их доля, но и пространственное место и их расположение на территории города.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На первом этапе исследования были разработаны графические модели транспортной сети $G(R, U)$. На основе данных «Яндекс.Карты», а точнее его раздела панорамы улиц, были проведены исследования ширины улиц и дорог магистрального значения на предмет количества организованных полос. Полученные в результате исследования данные о количестве полос наносились на графическую модель города. При этом цвет дуги U означал количество полос (рисунок 1) на перегоне данного участка сети.

Полученная таким образом цветограмма транспортной сети была использована для расчета протяженности улиц l_i^n с определенным количеством полос. В дальнейшем проводился расчет общей протяженности улиц с n -м количеством полос (1), а также его доля от протяженности магистральной транспортной сети (2):

$$L_c^n = \sum l_i^n, \quad (1)$$

$$D_c^n = \frac{L_c^n}{L_c}, \quad (2)$$

где L_c^n – суммарная протяженность транспортной сети с n -м количеством полос, км;

l_i^n – протяженность отдельных участков сети с n -м количеством полос, км;

L_c – суммарная протяженность транспортной сети города, км;

D_c^n – доля транспортной сети с n -м количеством полос, %.

¹ Gorev A.E., Solodkii A.I., Popova O.V., Ospanov D.T. Formation of priority movement corridors of urban passenger transport // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2019 International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering, ICIAE 2019, Irkutsk, 27 мая - 01 2019 года. Vol. 632. - Irkutsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012013. DOI: 10.1088/1757-899X/632/1/012013.

² СП 396.1325800.2018 «Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования» версия от 25 июня 2020 года.

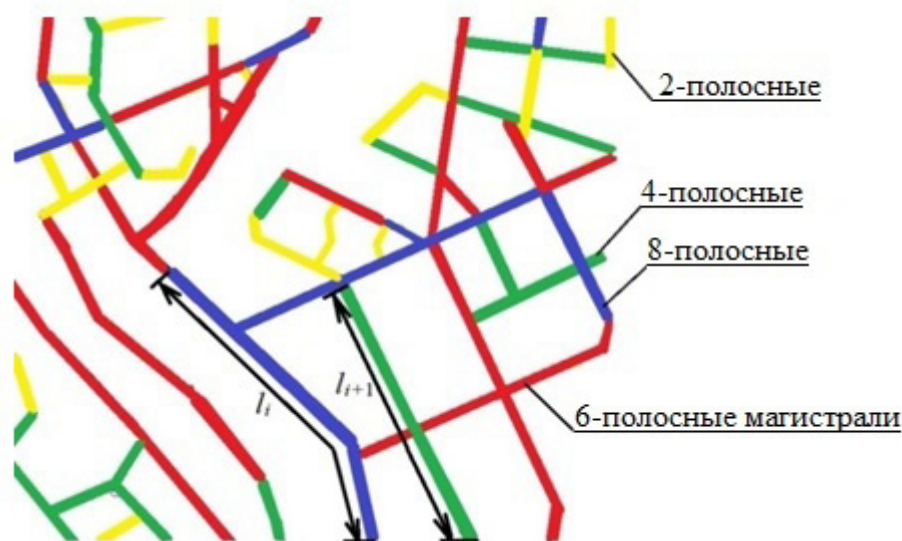


Рисунок 1 – Пример расчета протяженности сети с различным числом полос
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Example of calculating the length of the network with a different number of lanes
Source: compiled by the author.

На втором этапе исследования производился поиск «условного транспортного центра» города. Данный подход позволяет проводить оценку изменения протяженности сети, доли многополосных магистралей и длины заторов по мере движения от центра к периферии. Использование географического центра города в этом случае может давать некорректные результаты. В первую очередь это связано с неравномерным расширением границ населенных пунктов в отдельных направлениях. Иными словами, увеличение площади города за счет смещения его границы в одном направлении может существенно сместить географический центр населенного пункта. При этом расширение территории города может производиться без какого-либо освоения данной территории, и в первую очередь транспортной инфраструктуры.

Для этого автор предложил методику описанных окружностей. Ее суть состоит в построении окружностей или эллипсов, вокруг графической модели города. В соответствии с данной методикой все участки сети должны были полностью разместиться внутри эллипсов и окружностей с минимально возможным для этого города радиусом R . Центр данного эллипса или окружности автор принял за центр транспортной сети города. Пример поиска центра сети представлен на рисунке 2.

Для получения данных о закономерностях изменения количества полос относительно центра города автор использовал метод концентрических окружностей. Суть данного метода состоит в делении территории города концентрическими окружностями радиуса $X_1, X_2, X_3 \dots X_n$ относительно центра³.

³ Харгет П. Пространственный анализ в экономической географии. М.: Прогресс, 1969. 391 с.



Рисунок 2 – Определение графического центра транспортной сети
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Definition of the transport network graphic center
Source: compiled by the author.

Данный метод исследования неоднократно применялся автором для оценки развития улично-дорожной сети города и пространственной оценки интенсивности движения [24]. Относительно центра транспортной сети были построены концентрические окружности R_n с относительным шагом $j=1$ км (рисунок 3). Для крупных городов максимальные значения j составляли 20 км, для малых город 4 км.

Стоит уточнить, что метод концентрических окружностей применим для городов со стандартной формой освоения территории в виде: эллипса; эллипса, рассеченного рекой; полуэллипса и т.д. [25]. При этом неважно, какую схему развития улично-дорожной сети имеет

город: радиальную, прямоугольную, радиально-кольцевую, смешанную и т.д.

Однако некоторые сложности в разделении территории могут возникать для городов в форме линии, таких как Волгоград, Сочи и т.д. Доля городов с подобной формой освоения территории составляет менее 5% от общего количества населенных пунктов. Здесь автор рекомендует использование комбинированного способа, в котором одновременно с концентрическими окружностями используется деление территории на сектора. Более подробно использование данного метода описано в работе [3].

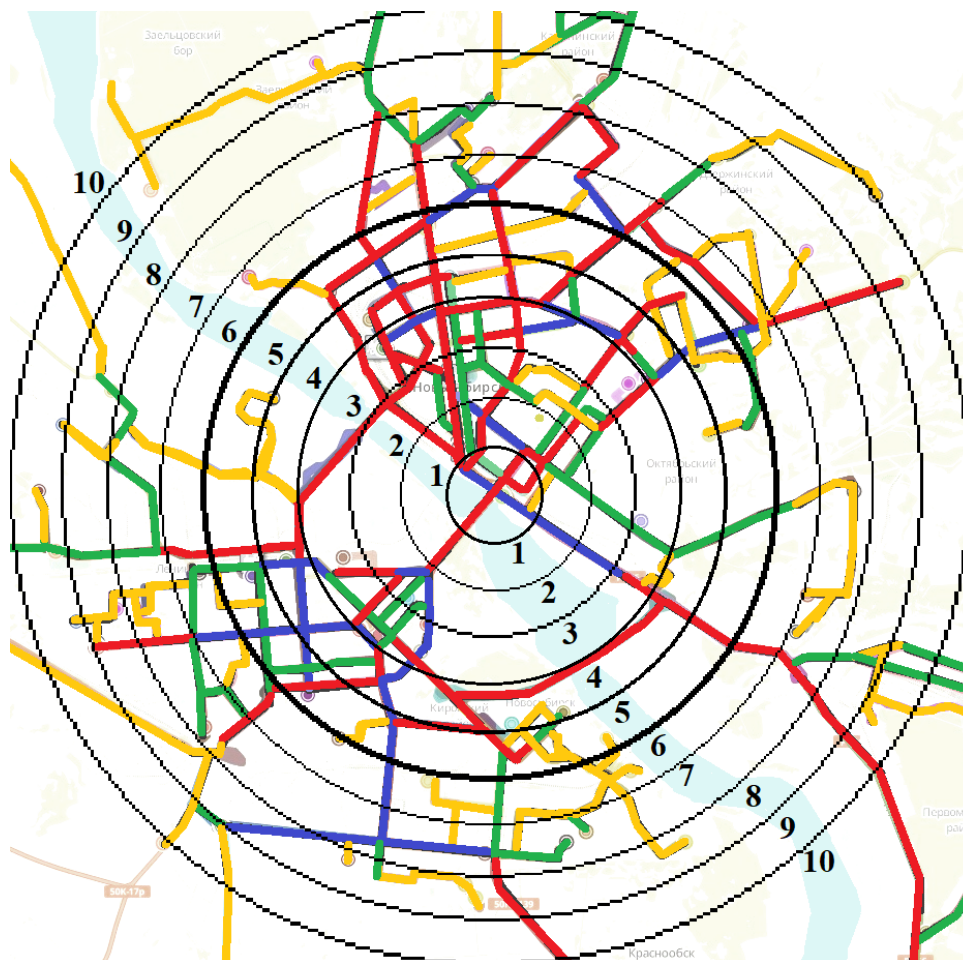


Рисунок 3 – Пример построения карты магистральной сети города с указанием количества полос для движения транспорта и делением его на отдельные километровые зоны
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Example of constructing a map of the city's backbone network, indicating the number of lanes for traffic and dividing it into separate kilometer zones
Source: compiled by the author.

После построения цветограмм транспортной сети с описанными на них километровыми окружностями были проведены оценочные расчеты протяженности улиц с 3 и более полосами в одном направлении (формула (3)), а также протяженности участков сети, на которых в часы пик наблюдаются заторы (формула (4)). С этой целью внутри каждой километровой зоны j выбирались участки сети с одинаковым количеством полос n , после чего производилось суммирование всей протяженности этих участков L_i^n , а также последующие деления их на общую протяженность сети L_C^j для каждой j -й километровой зоны.

$$D_j^3 = \frac{L_{cj}^3}{L_{cj}}, \quad (3)$$

$$D_j^{пер} = \frac{L_{cj}^{пер}}{L_{cj}}, \quad (4)$$

где L_{cj} – протяженность сети j -й километровой зоны города, км;

D_j^3 – доля сети с 3 и более полосами движения в одном направлении в j -й километровой зоне, %;

L_{cl}^3 – суммарная протяженность улиц с 3 и более полосами движения в одном направлении в j -й километровой зоне, км;

$D_j^{пер}$ – доля перегруженной сети в j -й километровой зоне, %;

$L_{cj}^{пер}$ – протяженность заторов в j -й километровой зоне, км.

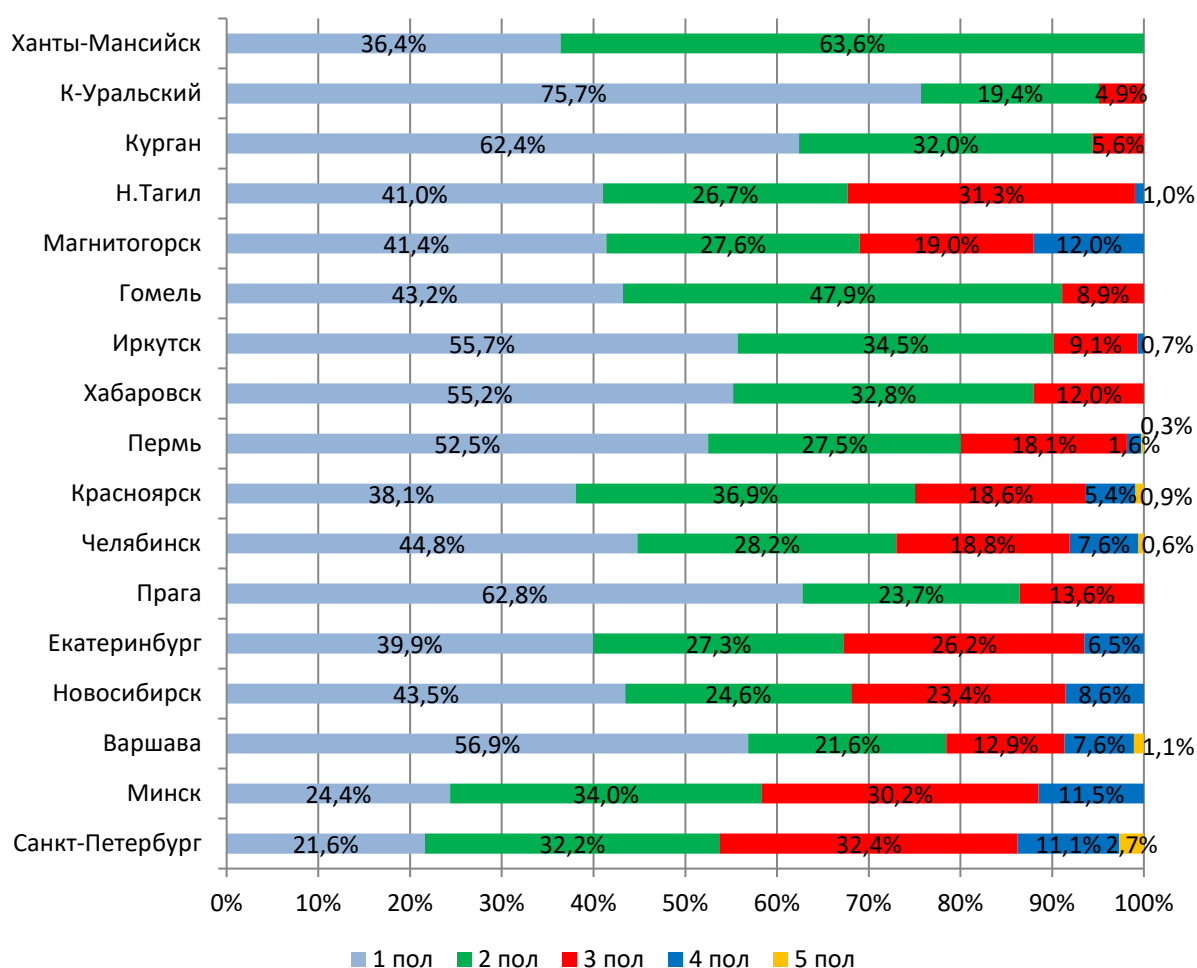


Рисунок 4 – Распределение магистральной улично-дорожной сети по количеству полос в одном направлении в городах различной крупности
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Distribution of the main street and road network by the number of lanes in one direction in different sized cities
Source: compiled by the author.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенных исследований автор рассмотрел показатели развития улично-дорожной сети 17 городов России и Восточной Европы с численностью населения от 100.000 тыс. до 5 млн жителей. На рисунке 4 представлены данные о распределении магистральной улично-дорожной сети города по количеству полос в одном направлении.

Автор данного исследования осознанно разделил улицы и дороги по количеству полос в одном направлении. В первую очередь это связано с наличием улиц с односторонним движением. Выделять полосы для движения пассажирского транспорта на таких улицах значительно проще. Кроме того, требования СП 396.1325800.2018 указывают на количество полос в одном направлении.

Из рисунка 4 видно, что распределение протяженности сети в части количества полос существенно отличается в разных городах России и Восточной Европы. В мегаполисах, к которым можно отнести Санкт-Петербург и другие города с численностью населения более 5 млн жителей, доля магистралей с одной полосой движения в одном направлении (двухполосная улица), значительно ниже, чем в малых и средних городах. В Санкт-Петербурге доля таких магистралей составляет всего 21,6%, в то время как в Каменск-Уральском их доля составляет 75,7 %.

Одновременно с этим видно, что в городе Каменске-Уральском (Свердловская область) с численность населения 160 тыс. жителей, а также в Кургане (Курганская область), население которого составляет 302 тыс. жителей, доля двухполосных улиц практически в 2 раза меньше, чем в Ханты-Мансийске, населения которого едва превышает 100 тыс. Данный факт объясняется различными периодами развития городов. Если развитие Кургана и Каменск-Уральского происходило в большей мере в советский период, особенно интенсивно с начала 50-х годов до конца 80-х годов XX столетия, то интенсивное развитие улично-дорожной сети Ханты-Мансийска началось в 90-е годы XX века.

Прага и Варшава являются крупнейшими городами Восточной Европы, с богатой историей развития улично-дорожной сети. Доля двухполосных улиц здесь составляет соответственно 62,8% и 56,9%, что в 1,5 раза выше, чем у городов России, соизмеримых по численности населения. Однако интенсивное развитие Праги и Варшавы пришлось на конец XIX – начало XX столетия, когда нормативные требования по строительству путей сообще-

ния ориентировались на движение гужевых повозок и пешеходов. Российские города начали интенсивно развиваться в 30-е годы XX века, а основной отпечаток наложила эпоха градостроительных новшеств, которая пришла на послевоенный период.

Как указывалось выше, наиболее эффективно организовывать отдельные полосы для движения пассажирского транспорта на магистралах с тремя и более полосами движения в одном направлении. Именно улицы такого размера позволяют минимизировать проблемы организации дорожного движения с точки зрения пропускной способности и безопасности движения. На рисунке 5 представлены данные о количестве таких магистралей в исследованных автором городах. На данном рисунке красным цветом показаны города России, голубым – Республики Белоруссия, а зеленым – города Восточной Европы.

Как видно из рисунка 5, исторические эпохи в значительной мере повлияли на долю улично-дорожной сети с 3 и более полосами движения в одном направлении. Так, в городе Праге, в которой сохранилось большое количество исторических зданий, доля улиц с тремя и более полосами движения составляет всего 13,5%. При этом в Екатеринбурге и Челябинске, население которых соизмеримо с Прагой, доля таких магистралей составляет соответственно 32,7% и 27% соответственно.

Аналогичную ситуацию можно наблюдать при сравнении улично-дорожной сети Минска и Варшавы. Города, соизмеримые по численности населения, значительно отличаются в протяженности многополосных улиц. В Минске этот показатель составляет 41,7%, в Варшаве только 21,5%

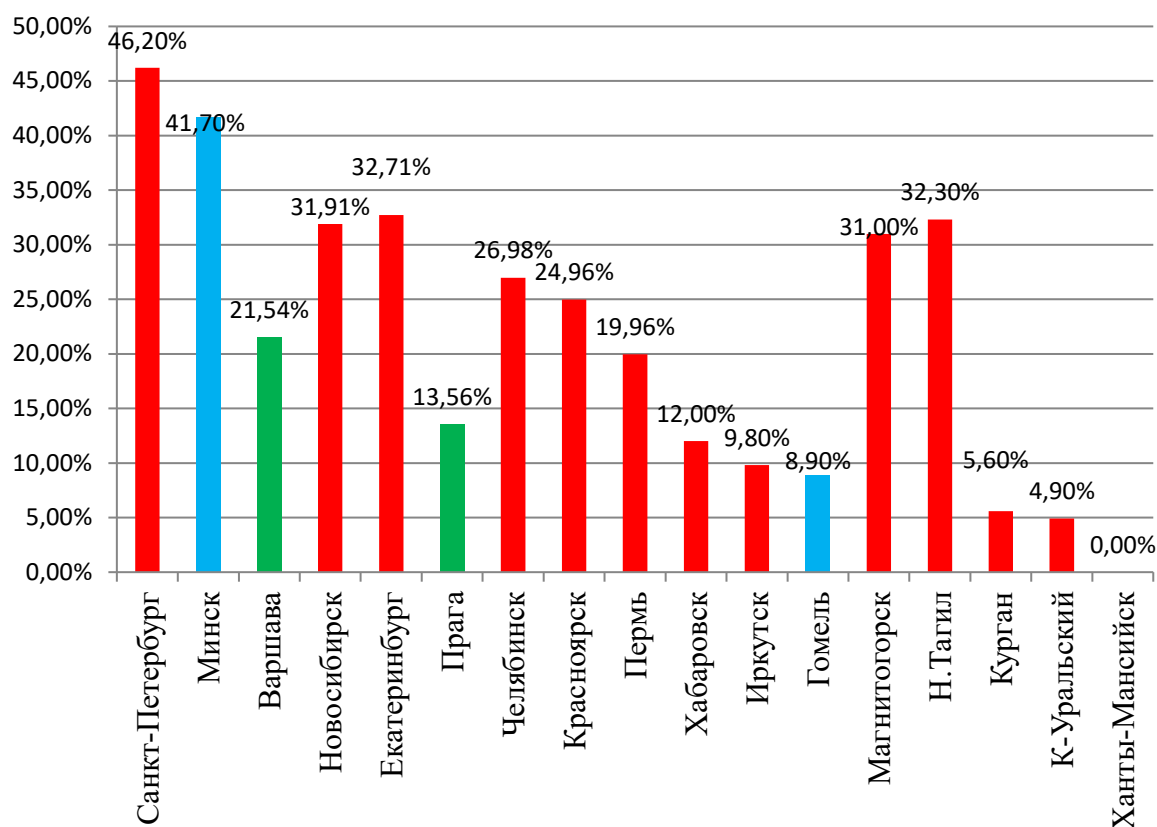


Рисунок 5 – Доля магистральных улиц и дорог с тремя и более полосами движения в одном направлении в городах с различной численностью населения
Источник: составлено автором.

Figure 5 – The proportion of main streets and roads with three or more lanes in one direction in cities with different populations
Source: compiled by the author.

Одновременно с этим видно, что в Магнитогорске и Нижнем Тагиле доля многополосных улиц значительно выше, чем в Гомеле, Хабаровске и Иркутске, численность населения, которых в 2 раза выше. Данный факт можно объяснить развитием трамвайного движения. Нижний Тагил и Магнитогорск в период своего интенсивного развития опирались на трамвайное движение, как на основной транспорт для перемещения трудящихся. В Хабаровске и Иркутске трамвай получил ограниченное развитие, а в Гомеле отсутствует вовсе. В то время как протяженность трамвайной сети Нижнего Тагила и Магнито-

горска позволяет организовывать движения во все районы данных городов. В аналогичном по численности населения Кургане трамваи никогда не эксплуатировались, что сказалось на доле многополосных улиц, здесь их всего 5,6 %.

Логично, что интенсивность движения транспорта достигает максимальных значений в центральной, исторической части города, где в большей мере целесообразно выделять полосы для движения пассажирского транспорта. На рисунке 6 представлены графики с указанием доли улиц с тремя и более полосами движения по километровым зонам.

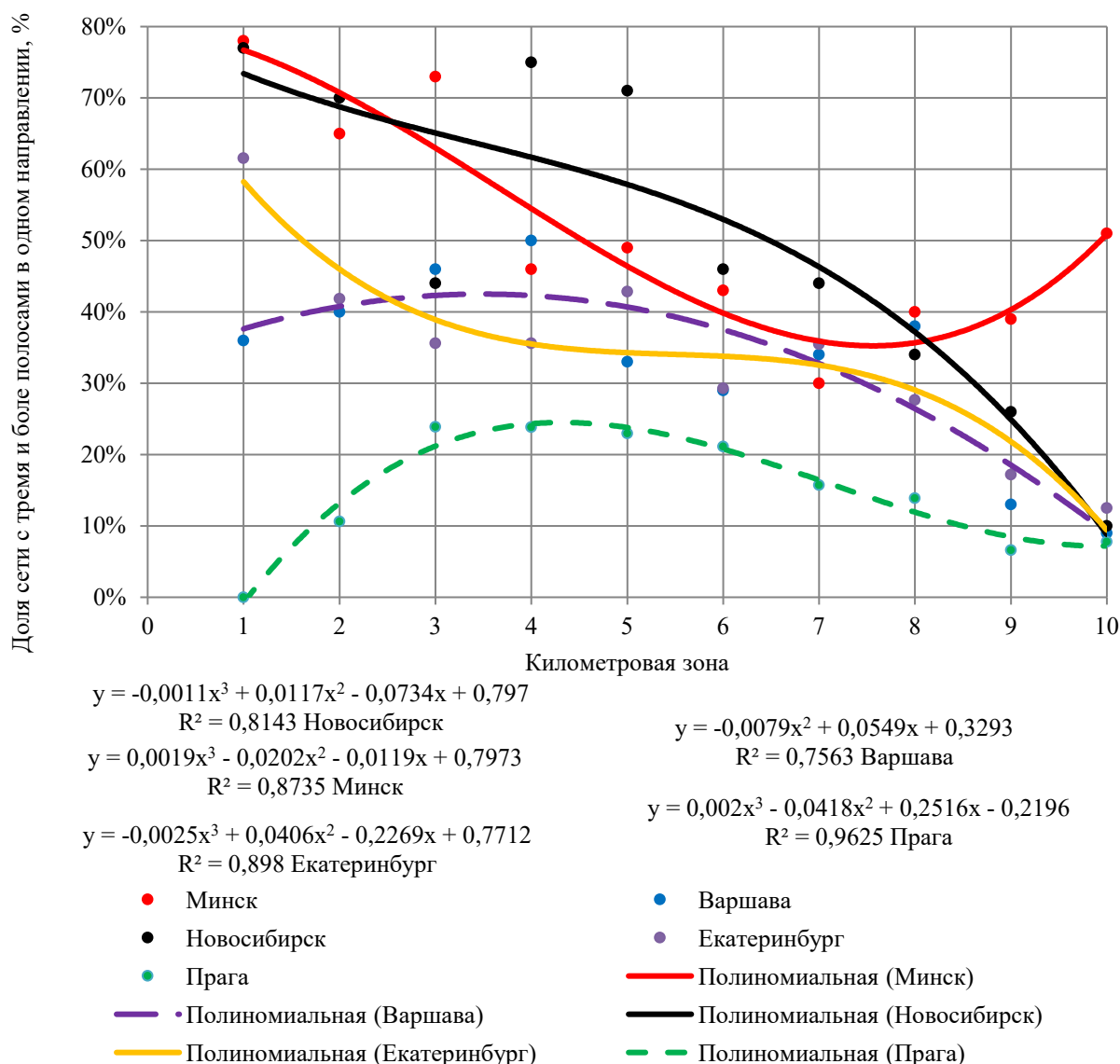


Рисунок 6 – Доля улиц с тремя и более полосами движения по километровым зонам в крупнейших городах России и Восточной Европы
Источник: составлено автором.

Figure 6 – The proportion of streets with three or more lanes by kilometer zones in the largest Russian and Eastern Europe cities
Source: compiled by the author.

Как видно из рисунка 6, в крупнейших городах России максимальная доля многополосных улиц сосредоточена в первой километровой зоне города. Так, в Новосибирске, 80% улиц первой километровой зоны имеют три и более полосы движения в одном направлении. Аналогичные показатели можно наблюдать в Минске.

По мере движения от центра к периферии доля многополосных улиц постепенно снижается. При этом процесс снижения во всех рассмотренных автором городах значительно отличается. В Новосибирске от центра города до 6-километровой зоны доля многополосных улиц не снижается ниже значения в 60%. После 6-го километра доля многополосных улиц

резко снижается и достигает 10% на периферии в 10-километровой зоне. В Минске, наоборот, доля многополосных улиц снижается с 1-й до 7-километровой зоны, до значения в 35%, после чего наблюдается небольшой рост до 50% в 10-километровой зоне.

Как указывалось ранее, процесс формирования улично-дорожной сети городов Восточной Европы начался значительно раньше, чем в городах России. Поэтому улицы, рассчитанные на гужевые повозки и пешеходное движение, значительно уже в красных линиях. Поэтому в центральной части Праги практически нет улиц с многополосным движением. В 1-й километровой зоне 0%, во 2-й зоне – 10%. В целом из рисунка 6 видно, что в Праге многополосных улиц мало не только в центральной части, но также в срединной зоне (3–5 км) и на периферии. Наибольшая доля многополосных улиц отмечается именно в срединной зоне с 3-го по 5-й километр – 24%.

Несколько больше улиц с многополосным движением отмечено в Варшаве. Однако в годы Великой Отечественной войны город серьезно пострадал от разрушений, что потребовало его реконструкции впоследствии. Одновременно с реконструкцией города были проведены существенные изменения в структуре улиц и в их ширине. Как видно из графика, в центральной и срединной частях Варшавы доля многополосных магистралей составляет всего 40%. В то же время на периферии доля многополосных улиц снижается до значения в 10%.

Данные исследования указывают на то, что в крупнейших городах России гораздо проще организовать системы выделенных полос для движения пассажирского транспорта в отличие от исторических городов Европы. Однако ряд улиц с небольшим количеством полос движения все же потребует реконструкции для организации на них, обособленных полос для движения пассажирского транспорта.

В целом процесс изменения доли улиц с тремя и более полосами движения по мере движения от центра к периферии можно описать полиномом третьего порядка.

Стоит уточнить, что доля перегруженных участков сети, на которых в часы пик наблюдаются заторы, также отличается в зависимости от территории города. Автор провел отдельные исследования по данному вопросу. Основной

причиной образования заторов на улично-дорожной сети города в часы пик можно считать не соответствие пропускной способности регулируемых и нерегулируемых пересечений, фактической интенсивности движения транспорта. При этом проблемы транспортных заторов усугубляются дорожно-транспортными происшествиями, припаркованными в неположенном месте автомобилями, а также погодными условиями, снижающими коэффициент сцепления шин с дорогой.

Для выявления мест образования заторов и их протяженности автор использовал натурный способ проезда улично-дорожной сети города с фиксацией проблемных участков. Подобные объезды автор совершал многократно, в течение нескольких лет.

Кроме того, для выявления мест образования заторов достаточно эффективно использовать информационные ресурсы, такие как «Яндекс. Пробки». Данный сервис позволяет более точно, с наименьшими затратами времени, оценивать пространственную скорость движения транспорта на всей улично-дорожной сети. Более подробно данный способ описан в работе [3].

Для оценки протяженности проблемных участков использовалась (формула (4)). Полученные значения в соответствии с данными исследованиями представлены на рисунке 7.

Кривые на рисунке 7 указывают на то, что в Екатеринбурге протяженность заторов в значительной мере превысила величину многополосных улиц. В центральной и срединной частях города доля перегруженной сети в 1,5–2 раза выше, чем процент улиц, где можно организовать отдельные полосы для пассажирского транспорта. Данный факт говорит о необходимости реконструкции ряда улиц в центральной части города, а также о введении административных ограничений, которые приведут к снижению объема использования личного транспорта.

В целом из рисунка 7 видно, что доля перегруженной сети города Екатеринбурга достигает максимального значения в центральной части города и постепенно снижается по мере движения в сторону окраин. Процесс снижения доли перегруженной сети достаточно корректно описывается полиномом второго порядка.

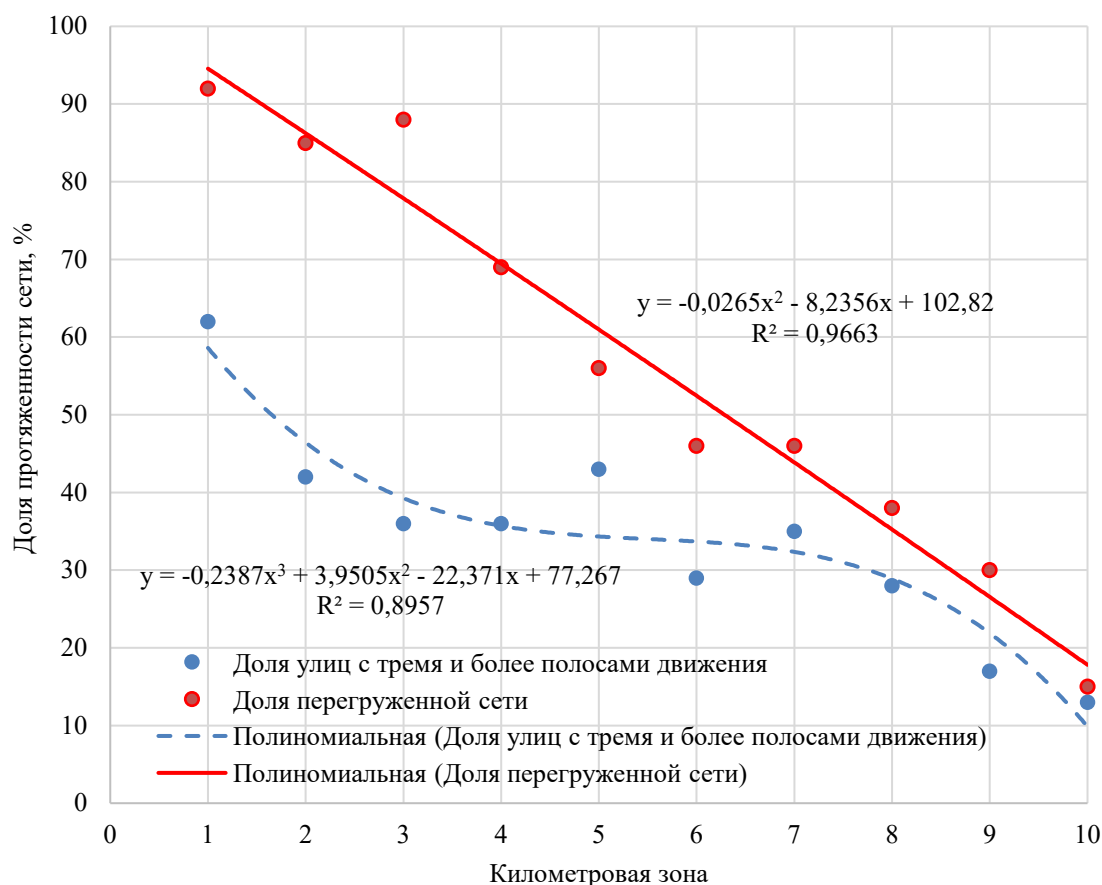


Рисунок 7 – Сравнение долей перегруженной сети и улиц с тремя и более полосами движения в одном направлении в г. Екатеринбурге
Источник: составлено автором.

Figure 7 – Comparison of the proportions of the congested network and streets with 3 or more lanes in one direction in Yekaterinburg city
Source: compiled by the author.

Одновременно с этим в городах с меньшей численностью населения, таких как Омск и Челябинск, доля проблемных участков значительно ниже, чем в Екатеринбурге. При этом протяженность заторов по отдельным зонам города несколько ниже, чем протяженность улиц, на которых можно организовать отдельные полосы для движения пассажирского транспорта.

Иными словами, уровень транспортных затруднений Челябинска и Омска таковы, что здесь еще можно решить его проблемы путем выделения отдельных полос для движения пассажирского транспорта, без проведения существенной реконструкции улично-дорожной сети.

Следует признать, что места, на которых в часы пик образуются заторы, могут не совпадать с участками сети, где существует возможность выделить отдельные полосы для движения городского пассажирского транспорта. В этом случае необходимо использовать организационные и планировочные мероприятия по увеличению пропускной способности. Сюда стоит отнести уширение проезжей части перед перекрестками, организацию одностороннего движения, увеличение длительности разрешающего такта светофора для направлений, по которым движется пассажирский транспорт. Также стоит отметить технологию сдерживания, когда на участках сети, где организованы полосы для движения пассажир-

ского транспорта, искусственно снижается пропускная способность для направлений, по которым двигаются автомобили. При этом на участках сети, где нет отдельных полос для общественного транспорта, наоборот, увеличивать пропускную способность, для исключения возможности образования заторов.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распределение улиц по количеству полос в одном направлении в значительной мере зависит от численности населения города, а также от исторического периода, в течение которого происходило освоение данной территории населенного пункта. Кроме того, на ширину улиц в красных линиях, а также количество полос, организованных на них, существенное влияние оказывает трамвайное движение.

Европейские города, основное развитие которых пришлось на XIX в., в большей мере были приспособлены для пешеходного и гужевого движения. Это привело к уменьшению ширины улиц в красных линиях и минимизации многополосных улиц. На ширину улиц существенное влияние могли оказывать военные действия, разрушительные действия которых требовали реконструкции города и увеличения числа полос для движения транспорта. Европейские города менее приспособлены для организации полос под движение пассажирского транспорта, чем российские, так как протяженность многополосных улиц в них значительно меньше.

Протяженность многополосных улиц, а также их доля от общей длины сети в значительной мере отличается по территории города. В крупнейших городах России и Белоруссии наибольшая доля многополосных улиц отмечается в центральной его части и достигает значения в 60–80%. По мере движения от центра к периферии доля многополосных улиц заметно снижается и достигает значения в 10–15%.

Протяженность заторов, которые оказывают существенное влияние на скорость сообщения пассажирского транспорта, также отличается территориально. Наибольшая протяженность заторов наблюдается в центральной части города, однако по мере движения к периферии их доля заметно снижается. Во многих крупных и крупнейших городах России протяженность заторов несколько меньше, чем протяженность улиц, где существует возможность организовать специальные полосы для движения пассажирского транспорта. В таких городах достаточно выделить систему полос для улучшения условий движения пас-

сажирского транспорта. Вместе с этим в таких городах, как Екатеринбург, протяженность заторов в 1,5–2 раза превышает длину улиц с многополосным движением. Здесь выделения полос для улучшения движения пассажирского транспорта явно недостаточно. Поэтому в городах с подобными транспортными проблемами необходимо применение административных мероприятий, снижающих объем движения личного транспорта. К ним относятся: введение платных парковок, запрет остановок и стоянок, платный въезд в центральную зону, ограничение въезда в определенные районы города транспорта с высокими экологическими выбросами.

Улично-дорожная сеть городов России, в части их планировочного развития, а именно протяженности улиц с многополосным движением, позволяет без существенных финансовых вложений создать систему выделенных полос для движения пассажирского транспорта. Увеличение скорости сообщения общественного транспорта, с одной стороны, делает его более привлекательным по сравнению с индивидуальным транспортом, а с другой – увеличит объем перевозки пассажиров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Филлипова Н.М., Бояршинова А.Л., Филлипов Д.В. Проблема роста интенсивности движения в городе Якутске и пути их решения // Грузовик. 2025. № 2. С. 51–55. DOI: <https://doi.org/10.36652/1684-1298-2025-2-51-55>
2. Корнев А.В., Шабуров С.С. Транспортные заторы. Варианты решения проблемы // Молодежный вестник ИрГТУ. 2021. № 1(11). С. 58–63. EDN: PJVUKF
3. Неволин Д.Г., Цариков А.А. Использование информационных технологий для исследования пространственной скорости сообщения транспорта в крупнейших городах России // Мир транспорта и технологических машин. 2023. № 4–2(83). С. 44–52. DOI: [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-4-2\(83\)-44-52](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-4-2(83)-44-52)
4. Барина Л.Д., Забалканская Л.Э. Негативные последствия транспортной деятельности в мегаполисе // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2017. № 5-1. С. 32–35. EDN: YKOIBR.
5. Неволин Д.Г., Цариков А.А., Бондаренко В.Г. Организация маршрутов городского пассажирского транспорта с учетом парка на альтернативном топливе // Транспорт на альтернативном топливе. 2022. № 6(90). С. 56–63. EDN: ZOJNUQ.
6. Shoup D. The High Cost of Free Parking, American Planning Association, Chicago, Illinois. 2005.
7. Kodransky M., & Hermann G. Europe's Parking U-Turn: From Accommodation to Regulation.

New York: Institute for Transportation and Development Policy. 2011. https://www.academia.edu/1877803/Europes_Parking_U_turn_From_Accommodation_to_Regulation

8. Литвинов А.В., Донченко В.В. Взаимосвязь между уровнем автомобилизации населения и долей передвижений на легковых автомобилях в городах // *International Journal of Advanced Studies*. 2020. № 3(10). С. 64–82. DOI: <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2020-3-64-82>.

9. Печатнова Е.В., Кузнецов В.Н. Анализ особенностей успешных зарубежных стратегий по повышению безопасности дорожного движения // *Вестник Прикамского социального института*. 2019. № 3 (84). С. 57–61. EDN: KGGXJR

10. Базаров Б.И., Эрнзаров А.А., Одилов Нурмухаммад Э.У. Рациональное управление пассажиропотоком на городском автомобильном транспорте // *Транспорт: Наука, техника, управление. Научный информационный сборник*. 2024. № 2. С. 51–56. DOI: <https://doi.org/10.36535/0236-1914-2024-02-7>

11. Горев А.Э. К вопросу об экономической эффективности городского пассажирского транспорта // *Транспорт Российской Федерации*. 2012. № 3-4 (40-41). С. 34–36. EDN:PBZHVP

12. Gorev A., Solodkij A. System Approach to Elimination of Traffic Jams in Large Cities in Russia. *World Applied Sciences Journal* 23 (8): 2013: p.1112–1117. EDN: RFJZIZ

13. Grise E., Stewart A.F., El-Geneidy A. Planning a high-frequency transfer-based bus network: How do we get there? // *Journal of Transport and Land Use*. 2021. Vol. 14, No. 1. P. 863–884. DOI: <https://doi.org/10.5198/jtlu.2021.1742>

14. Daganzo C.F. Structure of competitive transit networks // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2010. Vol. 44, No. 4. P. 434–436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.11.001>

15. Balket S.F., Asmael N.M. Selecting the best route location for bus rapid transit using geographic information system (GIS). Kut city is a case study // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1895. P. 012029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1895/1/012029>

16. Pechkurov I., Plotnikov D., Gorev A. [et al.] Development of a Method for Selecting Bus Rapid Transit Corridors Based on the Economically Viable Passenger Flow Criterion // *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 3. P. 2391. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15032391>

17. Alpkokin P., Ergun M. Istanbul Metrobüs: first intercontinental bus rapid transit // *Journal of transport geography*. 2012. № 24. P. 58–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.05.009>

18. Sevim İ., Takice-Moğulkoç H., Güray M. scheduling the vehicles of bus rapid transit systems: a case study // *Intl. Trans. in Op. Res.* 2022. № 29. P. 347–371. DOI: <https://doi.org/10.1111/itor.12763>

19. Неволин Д.Г., Цариков А.А., Бондаренко В.Г. Основные направления развития скоростного пассажирского транспорта в крупных и круп-

нейших городах России // *Транспорт Урала*. 2023. №1(76). С. 59–64.

20. Коновалова Т.В., Надирян С.Л., Котенкова И.Н., Сенин И.С. Методика обеспечения приоритетных условий движения городского пассажирского транспорта // *Мир транспорта*. 2024. Т.22, №2(111). С. 70–80. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-2-7>

21. Колганов С.В., Сафронов Р.Н. Имитационная модель оценки целесообразности введения выделенных полос для движения общественного пассажирского транспорта // *Транспортные системы*. 2023. № 3 (29). С. 12–17. DOI: https://doi.org/10.46960/2782-5477_2023_3_12

22. Сырцов Д.Н., Вартанян А.А. Создание универсального алгоритма принятия решения о целесообразности организации выделенной полосы для наземного городского пассажирского транспорта на базе подразделений ЦОДД // *Теория и практика общественного развития*. 2024. № 11. С. 200–207. DOI: <https://doi.org/10.24158/tipor.2024.11.23>

23. Далецкая А.В., Колганов С.В. Оценка целесообразности введения на улично-дорожной сети приоритетного движения общественного транспорта // *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. 2023. № 3 (29). С. 4–11. DOI: https://doi.org/10.46960/2782-5477_2023_3_4

24. Цариков А.А., Обухова Н.А. Пространственная неравномерность развития и загрузки улично-дорожной сети городов Свердловской области // *Современные проблемы транспортного комплекса России*. 2016. № 2(6). С. 4–7. DOI: <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2016-6-2-4-7>

25. Неволин Д.Г., Цариков А.А., Бондаренко В.Г. Градостроительные особенности проектирования сетей скоростного пассажирского транспорта в крупнейших городах России // *Транспорт Российской Федерации*. 2022. № 4–5 (101-102). С. 55–59.

REFERENCES

1. Filippova N.M., Boyarshinov A.L., Filippov D.V. Problems of traffic intensity growing in Yakutsk city and ways of their solution. *Trukc*. 2025; 2: 51–55. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.36652/1684-1298-2025-2-51-55>

2. Kornev A.V., Shaburov S.S. Traffic congestion. options for solving the problem. *Molodezhnyj vestnik IrGTU*. 2021; 1(11): 58–63. (in Russ.) EDN: PJVUKF

3. Nevolin D.G., Tsarikov A.A. The use of information technologies to study the spatial speed of transport communication in the largest cities of Russia *World of transport and technological machines* 2023; 4–2(83): 44–52. DOI: [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-4-2\(83\)-44-52](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-4-2(83)-44-52).

4. Barinova L.D., Zabalkanskaja L.Je. Negative impacts of transportation activities in a metropolitan area. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2017; 5-1: 32–35. (in Russ.) EDN: YKOIBR.

5. Nevolin D.G. Tsarikov A.A., Bondarenko V.G. Organization of urban passenger transport routes,

taking into account the use of rolling stock running on alternative fuels. *Transport na alternativnom toplive*. 2022; № 6 (90): 56–63. (in Russ.) EDN: ZOJNUQ.

6. Shoup D. The High Cost of Free Parking, American Planning Association, Chicago, Illinois. 2005.

7. Kodransky M., & Hermann G. Europe's Parking U-Turn: From Accommodation to Regulation. New York: Institute for Transportation and Development Policy. 2011. Available at: https://www.academia.edu/1877803/Europes_Parking_U_turn_From_Accommodation_to_Regulation

8. Litvinov A.V., Donchenko V.V. The relationship between car ownership and share of trips on passenger cars in cities. *International Journal of Advanced Studies*. 2020; 3(10):64–82. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2020-3-64-82>.

9. Pechatnova E.V., Kuznecov V.N. Analysis of features of successful foreign strategies to increase road safety. *Vestnik Priamurskogo social'nogo instituta*. 2019; 3 (84): 57–61. (in Russ.) EDN: KGGXJR

10. Bazarov B., Ernazarov A.A., Nurmuxammad Odilov E. Rational management of passenger traffic in urban road transport. *Transport: Nauka, tekhnika, upravlenie*. 2024; 2: 51–56. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.36535/0236-1914-2024-02-7>

11. Gorev A.E. On the issue of economic efficiency of urban public transport. *Transport of the Russian Federation*. 2012; 3-4 (40-41): 34–36. (in Russ.) EDN: PBZHPV

12. Gorev A., Solodkij A. System Approach to Elimination of Traffic Jams in Large Cities in Russia. *World Applied Sciences Journal* 23 (8): 2013: r.1112–1117. EDN: RFJZIZ

13. Grise E., Stewart A.F., El-Geneidy A. Planning a high-frequency transfer-based bus network: How do we get there? *Journal of Transport and Land Use*. 2021; Vol. 14, No. 1: 863–884. DOI: <https://doi.org/10.5198/jtlu.2021.1742>

14. Daganzo C.F. Structure of competitive transit networks. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2010; Vol. 44, No. 4: 434–436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.11.001>

15. Balket S.F., Asmael N.M. Selecting the best route location for bus rapid transit using geographic information system (GIS). Kut city is a case study. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; Vol. 1895: 012029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1895/1/012029>

16. Pechkurov I., Plotnikov D., Gorev A. [et al.] Development of a Method for Selecting Bus Rapid Transit Corridors Based on the Economically Viable Passenger Flow Criterion. *Sustainability*. 2023; Vol. 15, No. 3: 2391. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15032391>

17. Alpkokin P., Ergun M. Istanbul Metrobüs: first intercontinental bus rapid transit. *Journal of transport geography*. 2012; 24: 58–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.05.009>

18. Sevim İ., Takice-Moğulkoç H., Güray M. scheduling the vehicles of bus rapid transit systems: a case study. *Intl. Trans. in Op. Res.* 2022; 29: 371. DOI: <https://doi.org/10.1111/itor.12763>

19. Nevolin D.G., Tsarikov A.A., Bondarenko V.G. Main directions of development of high-speed passenger transport in large and largest Russian cities. *Transport of the Urals*. 2023; 1(76): 59–64. (in Russ.)

20. Konovalova T.V., Nadiryan S.L., Kotenkova I.N., Senin I.S. Methodology for Providing Priority to Urban Passenger Transport Traffic. *World of Transport and Transportation*. 2024; 22(2): 70–80. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-2-7>

21. Kolganov S.V., Safronov R.N. Simulation model for assessing the feasibility of introducing dedicated lanes for public passenger transportation. *Transportnye sistemy*. 2023;3 (29): 12–17. DOI: https://doi.org/10.46960/2782-5477_2023_3_12

22. Syrtsov, D.N. & Vartanyan, A.A. Creation of a Universal Decision-Making Algorithm for the Viability of Dedicated Lanes for Ground Urban Public Transport Based on the Divisions of the Center for Traffic Organization and Road Safety. *Theory and Practice of Social Development*. 2024; (11): 200–207. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24158/tipor.2024.11.23>

23. Daleckaja A.V., Kolganov S.V. Assessing the feasibility of introducing priority public transport on the street and road network. *Bulletin of Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)*. 2023; 3 (29): 4–11. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.46960/2782-5477_2023_3_4.

24. Tsarikov A.A., Obukhova N.A. Spatial Uneven Development of the Street and Road Network Utilization in Cities of the Sverdlovsk Region. *Modern Problems of Russian Transport Complex*. 2016; 2(6): 4–7. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18503/2222-9396-2016-6-2-4-7>

25. Nevolin D.G., Tsarikov A.A., Bondarenko V.G. Urban planning peculiarities of designing high-speed passenger transportation networks in the largest Russian cities. *Transport of the Russian Federation*. 2022; 4-5 (101–102): 55–59. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Цариков Алексей Алексеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей» Уральского государственного университета путей сообщения (620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5314-8602>,

SPIN-код: 8792-1771,

e-mail: Zarikof@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Tsarikov Aleksey A. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, "Design and Operation of Automobiles" Department, Ural State University of Railway Transport (66, Kolmogorova street, Yekaterinburg, 620034).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5314-8602>,

SPIN-code: 8792-1771,

e-mail: Zarikof@mail.ru

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Научная статья
УДК 624.05
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-282-295>
EDN: HNQBQI



ОЦЕНКА ПРЕИМУЩЕСТВ И ПРЕПЯТСТВИЙ ВНЕДРЕНИЯ BIM ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ (SFM) В ИРАКЕ

Аль-джабери Каррар Аббас Олейви¹ ✉, Эльшейх Ассер Мохамед¹,
Аминов Амирхон Фаррухович²

¹Российский университет дружбы народов им. П. Лумумбы,
г. Москва, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия
✉ ответственный автор
karrarabbas095@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Информационное моделирование зданий (BuildingInformationModeling, BIM) представляет собой ключевую устойчивую практику, которую недавно начала осваивать строительная отрасль Ирака. Несмотря на значительное внимание к преимуществам и препятствиям внедрения BIM в архитектурно-строительной отрасли (АЕС), вопросы применения этой технологии в устойчивом управлении объектами (SFM) остаются недостаточно изученными. Цель исследования – изучить факторы, влияющие на внедрение BIM для устойчивого управления объектами (SFM) в строительной отрасли Ирака.

Материалы и методы. Для определения множества факторов, способствующих преимуществам и препятствиям применения BIM для SFM, был проведен детальный обзор разнообразных исследований. В исследовании был использован опросник, в котором приняли участие 119 иракских специалистов в области строительной инженерии. Для ранжирования преимуществ и препятствий применялся индекс относительной важности (RII). Кроме того, для определения пяти наиболее значимых препятствий использовались статистические методы.

Результаты. В результате проведенного исследования были выявлены ключевые преимущества и препятствия внедрения технологии BIM в устойчивое управление объектами (SFM) в строительной отрасли Ирака. К основным преимуществам относятся упрощенный доступ к информации и документации, создание централизованной системы для управления техническим обслуживанием объектов и сокращение материальных отходов в период эксплуатации проекта. Среди значимых препятствий выделяются отсутствие кооперативной рабочей среды, сопротивление переходу от традиционных методов эксплуатации и недостаточная поддержка экологически ориентированных подходов со стороны высшего руководства.

Обсуждение и заключения. Эти результаты подтверждают необходимость разработки стратегий для преодоления препятствий и повышения эффективности внедрения BIM в SFM. Исследование предлагает рекомендации для развивающихся стран по оптимизации устойчивого управления объектами (SFM) через внедрение BIM, акцентируя внимание на факторах, способствующих его адаптации и улучшению управления объектами с использованием преимуществ технологии BIM.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: информационное моделирование зданий (BIM), строительная отрасль, устойчивое управление объектами, SFM, преимущества BIM, недостатки BIM, Ираке

Статья поступила в редакцию 05.01.2025; одобрена после рецензирования 15.04.2025; принята к публикации 17.04.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Аль-джабери Каррар Аббас Олейви, Эльшейх Ассер Мохамед, Аминов Амирхон Фаррухович Оценка преимуществ и препятствий внедрения BIM для устойчивого управления объектами (SFM) в Ираке // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 2. С. 282-295. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-282-295>

© Аль-джабери Каррар Аббас Олейви, Эльшейх Ассер Мохамед, Аминов Амирхон Фаррухович, 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-282-295>

EDN: HNQBQI

MEASURING ADVANTAGES AND CHALLENGES OF ADOPTING BIM FOR SUSTAINABLE FACILITY MANAGEMENT IN IRAQ

Al-jaberi Karrar Abbas Oleiwi¹ ✉, Elsheikh Asser Mohamed¹,
Aminov Amirkhon Farrukhovich²

¹Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba,
Moscow, Russia

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

✉ corresponding author
karrarabbas095@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. BIM (Building Information Modeling) is one of the important examples of sustainable practices that the construction industry in Iraq has recently adopted. Many studies in recent years have discussed advantages and problems of BIM in architectural and construction (AEC) industry. However, there is a limitation in these studies in terms of finding out the advantages and challenges of BIM in sustainable facility management. The research aims to investigate the factors influencing the implementation of BIM for sustainable facility management (SFM) in Iraq's construction sector.

Materials and methods. A thorough review of a variety of research was done to determine the numerous factors that contribute to the advantages and obstacles in BIM for SFM. A questionnaire has been used to interview 119 Iraqi specialists in construction engineering. The relative importance index (RII) was used to rank the advantages and obstacles. Furthermore, the research employed statistical techniques to determine the five most important obstacles.

Results. Three key advantages of adopting BIM in SFM have been identified, particularly, facilitating access to the relevant information, ensuring accurate documentation, supplying a centralized and coherent system for managing construction maintenance, reducing material wastes during the project operation period. Besides, the following three most common obstacles have been distinguished: absence of a cooperative workplace environment, resistance of FM stakeholders to leave its traditional approach of operation, and insufficient support and attention of senior management to environmentally friendly methods.

Discussion and conclusion. The results obtained have demonstrated the need for strategies addressing the challenges and improving efficiency of BIM in SFM. The research provides stakeholders in developing countries with guidance to effectively SFM by promoting the factors that propel BIM adoption and improving facility management by leveraging BIM technology advantages.

KEYWORDS: building information modelling (BIM), construction industry, sustainable facility management, SFM, BIM advantages, BIM obstacles, Iraq

The article was submitted: January 5, 2025; **approved after reviewing:** April 15, 2025; **accepted for publication:** April 17, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Al-jaberi Karrar Abbas Oleiwi, Elsheikh Asser Mohamed, Aminov Amirkhon Farrukhovich Measuring advantages and challenges of adopting BIM for sustainable facility management in Iraq. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (2): 282-295. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-282-295>

© Al-jaberi Karrar Abbas Oleiwi, Elsheikh Asser Mohamed, Aminov Amirkhon Farrukhovich, 2025



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

INTRODUCTION

By 2030, the architectural, engineering, and construction (AEC) sector is expected to contribute a substantial 15% of the global gross domestic product (GDP) [1], when the world's population is predicted to reach over 8.5 billion people [2]. City development is a significant relevance to the building sector. The building industry's materials serve as fundamental resources for society as well as various sectors of the economy by constructing necessary infrastructure and the external environment [3]. It is therefore anticipated that the effects on the economy will be greater than the direct contribution to GDP. In Europe, the construction sector is accountable for 40% of carbon dioxide emissions, 37% of energy usage, and 40% of waste production. The operation stage, which lasts the longest in a construction's lifetime, is when these issues mainly arise. With an operational life of 30 to 50 years, the operating stage accounts for 80 percent of the total cost and lasts approximately 5 to 7 times more than the design and building stages [4]. Providing high-quality services, optimizing costs, and reducing energy use and emissions of greenhouse gases all depend on efficient management of the operation and maintenance stage. Facility managers must use innovation in the management system to meet these criteria. The modern era has seen significant changes in the construction industry, and a lot of study is being done to increase excellence and productivity through applying new tools, techniques, and execution strategies into practice [5]. Building information modeling (BIM) is a novel approach that shows promise for the Architecture Engineering and Construction (AEC) sector which aims to efficiently design, build, and manage constructions in order to achieve the sector's long-standing quality objective [6]. Despite being around for a while, BIM has recently gained a lot of interest, as seen by the growing trend of its application in construction projects [7, 8]. The use of BIM to lower construction costs and speed up project delivery is a noteworthy example of a policy approach meant to achieve these objectives, as evidenced by the US and UK government's construction initiatives. It has been noted that several countries, such as the United States and Finland, require AEC businesses to provide BIM, or Industry Foundation Class (IFC) papers when they are carrying out government infrastructure projects [9]. BIM application in Iraq is still in its primitive stage and lacks legislative measures intended for its application in the building industry [10]. Furthermore, there is a lack of comprehensive research in Iraq related to BIM projects

involving sustainable facility management (SFM).

Sustainability practices are essential for organizations as they have a massive influence on organizational success. According to [11,12], sustainability practice at the organizational level is about simultaneously meeting social and environmental requirements while also increasing the profitability of the company and seeking ethical business procedures as well as It also involves creating jobs that are sustainable and adding value for all stakeholders. In general, when an organization uses green, environmentally friendly, or sustainable resources, it is putting the sustainability concept into effect. In order to reduce the negative impacts on the environment, participants engaged in the development and management of constructions, particularly organizations, sprang into action to develop and operate structures in an environmentally friendly way. The purpose of facility management (FM) is to preserve the performance, comfort, safety, and functioning of a built environment while it is in use [13, 14]. The goal of SFM, is to decrease the adverse effects that buildings have on both the environment and its residents [15]. These methods are becoming more widely recognized as successful ways to promote the growth of the building industry [16]. Due to its dependence on modern technology and effective construction processes, BIM has been widely acknowledged as a promising avenue for offering significant benefits to the AEC sector [17]. Planning, designing, constructing, and managing buildings and infrastructure can be done more successfully with the use of building information modeling (BIM) tools [18]. A 3D digital representation of interior and exterior construction envelopes, together with mechanical, electrical, and plumbing components, are frequently included in models. According to Ahmad and Thaeem [19], collaboration is crucial to using BIM as a useful technique for the creation of sustainable systems and increasing the number of applications for sustainable building. BIM can provide major benefits to all project stakeholders by providing substantial resources over the sustainable building process [20]. Furthermore, at the project operation phase, BIM may produce and modify data on energy use and offer an effective information workflow [21]. Building Information Modeling (BIM) has promise in creating a structure for information exchange that encourages cooperation amongst many parties involved in the sustainable building process. This makes it easier for data to be exchanged, processed, and transformed within the BIM system, which in effect creates an optimal atmosphere for these kinds of activity [22].

Iraq's construction industry is among the largest in the Middle East, and there are numerous development projects in progress. As stated in "Iraq vision for Sustainable Development 2030," the country is dedicated to achieving its developmental goals. Although the sources that are provided do not specifically reference budgetary amounts, the vision highlights quantifiable objectives and important concerns including environmental sustainability, education, and a diverse economy. Thus, it is an appropriate time for the AEC sector in Iraq to adopt BIM in order to contribute to the global trend towards sustainable development that has been witnessed in countries like the US, the UK, and Finland. Even though there have only been a few studies on the topic, a thorough analysis of the literature shows that Iraq has not yet completely benefited from BIM's potential advantages for SFM [10, 23, 24]. It is unknown, though, what advantages and disadvantages there may be to using BIM in SFM. The aim of this research is to provide the basis for future investigations into Building Information Modeling (BIM) in Iraq by identifying possible research topics, gaps in the literature, and advantages and disadvantages of using BIM for SFM. In order to ascertain the advantages, challenges, and potential for BIM implementation in SFM, a questionnaire survey was carried out.

LITERATURE REVIEW

BIM Technology and Its Application

BIM has been in use in the architectural, engineering, and construction (AEC) industry for more than 20 years, and it is represented as a technical and practical revolution [25]. By processing CAD drawings, IT disrupts the method in which plans are produced in the building industry while saving a significant amount of time and accuracy. Datta et al. [26] demonstrate that BIM is a comprehensive technology that combines, expands, and cooperatively distributes all process and product data across the project stakeholders.

Nowadays, stakeholders are attempting to maximize the operational effectiveness of ongoing building activities for the purpose of guaranteeing the successful completion of construction tasks of the highest caliber. Many modern building projects are using BIM technology, according to current trends [27]. The discussion on BIM deployment is mostly focused on using technology to enable collaboration between various project stakeholders. Some academics have proposed that BIM tools provide a basis for bringing about a change in data management in the AEC industry [28]. On the other hand, others contended that ef-

fective BIM use requires technological upgrading in order to comply with the complex operational procedures of building assignments [29, 30, 31]. furthermore, the implementation of BIM technology, the design and construction stages are getting more academic attention nowadays. Emphasis has been placed on the immediate, observable results from the very beginning of the construction process, regardless of long-term advantages [32, 33, 34, 35, 36]. The most common application of BIM has been seen in the early stages, based on adoption levels; however, adoption and use for FM are still relatively new [37, 38], especially when considering the advantages, it offers organizations (as compared to projects). Furthermore, in light of the differences between the management of public funds and private organizations, the adoption of BIM offers an advantage that is significantly various from that of private organizations. As a result, there are several differences in BIM deployment, including training scalability. Stated differently, how can training be implemented at such an enormous scale, and who gets trained first—hospitals, educational institutions, or other public infrastructure—if the public sector is to supply it? These discrepancies support the need for additional research.

Advantages and Obstacles of BIM for FM

These days, the majority of contracts demand the delivery of printed documents that include inventories of equipment, product information sheets, guarantees, lists of replacement components, schedules for preventative maintenance, etc. Property owners and building managers need this information to assist their facility management. Currently, information is delivered to the operation and maintenance stage manually by traditional methods. Most of the time, the information delivered is insufficient and inaccurate [39]. One of the key goals of utilizing BIM in FM is delivery efficiency [40]. BIM data gathered throughout the construction process will lower the cost and time needed to gather and construct FM systems, considering the present interoperability issues [41, 42]. It is not necessary to duplicate data on assets when suppliers' information may be captured within 3D parametric objects [43]. BIM is thought to be a facilitator for enhancing data dependability and quality, which will lead to as more people become accustomed to working in a BIM environment, it will boost worker productivity and enhance data quality [41]. Additionally, it has been suggested that the use of BIM in FM will make it easier for facility managers to participate in the future from a very early design phase as well as a 6D BIM allows to monitor the condition of the building in real time [44, 45]. It is expected

that the application of BIM in FM will offer methods for managing building process information that can be utilized in subsequent designs [46]. BIM technology and related tools, like as laser scanning, should decrease the cost and improve the accuracy and dependability of information produced for renovation construction [47].

Understanding the value of information in BIM and developing a successful BIM-FM framework, the first obstacle is managing the quality of data entry, particularly for existing structures that did not use BIM throughout the design and construction stages [48]. According to Khemlani, these data are frequently erroneous or nonexistent because the model is not an exact representation of the facility as it was constructed because it has not been updated with any architectural changes made during the design phase [49]. Another significant obstacle facing the FM sector is the cultural attitude to the adoption of novel methods and technologies. The facilities management sector is quite conservative when it comes to new technology; therefore, until the advantages of BIM for facilities management are effectively proven, its adoption rate will stay low [50]. The absence of BIM expertise and knowledge among facilities management specialists leads to the lack of client awareness [46]. Thus, these two elements work in concert to generate a vicious cycle that hinders the use of BIM in FM implementations. As BIM for FM purposes demands ongoing maintenance to

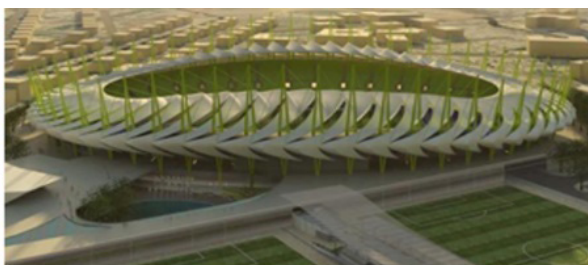
maintain value for the construction and its owners, this is actually a highly serious challenge [50]. The majority of contract documents still need paper copies of product data sheets, guarantees, lists of replacement components, equipment inventories, preventative maintenance plans, and other paperwork. This frequently results in data that is hard to acquire and use in order to improve FM efficiencies.

Implementing BIM for FM in Iraq and Developing Countries

The operation and maintenance stage of projects is the longest stage in the construction life span [51]. According to Beddier and Imbault, it makes up 74% of the whole cost, which includes power, renewal, and maintenance [52]. One of the building and real estate industries with the quickest growth is FM [53, 54]. A significant concern for both economic and environmental considerations is the requirement for effective management of buildings during the operation stage. Furthermore, a number of governments (such as those in the USA, and UK) have emphasized the necessity of revolutionizing the FM industry by accelerating the incorporation of digital technology [54, 55]. BIM technology has been applied in Iraq for more than twenty years, and was successfully incorporated into a number of large-scale projects, including Al Mina Stadium [56], Najaf Hospital [57], Karbala International Airport Project [10] and Central Bank of Iraq- CBI [58].



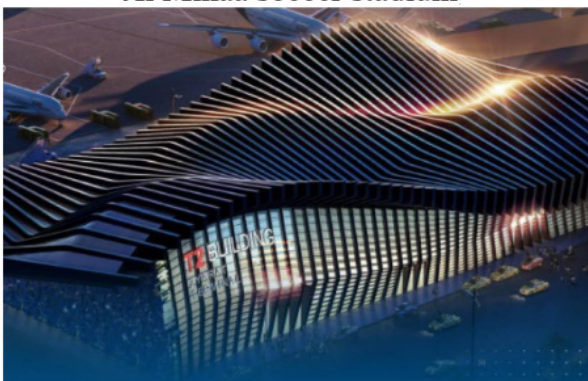
Al-Najaf Hospital



Al Minaa soccer stadium



Central Bank of Iraq



Karbala International Airport

Figure 1 – Large construction projects in Iraq based on BIM [10, 56, 57, 58]

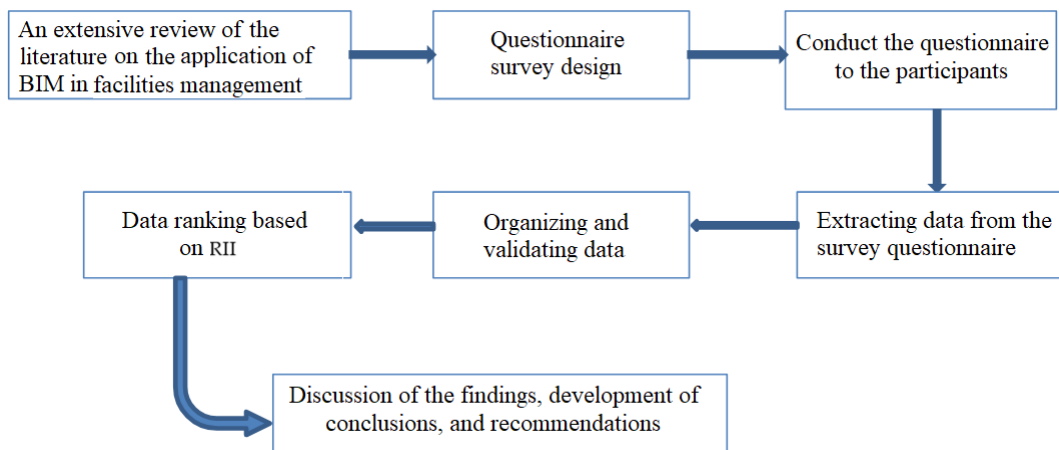


Figure 2 – Survey design
Source: compiled by the authors.

However, adopting BIM for sustainable facilities management is still in the beginning phases in Iraq because of a number of issues, including inadequate infrastructure, unstable government conditions, and a lack of qualified technical and professionals. Recent research indicates that inadequate government support for technology improvements and inadequate training investment are impeding Iraq's construction and building management industries. Because of this, even though BIM has been shown to improve sustainability and energy efficiency, its widespread popularity has been slow [59]. Furthermore, the incorporation of BIM into long-term facilities management techniques is limited in Iraq due to major obstacles in the availability of current data and resources [60]. On the other hand, the use of BIM technology has grown faster in other developing countries, such as Africa and Latin America. BIM technology is being used by governments like South Africa and Brazil to further sustainability objectives. In order to enhance the sustainability of buildings and lower the environmental impact of new constructions, BIM has been involved for the public and private building endeavors in Brazil [61]. The use of BIM in South Africa has advanced significantly, mostly as a result of government regulations requiring the use of BIM in major projects in order to increase sustainability. With an emphasis on improving project outcomes through better design, less waste, and optimum energy usage in construction, the South African government's National BIM Strategy has played a key role in establishing the framework for BIM incorporation [62]. In addition to successfully adopting BIM, these countries have also achieved significant progress in workforce education and the

development of their own expertise in sustainable facilities management [63].

MATERIALS AND METHODS

Questionnaire Design

The seven different parts that comprised the entire study effort are shown in Figure 2. These steps were taken in order to assess important issues regarding the advantages, obstacles, and other aspects of using BIM for sustainable facility management (SFM) in Iraq. It was found that the literature review and questionnaires were the most appropriate method for this kind of study. The survey was created using recent studies on FM and BIM in particular. As the main research method, a literature review was conducted to ascertain the extent and range of the present advantages and obstacles to the application of BIM in FM. The information gathered relates to both the Iraqi and international building industry. Furthermore, Google Scholar, and Scopus were chosen as the main databases for the factor collection procedure.

The study articles were more easily organized in the databases by using keywords like "building information modeling or BIM", "Sustainable facility management (SFM)", "obstacles", "advantages", "BIM in the Iraq construction industry," and "Global perspective of BIM and FM in AEC sector." After the study was analyzed, a questionnaire was created that took into account the literature as well as additional sources, as indicated in Table 1, and included 16 advantages and 14 obstacles to major considerations. The study articles that were selected for the survey design were organized using the years 2014 through 2024.

Data Collection

As earlier mentioned, a customized questionnaire was designed with the objective of collecting data by means of email and in-person interviews. The questionnaire was distributed to experts employed in the public and private building industries in Iraq. The survey consisted of three parts. The first part of the survey comprised fundamental demographic inquiries about the participants, including their age, sex, profession, and years of experience in the industry. Furthermore, the survey asked participants to rank 14 obstacles and 16 advantages. Using a Likert scale, the authors developed a survey in accordance with previous research [21]. Likert scale-based survey questionnaires are a good choice since they are simple to complete and produce accurate data based on participants' real experiences [2]. The study participants were requested to categorize their answers to a specific subject into five categories: strongly disagree, disagree, neutral, agree, and strongly agree. In the final section of the survey, participants were asked to provide their opinions regarding the most obstacles facing Iraqi facility management.

Most of responds came from recently constructed Iraqi sites. We needed six weeks to collect all of the information. Over half of those who participated had been in the building industry for more than five years, and the majority of the participants had knowledge in the subject.

The questionnaires were completed by 130 individuals, and the answers were derived from their evaluations on a standard 5-point Likert scale, which revealed their opinions regarding the degree of significance. After removing datasets that were incorrect or unfinished, only 119 were left for analysis. This translated into a about 91.53% total response rate.

RESULTS AND DISCUSSION

Demographic Details

As shown in Table 1, the survey was given to 119 individuals from the construction industry who have Knowledge in sustainable practices involving in building projects. Among the respondents, there were the following participation percentages: 43.7%, 27.7%, 6.7%, 17.6%, 3.4% and 0.9% for site engineers, Other, project engineers, academics, design engineers and owners, respectively. Over 84% of the participants were older than 25 years of age. On the other hand, 40.4% of those surveyed had less than five years of professional experience in the construction sector.

Using Cronbach's Alpha for Reliability Analysis

According to the results of the Cronbach's alpha test for the advantages, the acquired value of 0.934, as shown in Table 2, was considered sufficient and fell within the category of "excellent" with regard to internal consistency.

Table 1
Participant data

Source: compiled by the authors.

Information about	Categories	Percentage
Gender	Male	71.4%
	Female	28.6%
Age	21-25	16%
	25-30	30.3%
	30-35	16%
	35-40	10%
	40 up	27.7%
Job title	Project engineer	6.7%
	Design engineer	3.4%
	Site engineer	43.7%
	Owner	0.9%
	Academic	17.6%
	Other	27.7%
Year experience	Less than 5	40.4%
	5-10	17.6%
	10-15	11.8%
	15-20	15.1%
	More than 20	15.1%

Table 2

Cronbach's alpha value for advantages

Source: compiled by the authors.

Number of items	Cronbach's Alpha for advantages	Category
16	0.934	Excellent

Table 3

Cronbach's alpha value for challenges

Source: compiled by the authors.

Number of items	Cronbach's Alpha for obstacles	Category
14	0.901	Excellent

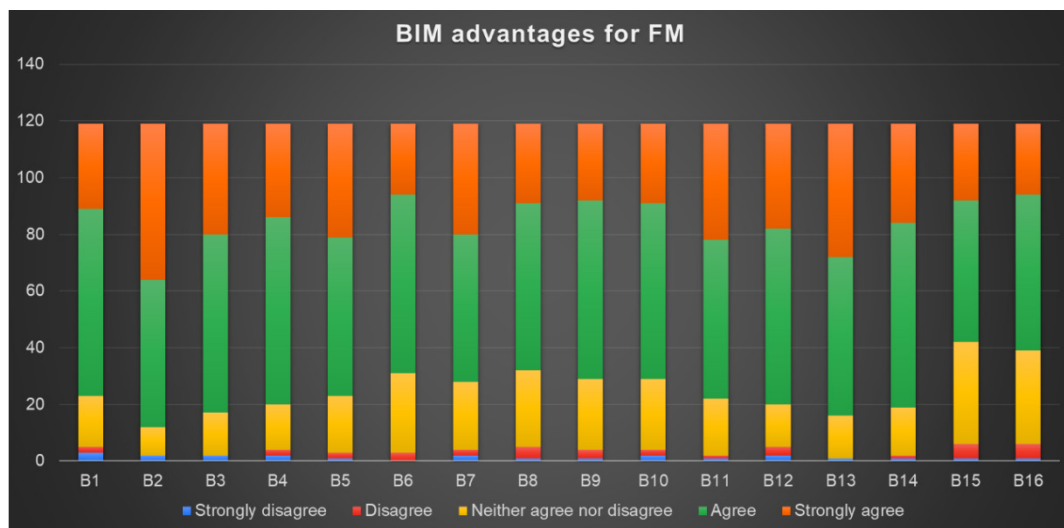


Figure 3 – Attitude to BIM advantages for project management

Source: compiled by the authors.

On the other hand, Table 3 shows a Cronbach's alpha test value of 0.901 for the obstacles. When it came to the data's internal consistency, the result was within the "Excellent" category.

Ranking of Advantages

Participants' responses to statements on their opinions about the advantages of adopting BIM, with 1 representing Strongly Disagree and 5 representing Strongly Agree, are shown in Figure 3.

The overall findings of the statistical analysis of all 16 advantageous criteria taken into account in the present study are shown in Table 4. The first column lists each component's identity. The overall relevance of each component was ranked using Equation (1) which represented the Relative Importance Index (RII). Table 4 additionally includes a list of the elements' means and relative ranking. The range of mean values was 4.32 to 3.81.

$$RII = \frac{\sum W}{(A \times N)} \quad (1)$$

Where:

RII: Relative Importance Index.

$\sum W$: Sum of all weights/scores assigned by respondents to a factor. A: Highest possible value on the rating scale.

N: Total number of respondents.

As shown in Table 4, "Facilitate the access relevant information, ensuring accurate documentation", "Supplying a centralized and coherent system for managing construction maintenance", "Promote the reduction of material waste during the project operation period", "Reducing the overall project costs", "Improving the management procedure throughout the entire life span of buildings", "Monitoring performance", "Enhancing construction performance", "Improved space management" and "Encouraging the use of clean energy efficient technology" were the most important advantages of integrating BIM into the building sustainable facility management (SFM) in Iraq. Moreover, all of these factors were considered high important level as their relative importance index (RII) were higher than 0.8. The key components of using BIM to create SFM in Iraq that had a middling level of advantage were then determined.

Table 4
BIM benefits ranking based on respondents' answers (n=119)
Source: compiled by the authors.

ID	Advantage	RII	Mean	Rank
B1	Support for effective resource management	0.798	3.991	10
B2	Facilitate the access relevant information easily, ensuring accurate documentation	0.865	4.327	1
B3	Promote the reduction of material waste during the project operation period	0.830	4.151	3
B4	Improved space management	0.811	4.058	8
B5	Monitoring performance	0.821	4.109	6
B6	Enhancing construction safety and health performance during maintenance and renovations	0.784	3.924	13
B7	Encouraging the use of clean energy efficient technology	0.808	4.042	9
B8	Improving the analysis of energy usage patterns and implementing sustainable strategies into practice	0.783	3.916	14
B9	Enhancing ventilation effectiveness	0.788	3.941	12
B10	Providing thermal building lifecycle analysis	0.788	3.941	11
B11	Reducing the overall project costs	0.826	4.134	4
B12	Enhancing construction performance	0.816	4.084	7
B13	Supplying a centralized and coherent system for managing construction maintenance	0.848	4.243	2
B14	Improving the management procedure throughout the entire life span of buildings	0.821	4.109	5
B15	Predicting energy savings	0.763	3.815	16
B16	Increasing building life	0.764	3.823	15

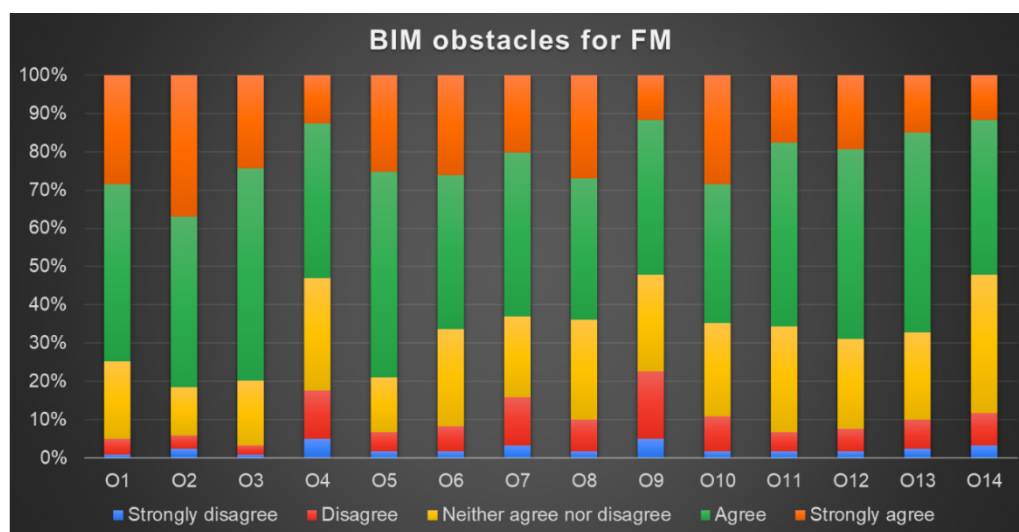


Figure 4 – Attitude to BIM advantages for project management
Source: compiled by the authors.

Among them, “Support for effective resource management”, “Providing thermal building life-cycle analysis”, “Enhancing ventilation effectiveness”, and “Enhancing construction safety and health performance during maintenance and renovations”, “Improving the analysis of energy usage patterns and implementing sustainable strategies into practice”, “Increasing building life” and “Predicting energy savings”. Their RII values, which ranged from 0.798 to 0.763, demonstrated the significant advantages of utilizing BIM to

create a sustainable facility management. The similarity of these RII ranks was also noted in the mean value data, which showed relatively little differences in the weights of the various components. Therefore, the use of BIM in SFM resulted in significant advantages for each factor.

Ranking of the obstacles

Participants' responses to statements on their opinions about the obstacles of adopting BIM, with 1 representing Strongly Disagree and 5 representing Strongly Agree, are shown in Figure 4.

Table 5
BIM challenges ranking based on respondents' answers (n=119)
Source: compiled by the authors.

ID	Obstacles	RII	Mean	Rank
O1	Insufficient of senior management support and attention environmentally friendly methods	0.795	3.975	3
O2	Absence of a cooperative workplace environment	0.820	4.101	1
O3	The resistance of FM stakeholders to leave its traditional approach of operation	0.800	4.000	2
O4	High cost of implementation	0.686	3.429	13
O5	Insufficient depth of knowledge and proficiency to use BIM-FM related analysis software	0.792	3.958	4
O6	Uncertainties in contracts and a deficient legal framework	0.765	3.824	5
O7	Absence of skilled staff	0.728	3.639	11
O8	Project strategies, policies, and organizational issues	0.758	3.790	7
O9	High personnel training costs	0.672	3.361	14
O10	Absence of well-defined guidelines for application BIM for FM	0.761	3.807	6
O11	Inadequate guidelines for exchanging facility management information	0.750	3.748	9
O12	Lack of a comprehensive framework and application strategy	0.758	3.790	8
O13	Not enough information to properly record FM-related details	0.739	3.697	10
O14	Inaccurate predictions for the analysis of energy	0.697	3.487	12

The overall findings of the statistical analysis of all 14 obstacles criteria taken into account in the present study are shown in Table 5. The first column lists each component's identity. The overall relevance of each component was ranked using Equation (1) which represented the Relative Importance Index (RII). Table 5 additionally includes a list of the elements' means and relative ranking. The range of mean values was 4.10 to 3.361.

Furthermore, Table 5 demonstrates that "Absence of a cooperative workplace environment", "The resistance of FM stakeholders to leave its traditional approach of operation" were the most important obstacles of integrating BIM into the building sustainable facility management (SFM) in Iraq where their factors were considered to be of high importance with Relative Importance Index (RII) above 0.8. Moreover, the factors that were considered to be moderate obstacles were identified, among them, "Insufficient of senior management support and attention environmentally friendly methods", "Insufficient depth of knowledge and proficiency to use BIM-FM related analysis software", and "Uncertainties in contracts and a deficient legal framework", "Absence of well-defined guidelines for application BIM for FM", "Project strategies, policies, and organizational issues", "Lack of a comprehensive framework and application strategy", "Inadequate guidelines for exchanging facility management information", "Not enough information to properly record FM-related details" and "Absence of skilled staff". Their relative importance index ratings ranged from 0.795 to 0.728. It was additionally found that "Inaccurate

predictions for the analysis of energy," "High cost of implementation," and "High personnel training costs" were among the barriers to use BIM in SFM that had less influence between the factors. Their relative importance index ratings ranged from 0.697 to 0.672.

RECOMMENDATIONS FOR ORGANIZATIONS LOOKING TO IMPLEMENT BIM TECHNOLOGY IN FM

Based on a thorough examination of data gathered from the Google Scholar and Scopus databases, the following strategic recommendations are proposed as a solution to the challenges faced in adopting BIM in FM:

- Policy and Standards: Governments and local organizations should establish clearer policies and standards to promote BIM implementation and support sustainability objectives [60]. as well as encourage the passage of laws that facilitate digital transformation, such as those pertaining to data protection, technology adoption requirements, and financial incentives.

- Invest in training and education: To improve professional skills and raise awareness of BIM's advantages for sustainability, extensive training programs are required [63]. Investing money into thorough training programs may help close knowledge gaps and guarantee that FM experts are adept at using BIM tools and procedures [64]. Provide training courses, conferences, and workshops on a regular basis to keep FM professionals aware of best practices and new developments in technology [65].

- Cooperation and communication: Enhancing stakeholder collaboration may improve the project's results as a whole, save time, and cut down on waste [66]. Using the BIM Execution Planning (BEP) Guide and the AEC (UK) BIM Protocol V2.0, will help improve cooperation and communication throughout the construction process, which is necessary for effective BIM adoption [58].
- Financial assistance and motivation: One of the obstacles to embracing BIM technologies was found to be high implementation costs. Offering financial assistance and motivation in the form of government grants, subsidies, or low-interest loans to companies investing in digital FM technology could assist in reducing the challenge and encourage wider use [65].

PRACTICAL OUTCOMES OF THE STUDY

There are several advantageous inferences that may be made from this study. To begin with, if the general acceptance of BIM is to rise, it must be supported by academics, government's stakeholders, and other building industry players. Despite a lack of knowledgeable and experienced professionals in the field of building information modeling (BIM), Iraqi academic curricula for built environment courses only include minimal BIM training. Construction industry academics are also strongly encouraged to support BIM, as they have a significant impact on students' BIM training. Furthermore, if fully adopted, BIM technology may reduce inefficiencies in the building industry and provide the way for the integration of other emerging technologies that are relevant to the construction industry. Lastly, by implementing the required changes to current policies, the government's stakeholders may show its support for BIM technology by creating an environment that facilitates its widespread application in the construction industry. The government's stakeholders may utilize the barriers that have been found in this study to increase the usage of BIM in the building industry in Iraq.

According to recent estimates, the Iraqi Ministry of Education stated that the country urgently needs over 12,000 additional schools to meet the increasing number of students—an approximate 3.2 million children are not attending school at the moment. To address this problem, the Iraqi government signed contracts with "Power China" and "Sino Tech" Chinese construction companies to construct 1,000 sustainable school buildings before the end of 2024 as part of an ambitious project to construct a total of 8,000 schools across the country. This program is consistent with the government of Iraq's endeavors to reconstruct the educational system following years of warfare. This study also helps ensure that these school buildings are developed properly and sustainably in the future.

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

Recently, BIM technology has become a game-changing innovation for building sustainable facility management (SFM) in the AEC industry. Thus, the goal of the current study is to investigate the advantages and obstacles of using BIM for SFM in Iraq. A comprehensive review of the literature was done to determine the different aspects that lead to the advantages and obstacles of using BIM for SFM. The relative importance index (RII) is used to rank the advantages and obstacles. The key advantages of adopting BIM in SFM were "Monitoring performance (RII = 0.866)", "Enhancing construction performance (RII = 0.849)", "Improved space management (RII = 0.830)", "Support for effective resource management (RII = 0.827)", and "Support for effective resource management (RII = 0.822)". On the other hand, "Absence of a cooperative workplace environment (RII = 0.82)", "The resistance of FM stakeholders to leave its traditional approach of operation (RII = 0.80)", "Insufficient of senior management support and attention environmentally friendly methods (RII = 0.795)", "Insufficient depth of knowledge and proficiency to use BIM-FM related analysis software (RII = 0.792)", and "Uncertainties in contracts and a deficient legal framework (RII = 0.765)" were the top five obstacles to implementing BIM building SFM in Iraq. There was also discussion on ways to reduce the obstacles, which include minimizing the high cost of resources, well-defined management systems, and worker training.

Theoretically, this work fills a knowledge gap and helps stakeholders understand the advantages of using BIM technology to construct SFM. It also serves as a helpful reference. This is the first investigation, as far as the authors are aware, that looks at how to determine advantages and obstacles to the broad application of BIM for SFM in Iraq. To assist stakeholders for operation sustainable building projects effectively, this research suggests applying a BIM-based research technique with ongoing, active projects. This study also implies that alternative frameworks can be created by researchers using the same collection of qualitative and quantitative data. Although the goals and objectives of this study were successfully met, it is not without its shortcomings. The initial caveat is that because the study was limited to Iraq, cultural differences may cause the findings to be different in other countries. In addition, the sample size of the quantitative study might be expanded to find out additional information regarding how to reduce obstacles to BIM implementation. Lastly, these caveats offer a way for further researchers to verify our findings through case studies of accomplished construction projects.

REFERENCES

1. Olanrewaju, Oludolapo Ibrahim, John E. Idiake, and Luqman Oyekunle Oyewobi. Global economic recession: Causes and effects on Nigeria building construction industry. *Journal of Surveying, Construction and Property*. 2018; 9-18. DOI: <https://doi.org/10.22452/jscp.vol9no1.2>.
2. J. L. a. T. W. Graham Robinson. A global forecast for the construction industry to 2030. 2021. <https://www.oxfordeconomics.com/resource/future-of-construction/> (accessed)
3. Datta, Shuvo Dip, et al. Critical project management success factors analysis for the construction industry of Bangladesh. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1108/ijbpa-01-2022-0006>
4. Messner, John. The lifecycle of a building project. *Fundamentals of Building Construction Management* 2022.
5. Datta, Shuvo Dip, et al. Assessment of crisis factors in the construction industry of Dhaka city in Bangladesh. *6th International Conference on Engineering Research, Innovation and Education School of Applied sciences & Technology*. SUST, Sylhet, Bangladesh. 2021.
6. Fitz, Daryn V., and Noha Saleeb. Examining the quality and management of non-geometric building information modelling data at project hand-over. *Architectural Engineering and Design Management*. 2019; 15.4: 297-310. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452007.2018.1560243>
7. Assafi, Mohammad Nafe, et al. Development and validation of a framework for preventing and mitigating construction delay using 4D BIM platform in Bangladeshi construction sector. *Construction Innovation*. 2022; 23.5. DOI: <https://doi.org/10.1108/CI-08-2021-0160>.
8. Vilutienė, Tatjana, Arvydas Kiaulakis, and Darius Migilinskas. Assessing the performance of the BIM implementation process: a case study. *Revista de la construcción*. 2021; 20.1: 26-36. DOI: <https://doi.org/10.7764/RDLC.20.1.26>.
9. Jiang, Rui, et al. Government efforts and roadmaps for building information modeling implementation: Lessons from Singapore, the UK and the US. *Engineering. Construction and Architectural Management*. 2022; 29.2: 782-818. DOI: <https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2019-0438>.
10. Hassan, Munaf Fouad, and Sajeda Kadhum Al-Kindy. Exploring the Challenges and Opportunities of BIM Implementation in Major Architectural Projects in Iraq. *International Journal of Sustainable Development & Planning*. 2023; 18.6. DOI: <https://doi.org/10.18280/ijssdp.180619>.
11. Ogunbukola, M. Sustainable Business Practices and Profitability: Balancing Environmental Responsibility with Financial Performance. ResearchGate; https://www.researchgate.net/publication/384291322_Sustainable_Business_Practices_and_Profitability_Balancing_Environmental_Responsibility_with_Financial_Performance. 2024. (accessed)
12. Hasanuddin, Bakri, et al. "Sustainable Business Practices: Integrating Environmental and Social Responsibility into Management Strategies." *Global International Journal of Innovative Research*. 2024; 1.3: 220-226. DOI: <https://doi.org/10.59613/global.v1i3.36>
13. Juhari, Mohammad Lui, et al. Developing a safety and health practices in building model of physical environment, facility management, and worker perception: Structural equation modeling approach. *Heliyon*. 2024; 10.22 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40396>
14. Bortolini, Rafaela, and Núria Forcada Matheu. Facility managers' perceptions on building performance assessment. *Frontiers of Engineering Management*. 2018; 5.3: 324-333. DOI: <https://doi.org/10.15302/J-FEM-2018010>
15. Okoro, Chioma Sylvia. Sustainable facilities management in the built environment: A mixed-method review. *Sustainability*. 2023; 15.4: 3174. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15043174>
16. Ahmadian F.F., Alireza, et al. BIM-enabled sustainability assessment of material supply decisions. *Engineering. Construction and Architectural Management*. 2017; 24.4: 668-695. DOI: <https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2015-0193>.
17. Lu, Yujie, et al. Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions. *Automation in Construction*. 2017; 83: 134-148.
18. Ibrahim Azira, et al. "Building Information Modeling (BIM) in Green Building Projects. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*. 2023; 13.12: 418-425. DOI: <https://doi.org/10.6007/IJARBS/v13-i12/19849>
19. Ahmad, Tayyab, and Muhammad Jamaluddin Thaheem. Developing a residential building-related social sustainability assessment framework and its implications for BIM. *Sustainable Cities and Society*. 2017; 28: 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.08.002>.
20. De Carvalho, Adrieli Cristina Vieira, Ariovaldo Denis Granja, and Vanessa Gomes Da Silva. A systematic literature review on integrative lean and sustainability synergies over a building's lifecycle. *Sustainability*. 2017; 9.7: 1156. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9071156>.
21. Datta, Shuvo Dip, et al. Investigation on the generation of construction wastes in Bangladesh. *International Journal of Construction Management*. 2023; 23.13: 2260-2269. DOI: <https://doi.org/10.1080/15623599.2022.2050977>.
22. Mi, Zihan, and Jiaxin Li. Maximizing project efficiency and collaboration in construction management through building information modeling (BIM). *Applied and Computational Engineering*. 2024; 72: 24-29. DOI: <https://doi.org/10.54254/2755-2721/72/20240986>
23. Mahdi, Mahmood Maad, and Dana Khider Mawlood. Challenges facing the implementation of building information modeling (BIM) techniques in Iraq. *Zanco Journal of Pure and Applied Sciences*. 2020; 32.4: 48-57.
24. Saeed, Yousif S. BIM technology strategies in designing sustainable cities. *Journal of Duhok University*. 2023; 26.2: 89-98. DOI: <https://doi.org/10.26682/csjuod.2023.26.2.10>.
25. Foster, John D., Jess W. Everett, and William T. Riddell. Compatibility of Sustainable Facility Management and Building Information Modeling Applications: *The Role of Naming Conventions*. *Sustainability*. 2023; 15.2: 1482. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15021482>.
26. Datta S.D., Rahman Sobuz M.H., Mim N.J., Nath A.D. Investigation on the effectiveness of using

- building information modeling (BIM) tools in project management: A case study. *Rev. Constr. J. Constr.* 2023; 306–320. DOI: <https://doi.org/10.7764/RDLC.22.2.306>.
27. GhaffarianHoseini A., Tien Doan D., Naismith N., Tooke J., GhaffarianHoseini, A. Amplifying the practicality of contemporary building information modelling (BIM) implementations for New Zealand green building certification (Green Star). *Eng. Constr. Archit. Manag.* 2017: 696–714. DOI: <https://doi.org/10.1108/ECAM-02-2016-0043>.
28. Yilmaz G., Akcamete A., Demirors O. A reference model for BIM capability assessments. *Autom. Constr.* 2019; 101: 245–263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.022>.
29. Röck M., Hollberg A., Habert, G.; Passer, A. LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages. *Build. Environ.* 2018: 153–161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.006>.
30. Oraee M., Hosseini M.R., Edwards D.J., Li H., Papadonikolaki E., Cao D. Collaboration barriers in BIM-based construction networks: A conceptual model. *Int. J. Proj. Manag.* 2019: 839–854. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2019.05.004>.
31. Ansah M.K., Chen X., Yang H., Lu L., Lam P.T.I. A review and outlook for integrated BIM application in green building assessment. *Sustain. Cities Soc.* 2019; 101576. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101576>.
32. Cheng Qiuli, et al. Leveraging BIM for Sustainable Construction: Benefits, Barriers, and Best Practices. *Sustainability.* 2024; 16.17: 7654. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16177654>.
33. Bolshakov Nikolai, Alberto Celani, and Liliya Azhimova. Integrating BIM in operation and maintenance stage. *Proceedings of FORM 2022: Construction The Formation of Living Environment*. Cham: Springer International Publishing. 2022: 489–496. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-10853-2_46.
34. Farghaly K., Abanda F.H., Vidalakis C., Wood G. Taxonomy for BIM and Asset Management Semantic Interoperability. *J. Manag. Eng.* 2018. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000610](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000610).
35. Hassan H., Taib N., Rahman Z. Virtual Design and Construction: A New Communication in Construction Industry. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Digital Signal Processing*, Tokyo, Japan, 25–27 February 2018; Association for Computing Machinery: New York, NY, USA, 2018: 113. DOI: <https://doi.org/10.1145/3193025.3193062>.
36. Lavikka R., Kallio J., Casey T., Airaksinen, M. Digital disruption of the AEC industry: Technology-oriented scenarios for possible future development paths. *Constr. Manag. Econ.* 2018: 635–650. DOI: <https://doi.org/10.1080/01446193.2018.1476729>.
37. Teicholz P.M. *BIM for Facility Managers*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2018: 332. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119572633>.
38. Le A.T.H., Domingo N., Rasheed E., Park K.S. Building Maintenance Cost Planning and Estimating: A Literature Review. In *Proceedings of the 34th Annual ARCOM Conference, ARCOM 2018, Belfast, UK, 3–5 September 2018*; Association of Researchers in Construction Management: Belfast, UK, 2018: 697–706.
39. Rogage Kay, and David Greenwood. Data transfer between digital models of built assets and their operation & maintenance systems. *Journal of Information Technology in Construction.* 2020; 25: 469–481. DOI: <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2020.027>.
40. Carvalho, Ana Thereza, et al. BIM model to support O&M tasks. 2023.
41. Thabet, Walid, Jason Lucas, and Sai Srinivasan. Linking life cycle BIM data to a facility management system using Revit Dynamo. *Organization, technology & management in construction: an international journal.* 2022; 14.1: 2539–2558. DOI: <https://doi.org/10.2478/otmcj-2022-0001>.
42. Jibrin I.M., et al. Application of BIM Implementation Process in the Operation and Maintenance of Information Management System in Building Facilities. *Environmental Technology and Science Journal.* 2024; vol. 14, no. 2: 42–50. DOI: <https://doi.org/10.4314/etsj.v14i2.6>.
43. Shen W., Hao Q. and Xue Y. A loosely coupled system integration approach for decision support in facility management and maintenance. *Automation in Construction.* 2012; Vol. 25: 41–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.04.003>.
44. Ilyinova V.V., Mitsevich V.D. International experience in using BIM technologies in construction. *Russian Foreign Economic Bulletin.* 2021; 6: 79–93. DOI: <https://doi.org/10.24412.2072-8042-2021-6-79-93>.
45. Wei Muyun. BIM Driving Innovation in Construction Industry: Advancements in Building Lifecycle Management and Facility Management. *Advances in Economics, Management and Political Sciences.* 2024; 121; 1–6. DOI: <https://doi.org/10.54254/2754-1169/121/20242291>.
46. Altwassi Esraa J., et al. From Design to Management: Exploring BIM's Role across Project Lifecycles, Dimensions, Data, and Uses, with Emphasis on Facility Management. *Buildings.* 2024; 14.3: 611. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14030611>.
47. Zhan Yuan, Yu Peng, and Changrong Xiong. Application of BIM in Renovation Design of Existing Buildings. *International Conference on Urban Climate, Sustainability and Urban Design. Singapore: Springer Nature Singapore.* 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-8401-1_18.
48. Le Hoai Nam, et al. BIM Related Technology Enabled Facility Management for Buildings: Challenges and Potential Research Directions. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology.* 2024; 15.4: 130–145. DOI: <https://doi.org/10.30880/ijscet.2024.15.04.010>.
49. Khemlani L. BIM for facilities management, AEC Bytes. 2011.
50. Durdyev, Serdar, et al. “Barriers to the implementation of Building Information Modelling (BIM) for facility management. *Journal of Building Engineering.* 2022;46: 103736. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103736>.
51. Peng Yang, Jia-Rui Lin, Jian-Ping Zhang, et Zhen-Zhong Hu. A hybrid data mining approach on BIM-based building operation and maintenance. *Building and Environment.* 2017; 126: 483–95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.030>.
52. Beddiar, Karim, et Fabien Imbault. *BIM et énergétique des bâtiments*. Dunod, 2017.
53. Ariffin, Khadijah Md, Sani Inusa Milala, and Rozilah Kasim. Facilities Management Business Opportunities. *International Journal of Sustainable Construc-*

tion Engineering and Technology. 2022; 13.2: 258–267. DOI: <https://doi.org/10.30880/ijscet.2022.13.02.023>

54. Wong J.K.W., Ge J., He S.X. Digitisation in facilities management: A literature review and future research directions. 2018; 92: 312–326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.04.006>

55. SmartMarket Report. The Business Value of BIM for Construction in Major Global Markets; McGraw Hill Construction: New York, NY, USA, 2014.

56. Schumacher J., Otani R.K. Advanced computational modeling in multidisciplinary design. In *20th Analysis and Computation Specialty Conference*. 2012: 231–244. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784412374.021>

57. Hamada H.M., Haron A.T., Zahrizan Z.Z., Humada A.M.. Implementation of 4D/BIM in the Iraqi construction industry. *International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation*. 2017; Vol. 9 (4): 227–236. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJESMS.2017.087556>

58. Mohammed, Huda Saaduldeen, and Mustafa A. Hilal. Improving Building Information Modeling (BIM) Implementation throughout the Construction Industry. *Journal of Engineering*. 2024; 30.02: 85–104. DOI: <https://doi.org/10.31026/j.eng.2024.02.06>

59. Al-behadili, Karrar Abbas, Yusuf Mohamed Ali, and Elsheikh Asser. Using BIM for building maintenance management in Iraq. *E3S Web of Conferences*. 2023; Vol. 402. EDP Sciences. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340207007>

60. Romanovich Marina, Albehadili Karrar Abbas, and Ali Yusuf Mohamed. Benefits and challenges of implementing BIM in the AEC industry in Iraq. *BIM in construction & architecture*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.23968/BIMAC.2021.001>

61. de Assis Santos Wanderley, Ayanna Karina, Alberto Casado Lordsleem Júnior, and Joaquin Humberto Aquino Rocha. Requirements for BIM implementation in AEC companies: a Brazilian case study. *Revista de la construcción*. 2023; 22.2: 455–473. DOI: <https://doi.org/10.7764/RDLC.22.2.455>

62. Dywili, Siyabulela, Clinton Aigbavboa, and Didibhuku Thwala. Adoption of Digital Technologies by Built Environment Professionals: A Review from South African Context. *International Conference on Infrastructure Development in Africa*. Cham: Springer Nature Switzerland. 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-69606-0_26

63. Kineber, Ahmed Farouk, et al. Challenges to the implementation of building information modeling (BIM) for sustainable construction projects. *Applied Sciences*. 2023; 13.6: 3426. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13063426>

64. Babatunde Solomon Olusola, Chika Udeaja, and Adedayo Opeyemi Adekunle. Barriers to BIM implementation and ways forward to improve its adoption in the Nigerian AEC firms. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*. 2021; 39.1: 48–71. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJBPA-05-2019-0047>

65. Alrubaidi, Mohammed. Evaluating the Effects of Digital Transformation on Facilities Management Projects in Saudi Arabia: Overcoming Challenges and Seizing Opportunities. *Open Journal of Civil Engineering*. 2024; 14.4: 536–569. DOI: <https://doi.org/10.4236/ojce.2024.144030>

66. Kineber, Ahmed Farouk, et al. Impact of overcoming BIM implementation barriers on sustainable building project success: a PLS-SEM approach. *Build-*

ings. 2023; 13.1: 178. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13010178>

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Al-jaberi Karrar Abbas Oleiwi – concept of research and development of methodology, data gathering and processing, article writing, final conclusions.

Elsheikh Asser Mohamed – scientific supervision.

Aminov Amirkhon Farrukhovich – research concept, text review, creating graphic materials.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Аль-джабери Каррар Аббас Олейви – концепция исследования и разработка методологии, сбор и обработка данных, написание статьи, окончательные выводы.

Эльшейх Ассер Мохамед – научное руководство.

Аминов Амирхон Фаррухович – исследовательская концепция, рецензирование текстов, создание графических материалов.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Al-jaberi Karrar Abbas Oleiwi – Master of Engineering PhD Student at Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN) (Miklukho-Maklaya str.6, Moscow, 117198).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3011-6314>,

e-mail: karrarabbas095@gmail.com

Elsheikh Asser Mohamed – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Engineering Academy of the Department of Construction; Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN) (Miklukho-Maklaya str.6, Moscow, 117198).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1212-2924>,

e-mail: elsheykh_am@pfur.ru

Aminov Amirkhon Farrukhovich – Assistant Professor, PhD Student at Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU) (Polytechnicheskaya str.29, St. Petersburg, 195251).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4427-7269>,

e-mail: amirjon.aminov.97@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Аль-джабери Каррар Аббас Олейви – Магистр технических наук, аспирант Российского университета дружбы народов (117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3011-6314>,

e-mail: karrarabbas095@gmail.com

Эльшейх Ассер Мохамед – канд. техн. наук, доц., Инженерная академия, кафедра строительных конструкций и сооружений Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН) (117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1212-2924>,

e-mail: elsheykh_am@pfur.ru

Аминов Амирхон Фаррухович – аспирант, ассистент в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого (СПбПУ), (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4427-7269>,

e-mail: amirjon.aminov.97@gmail.com

Научная статья
 УДК 624.21.011
 DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-296-318>
 EDN: WMXFSD



О РАЗВИТИИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ДЕРЕВОБЕТОННЫХ МОСТОВ

В.А. Уткин¹ ✉, П.Н. Кобзев¹, Е.Е. Басич^{1,2}, В.В. Скиба¹

¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия

²ООО Проектно-инжиниринговая компания «Мостовик»,
г. Омск, Россия

✉ ответственный автор
prof.utkin@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Древесина как конструкционный материал пролетных строений мостов обладает некоторыми преимуществами в сравнении с распространенными в настоящее время железобетоном или сталью. Новые технологически-конструктивные формы деревянных пролетных строений должны соответствовать современным требованиям по грузоподъемности и долговечности. В сравнении с зарубежным деревянным мостостроением наш опыт в этой области во многом утрачен или не соответствует современным условиям. Из наиболее перспективных конструктивных решений можно выделить комбинированные дерево-железобетонные пролетные строения.

Материалы и методы. Рассмотрен как зарубежный, так и отечественный опыт устройства соединений в комбинированных деревобетонных конструкциях. Приведена информация об области применения деревянных мостов с составными прогонами и отдельно описана конструкция деревобетонного пролетного строения с составными прогонами с результатами испытаний. Далее изучен опыт применения мостов с клееными балками с указанием конструктивного решения комбинированного деревобетонного пролетного строения. На основе данных обследования мостов Омской области приведен опыт эксплуатации мостов с дощато-нагельно-гвоздевыми блоками и плитой проезда с поперечно-уложенным брусом, указаны типичные повреждения и рассмотрен вариант реконструкции таких мостов с железобетонной плитой проезжей части, включенной в совместную работу с балками.

Результаты. Выявлена необходимость внедрения новых решений по увеличению долговечности деревянных мостов. Одним из таких решений является использование железобетонной плиты проезда, включенной в совместную работу с деревянными балками, что также увеличивает общую несущую способность пролетного строения.

Обсуждение и заключение. Предлагаемые в статье конструкции деревобетонных пролетных строений обладают большей долговечностью и увеличенной несущей способностью в сравнении с деревянными пролетными строениями. Такой конструктивный метод может быть эффективно применен и при реконструкции существующих деревянных мостов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: деревобетонные мосты, дощато-гвоздевая ферма, долговечность деревянных мостов, деревянные клееные балки, соединительные элементы деревобетонных мостов

Статья поступила в редакцию 18.02.2025; одобрена после рецензирования 18.03.2025; принята к публикации 17.04.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Уткин В.А., Кобзев П.Н., Басич Е.Е., Скиба В.В. О развитии и совершенствовании деревобетонных мостов // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, №. 2 С. 296-318. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-296-318>

© Уткин В.А., Кобзев П.Н., Басич Е.Е., Скиба В.В., 2025



Контент доступен под лицензией
 Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-296-318>

EDN: WMXFSD

ON DESIGN AND DEVELOPMENT OF WOOD-CONCRETE BRIDGE STRUCTURE

Vladimir A. Utkin¹ ✉, Pavel. N. Kobzev¹, Evgeny E. Basich^{1,2}, Victoria V. Skiba¹

¹Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia

²LLC Design and Engineering Company "MOSTOVIK",
Omsk, Russia

✉ corresponding author
prof.utkin@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Timber as a structural material for bridge spans has some advantages compared to currently widespread reinforced concrete or steel. New technological and structural forms of timber spans should comply with modern requirements for load capacity and durability. Compared to foreign practice of timber bridge construction, our experience in this sphere is largely lost or does not correspond to modern conditions. The most advanced design solutions include combined timber-reinforced concrete spans.

Materials and methods. The authors analyze both foreign and domestic experience of making connections in composite timber-concrete structures. The text provides information on the scope of application of timber bridges with combined logs and separately describes the design of a timber-concrete span with combined logs and the test results. Further the authors consider the experience of application of bridges with glulam girders and design solutions for the combined timber-concrete span structure. Based on the survey data for the bridges in Omsk region, the authors present the experience of bridge operation and maintenance for structures with board-nail blocks and driveway slab with a cross-laid beams. The text indicates typical damages of such spans and considers a variant of reconstructing such bridges with reinforced concrete roadway slab jointed with beams.

Results. The authors identified the need to introduce new solutions to increase the durability of timber bridges. One of such solutions is the use of reinforced concrete passage slab jointed with timber beam, which also increases the overall load-bearing capacity of the span structure.

Discussion and conclusions. The designs of timber-concrete spans proposed by the authors in the article have greater durability and increased load-bearing capacity compared to timber spans. This structural method can be effectively applied to the reconstruction of existing timber bridges.

KEYWORDS: timber-concrete bridges, boardwalk-nailed truss, durability of timber bridges, laminated timber beams, connection elements of timber-concrete bridges

The article was submitted: February 18, 2025; approved after reviewing: March 18, 2025; accepted for publication: April 17, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Utkin V.A., Kobzev P.N., Basich E.E., Skiba V.V. On design and development of wood-concrete bridge structure. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (2): 296-318. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-2-296-318>

© Utkin V.A., Kobzev P.N., Basich E.E., Skiba V.V., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что для строительства новых мостов в РФ принято применять железобетонные, стальные и сталежелезобетонные пролетные строения, в условиях лесных районов целесообразно применять деревянные или деревобетонные конструкции, отвечающие всем требованиям, предъявляемым к капитальным сооружениям по прочности, надежности и долговечности. От известных материалов древесину отличает малая плотность, относительно высокая удельная прочность, жесткость, химическая стойкость и легкая обрабатываемость, а правильно подобранные и выполняемые защитные мероприятия при пропитке древесины антисептиками и антипиренами увеличивают долговечность конструкций мостов до 50 и более лет. В этом заключено определенное преимущество древесины над современными материалами для «капитальных» мостов.

Запасы древесины постоянно восполняются природой, и при правильном использовании они всегда могут обеспечить потребности народного хозяйства в развитии и совершенствовании дорожной сети страны и мостостроения в частности. При этом возросшим требованиям пропуск по деревянным мостам современных нагрузок должны соответствовать новые конструктивно-технологические формы пролетных строений и опор, отвечающие одновременно требованиям по долговечности не менее 50 лет и индустриальности производства.

Известно [1], что проблемы развития лесного комплекса требуют расширения объема лесозаготовок, а вместе с ним строительства лесных дорог и лесной инфраструктуры современного уровня, на основе более широкого использования древесины в дорожном строительстве.

В соответствии с современными требованиями деревянные автодорожные мосты должны удовлетворять требованиям по нагрузке и должны быть защищены от внешних и биологических воздействий¹.

Накопленный ранее опыт проектирования и строительства деревянных, комбинированных (с использованием деревянных кон-

струкций) мостов оказался практически неиспользованным и утраченным, хотя последние проекты ГПИ «СОЮЗДОРПРОЕКТ» на основе дощато-гвоздевых ферм позволяли перекрывать пролеты 9, 12 и 18 м при новых нагрузках.

В проекте Ленинградского филиала «ГИПРОДОРНИИ», например, были разработаны конструкции балочных пролетных строений из клееной древесины для широкого диапазона временных нагрузок, длин пролетов и габаритов. Проект отличался высокой степенью унификации, когда пролетные строения разных габаритов для разных нагрузок отличались между собой только количеством балок в поперечнике и расстояниями между ними. В частности, клееные балки прямоугольного поперечного сечения четырех типоразмеров, отличающихся высотой, обеспечивали решение 42 вариантов пролетных строений длиной от 6 до 18 м с габаритами от Г-7 до Г-10 под все виды временных нагрузок. Однако указанные серии проектов не получили дальнейшего развития. Со временем разработанные типовые проекты деревянных мостов устарели и стали непригодными для современных условий и требований.

В настоящее время интерес к применению деревянных пролетных строений мостов находится на крайне низком уровне, а новые своды правил допускают применение деревянных мостов только на автомобильных дорогах ниже III категории.

Лидирующее положение по применению древесины в мостовых конструкциях занимают в настоящее время США, Финляндия, Канада и другие страны зарубежья. Применение древесины в строительстве мостов в странах, не испытывающих недостатка в стали и цемента, может быть объяснено экономической эффективностью данного природного материала и рядом его преимуществ² [2]. Только на этом основании древесина за рубежом получила признание и смогла стать конкурентоспособным конструкционным материалом.

Повышенный интерес к деревобетонным мостам в Европе проявился в начале 1990-х годов. В США первые деревобетонные мосты появились в 30-е годы XX в. на фоне дефицита стали, однако в дальнейшем интерес к этим

¹ Уткин В.А., Пузиков В.И., Казанцев Б.И., Каретников М.Ю. О применении древесины для строительства мостов // Сборник «Дороги и мосты». М., 2014. Выпуск 32/2. EDN: TIBWDB

² Гибшман Е.Е. Проектирование деревянных мостов. М.: Транспорт, 1976. 272 с.

конструкциям постепенно угас до нуля и возобновился лишь к концу 2000-х годов³ [3, 4, 5].

В работе [3] дан анализ 75 сооружений (Timber concrete composite bridge – TCC), построенных в период от 1930-х до 2010 г. за рубежом. Отмечено, что страны Европы, особенно Финляндия, Швейцария, Англия, Франция, Германия, в которых эти мосты ранее игнорировались, стали наиболее заинтересованными в их применении по сравнению с металлическими и железобетонными конструкциями. В качестве преимущества деревобетонных пролетных строений в сравнении с деревянными выделено отсутствие необходимости в сильной химической защите деревянных элементов.

Выполненные научно-исследовательские и проектные разработки на кафедрах мостов Сибирского автомобильно-дорожного университета^{4,5,6,7} и Хабаровского политехнического института^{8,9,10,11}, более поздние работы¹² [6], опыт проектирования и строительства мостов в Омской области свидетельствуют о целесообразности более широкого применения древесины в мостостроении, особенно при освоении новых регионов страны.

Таким образом, на основе отечественного и зарубежного опыта установлено, что из известных конструктивных решений пролетных строений с применением древесины в настоящее время нашли практическое применение в дорожном строительстве комбинированные конструкции с железобетонной плитой, включенной в совместную работу с несущими де-

ревянными балками, в том числе балочные пролеты:

- с составными прогонами из бревен и брусьев;
- из дощато-брусчато-нагельно-гвоздевых блоков с железобетонной плитой;
- из клееных балок заводского изготовления с железобетонной плитой проезжей части.

Основным преимуществом исследуемых конструкций перед известными решениями является защищенность несущих деревянных элементов от внешних воздействий монолитной железобетонной плитой проезжей части, что существенно повышает их долговечность. Другая их особенность – совместная работа железобетонной плиты и деревянной конструкции, обеспечивающая снижение материалоемкости составляющих элементов. При этом большое значение в обеспечении совместной работы железобетонной плиты и несущих деревянных конструкций приобретают связующие элементы, изучение работы которых и разработка рекомендаций по применению которых становится одной из основных задач предмета исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Соединительные элементы деревобетонных конструкций

Статья [7] приводит обширную информацию о применении ДБК в США в XX в. Первый мост с балками Т-образного сечения был построен в 1924 г. в городе Сизтле. К 1943 г. было построено более 180 подобных сооруже-

³ Rodrigues J.N., Dias A.M.P.G., Providencia P. Timber-concrete composite bridges-sustainability assessment, University of Coimbra, COST Action FP 1004 – Timber Bridges Conference 2014. p. 14.

⁴ Мельников Ю.О. Определение несущей способности объединенных деревобетонных балок. Теоретические и экспериментальные исследования мостов и сооружений: сборник статей. Заб.-Сиб. кн. изд-во. Омск, 1968.

⁵ Его же. Влияние податливости связей на прочность и жесткость деревобетонных мостовых балок. ... С. 35–45.

⁶ Ковтонюк В.А., Мельников Ю.О. Конструкции и выбор типов связей в объединенных деревобетонных мостовых балках // Теоретические и экспериментальные исследования мостовых сооружений: Тр. СибАДИ. Омск, 1972. № 5. С. 79–89.

⁷ Шумахер А.В. Экспериментальное исследование жесткости нагельных связей объединенных деревобетонных балок под действием многократно-повторной нагрузки // Сборник научных трудов. Омск: Западно-Сибирское издательство. 1970. № 2. С. 30–43.

⁸ Кулиш В.И. Клееные деревянные мосты с железобетонной плитой. М.: Транспорт, 1979. 160 с.

⁹ Кулиш В.И., Белуцкий И.Ю., Быков Б.С., Цуканов В.П. Опыт проектирования, строительства и эксплуатации деревянных мостов с железобетонной плитой // Автомобильные дороги. 1982. № 10. С. 7–9.

¹⁰ Белуцкий И.Ю., Глибовицкий Ю.С., Кулиш В.И. Экспериментальное исследование гибридных клееных балок // Сб. тр. ХабПИ. Общетеchnические науки. Хабаровск, 1972.

¹¹ Белуцкий И.Ю. Об эффективности клееных армированных конструкций // Известия ВУЗов, раздел «Строительство и архитектура». № 2. 1972.

¹² Дмитриев П.А. Конструкции из дерева и пластмасс. Специальный выпуск. Автодорожные и пешеходные мосты. Оренбург: ИПК «Газпромнефть» ООО «Оренбурггазсервис», 2002. 192 с.

ний. Указывается, что в период 1940-х – 1950-х годов достаточно широко производилась реконструкция деревянных мостов (127 штук) в деревобетонные в штате Калифорния. ДБК применяются достаточно широко и в настоящее время. Подавляющее большинство их находятся в относительно хорошем состоянии, особенно если учесть, что многие из них эксплуатируются более 50 лет. Авторы статьи также отмечают некоторые недостатки, проявляющиеся при длительной эксплуатации таких конструкций: трещины в бетонном или асфальтовом покрытии, разрушение древесины, коррозия стали и механические повреждения древесины и бетона. Отмечается, что избежать подобной деградации конструкции можно с помощью более тщательного конструирования свесов бетонной плиты и качественной антисептической обработкой древесины.

Появление конструктивных решений деревобетонных конструкций на основе применения для соединения бетонной плиты с деревянными балками системы гвоздей и стальных скоб (1922 г.) и стальных Z-профилей и I-профилей в качестве системы межслойного соединения (1939 г.) приведены в статье [8]. Статья указывает на применение конструкций такого типа соединений в разных странах (США, Новая Зеландия, Австралия, Швейцария, Австрия, Скандинавские страны) на протяжении всего XX в.

Статья [9] полностью посвящена деревобетонным конструкциям с клеевым соединением. Особенностью такого соединения является возможность предварительного изготовления бетонных плит. При этом древесина и бетон соединяются исключительно клеем, без использования металлических соединителей. Особое внимание при этом уделяется непрерывности соединения. В качестве клея используется сравнительно современный полимерный раствор, а также эпоксидная смола. Оба клея оказались пригодными, хотя полимерные растворы продемонстрировали значительные преимущества по сравнению с менее вязким эпоксидным клеем. Из недостатков соединения можно отметить высокие требования к обработке склеиваемых поверхностей дерева и бетона.

Разрушения в клеевых соединениях могут возникать из-за недостаточной подготовки поверхности контакта, неправильного выбора или нанесения клея, а также воздействия вла-

ги. Если связь между древесиной и бетоном нарушается, это может привести к разделению элементов, снижению несущей способности и жесткости. Исследования определили, что добавление стержней и пластин в клеевые соединения древесины с бетоном не увеличивает несущую способность.

Изучение [10] показало, что в случае клеевых соединений результаты испытаний необходимо интерпретировать и использовать с осторожностью. Было установлено, что прочность на сдвиг сильно зависит от размера соединения и отражает не непосредственно прочность адгезии, а скорее когезионную прочность бетона на линии соединения. Надежное определение жесткости соединения оказалось затруднено из-за большого разброса результатов.

Подробная информация о соединителях в виде труб, заделанных в массив бетона и дерева, представлена в статье [11]. В результате своих исследований авторы делают такие выводы: 1. Жесткость и несущая способность соединения при увеличении диаметра труб увеличиваются. 2. Предельные нагрузки на сдвиг, наблюдаемые в данном исследовании, варьируются от 46 до 104 кН на один соединитель, что подходит для конструкций мостов с малой и средней длиной пролета.

Особое внимание причинам и механизмам разрушения соединительных элементов деревобетонных конструкций уделяется в работах¹³ [12]. Отмечается, что в ДБК винтовые соединения часто выходят из строя из-за того, что винты вырываются из древесины или бетона. Испытаниями на сдвиг установлена связь между прочностью на сдвиг и глубиной заделки. Результаты эксперимента показали, что для предотвращения разрушения глубина заделки должна быть в 7,33 раза больше диаметра винта.

Пазовые соединения создаются путем вырезания пазов в древесине и последующего заполнения их бетоном плиты. Слабость в соединениях с пазами может возникнуть из-за обжатия волокон древесины вокруг паза, что приводит к снижению их прочности и жесткости. Область вокруг паза также может быть уязвимой к растрескиванию и расщеплению. Сдвиговое разрушение бетона выемки доминирует в механизме разрушения ДБК, а длина выемки

¹³ Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures. Handbook 1: TimberStructures. 2008. pp. 63-227.23.

оказывает значительное влияние на несущую способность соединений при сдвиге [12].

Соединения с помощью вертикальных перфорированных пластин, половина высоты которых вклеивается в паз деревянной балки, а другая половина входит в массив железобетонной плиты, рассмотрены в статье [13]. Отмечается высокая эффективность такого решения, но также авторами выделена низкая пластичность соединения из-за хрупкого разрушения клея в деревянном пазе.

История деревобетонных пролетных строений мостов в нашей стране связана с внедрением в строительное производство клееной древесины. Первый мост с деревобетонными пролетными строениями¹⁴ был построен в 1964 г. С начала 60-х и до конца 80-х гг. прошлого столетия в СОЮЗДОРНИИ, СибАДИ, Хабаровском политехническом институте и других научных организациях проводились исследования и опытно-конструкторские работы по совершенствованию комбинированных пролетных строений. Разработано достаточно много конструкций с монолитными и сборными плитами, с различными типами связей между балками и плитами^{15,16,17,18,19} [6, 14, 15].

Существенный вклад в исследования соединительных элементов в деревобетонных

пролетных строениях мостов внесли под руководством проф. К.Х. Толмачева ученые СибАДИ Ю.О. Мельников^{20,21,22}, А.В. Шумахер²³; Хабаровского политехнического института В.И. Кулиш, И.Ю. Белуцкий и др.^{24,25,26,27}, П.А. Дмитриев²⁸, В.П. Стуков [6, 14, 15, 16, 17].

В работе²⁹ Ю.О. Мельникова и В.А. Ковтонюка дана оценка применяемых типов связей для объединенных деревобетонных мостовых балок, при этом в виду очень жесткого технологического режима склеивания железобетонной плиты и деревянных балок отрицается возможность применения между ними клеевых соединений.

Использование соединений плиты и балок при помощи врубок (пазов), широко применяемых в США и Канаде³⁰, из-за переменной податливости соединений и недостаточной несущей способности их на сдвиг, рекомендованы для пролетов до 10 м. В итоге авторами предложены металлические связи сдвига трех типов: гибкие нагельные связи в виде отдельных цилиндрических нагелей, в виде петлевых выпусков и пластинчатых нагелей; полужесткие связи в виде неравнобоких уголков, тавров и швеллеров, закрепленных в балках посредством разного типа глухарей; и жесткие связи малой податливости. В конечном итоге

¹⁴ Кулиш В.И., Белуцкий И.Ю., Быков Б.С., Цуканов В.П. Опыт проектирования, строительства и эксплуатации деревянных мостов с железобетонной плитой ... С. 7–9.

¹⁵ Кулиш В.И. Клееные деревянные мосты с железобетонной плитой. ... 160 с.

¹⁶ Кулиш В.И., Белуцкий И.Ю., Быков Б.С., Цуканов В.П. Опыт проектирования, строительства и эксплуатации деревянных мостов с железобетонной плитой ... С. 7–9.

¹⁷ Белуцкий И.Ю., Глибовицкий Ю.С., Кулиш В.И. Экспериментальное исследование гибридных клееных балок. ... 1972.

¹⁸ Белуцкий И.Ю. Об эффективности клееных армированных конструкций. ... 1972.

¹⁹ Дмитриев П.А. Конструкции из дерева и пластмасс. ... 192 с.

²⁰ Мельников Ю.О. Определение несущей способности объединенных деревобетонных балок. ... 1968.

²¹ Его же. Влияние податливости связей на прочность и жесткость деревобетонных мостовых балок. ... С. 35–45.

²² Ковтонюк В.А., Мельников Ю.О. Конструкции и выбор типов связей в объединенных деревобетонных мостовых балках. ... С. 79–89.

²³ Шумахер А.В. Экспериментальное исследование жесткости нагельных связей объединенных деревобетонных балок под действием многократно-повторной нагрузки. ... С. 30–43.

²⁴ Кулиш В.И. Клееные деревянные мосты с железобетонной плитой. ... 160 с.

²⁵ Кулиш В.И., Белуцкий И.Ю., Быков Б.С., Цуканов В.П. Опыт проектирования, строительства и эксплуатации деревянных мостов с железобетонной плитой ... С. 7–9.

²⁶ Белуцкий И.Ю., Глибовицкий Ю.С., Кулиш В.И. Экспериментальное исследование гибридных клееных балок. ... 1972.

²⁷ Белуцкий И.Ю. Об эффективности клееных армированных конструкций. ... 1972.

²⁸ Дмитриев П.А. Конструкции из дерева и пластмасс. ... 192 с.

²⁹ Ковтонюк В.А., Мельников Ю.О. Конструкции и выбор типов связей в объединенных деревобетонных мостовых балках. ... С. 79–89.

³⁰ Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures. Handbook 1: Timber Structures. 2008. pp. 63-227.23.

для средних пролетов 15–20 м рекомендованы гибкие связи сдвига в виде вертикальных цилиндрических нагелей, вклеиваемых в деревянные балки эпоксидным клеем. В работе приводятся графики изменения несущей способности деревобетонной балки в зависимости от податливости связей сдвига в пределах от балки, лишенной связей, до балки, лишенной сдвига. Для балок с вертикальными цилиндрическими нагелями установлены допустимые пределы податливости связей из стержней арматуры А-III. Указано, что отступления от указанных пределов в сторону снижения податливости увеличивает расход металла для связей, а повышение податливости уменьшает эффект сопротивления деревобетонных сечений действующим усилиям и приводит к перерасходу древесины.

Как показало время, предпочтение в нашей стране было отдано цилиндрическим нагелям, вклеиваемым в деревянные балки эпоксидным клеем. Разработанные рекомендации по виду и нормам размещения нагелей были закреплены в СНиПе. В известных публикациях³¹ [6,14,15], кроме рекомендуемых соединений, предлагается применение цилиндрических нагелей с головками петлевых выпусков, арматурных стержней, наклонно вклеенных в балки без практических рекомендаций. Недостатком рассмотренных нагельных соединений является консольная схема работы нагеля с защемлением его как в теле железобетонной плиты, так и в теле деревянной конструкции (прогоне, клееной балке т.п.), что существенно уступает двухопорному закреплению и работе нагеля по схеме двухопорной балки. В результате предложена конструкция соединения с использованием стальных накладок, закрепляемых к деревянной основе горизонтальными болтами (нагелями), с консольными выступами и отверстиями в них для пропуска арматурных стержней и стержней-упоров железобетонной плиты [18]. Данная конструкция

соединения отличается от известных нагельных соединений с консольным режимом работы наиболее эффективным балочным режимом. Ожидаемый эффект может перекрыть дополнительные затраты, связанные со стальными накладками. Аналогичные конструкции соединений подтверждены патентами РФ^{32,33}.

Опыт строительства и содержания деревянных мостов в Омской области под современные нагрузки

Основные результаты в области опытного проектирования и строительства современных деревянных мостов в Омской области приведены в сборнике «Мосты и дороги»³⁴. В составе выводов по работе следует отметить следующее:

- разработана и внедрена в практику строительства эффективная конструкция дощато-гвоздевых пролетных строений мостов для дорог IV и V технических категорий и дорог муниципальных образований с обеспечением грузоподъемности под нагрузку А11 и НК-80;

- срок службы мостов из ДГБ при соблюдении нормативной эксплуатации и обслуживании может быть обеспечен не менее 50 лет.

Деревобетонные пролетные строения с составными прогонами из бревен (брусев)

Как известно, возможности применения разбросных и сосредоточенных прогонов зависят от длины и диаметра стандартных бревен-заготовок, длина которых не превышает стандартных 7 м и не позволяет выполнить условие СП 35.13330.2011, согласно которого расстояние между промежуточными опорами в свету при наличии карче хода следует назначать не менее 15 м. На этом основании составные пролеты из семиметровых бревен (брусев) под современные нагрузки возможно применять только для сопрягаемых береговых пролетов³⁵. Для пролетных строений из древесины длиной 15 м и более необходимы специальные разработки. В соответствии с

³¹ Дмитриев П.А. Конструкции из дерева и пластмасс. ... 192 с.

³² Патент № RU 35636 U1 Российская Федерация, МПК E01D 2/04. Пролетное строение с составными прогонами из бревен и железобетонной плитой: № 2003129340/20: заявл. 06.10.2003: опубл. 27.01.2004 / В.А. Уткин, В.И. Пузиков, Е.Ю.Селезень. EDN GIWAKK.

³³ Патент № RU 2766385 C1 Российская Федерация, МПК E01D 2/00. Деревобетонное пролетное строение с составными прогонами из брусев и железобетонной плитой: № 2021110129: заявл. 13.04.2021: опубл. 15.03.2022 / В.А. Уткин. EDN XYVRJK.

³⁴ Уткин В.А., Пузиков В.И., Казанцев Б.И., Каретников М.Ю. О применении древесины для строительства мостов. ... 2014.

³⁵ Уткин В.А., Пузиков В.И., Казанцев Б.И., Каретников М.Ю. О применении древесины для строительства мостов. ... 2014.

этим требованиям в порядке эксперимента были разработаны пролетные строения длиной 15 м с составными прогонами из бревен (брусьев) и железобетонной плитой проезжей части, включенной в совместную работу с прогонами, под нагрузки А11 и НК80. Особенности данных конструкций, в отличие от ранее известных, состоят как в способах объединения бревен (брусьев) между собой по длине и по высоте, так и между составной деревянной конструкцией и железобетонной плитой^{36,37}.

Возможности применения составных прогонов и железобетонной плиты проезжей части в совместной работе при пролетах 15 м

были исследованы при строительстве опытного моста через р. Нягов на автомобильной дороге IV технической категории. В качестве несущих балок приняты четырехъярусные составные прогоны из бревен диаметром 30 см, в качестве соединительных элементов бревен – гребенчатые нагельные соединения, а для объединения монолитной железобетонной плиты с прогонами применены глухие цилиндрические нагели диаметром 16 мм, вклеиваемые в верхнюю поверхность прогона. Конструкция пролетного строения приведена на рисунке 1, процессы изготовления прогонов и плиты проезжей части – на фотографиях (рисунки 2, 3, 4).

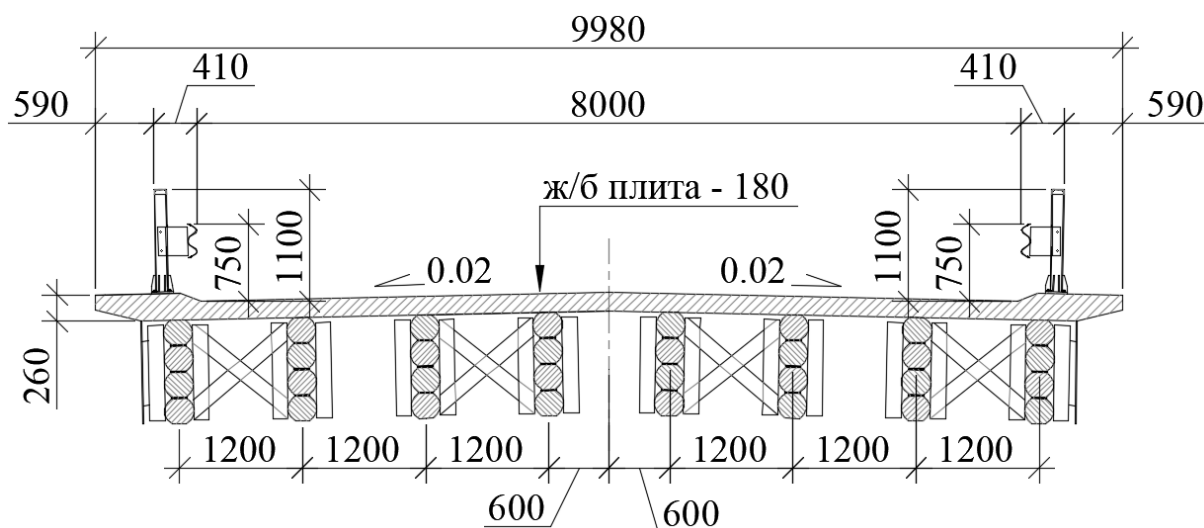


Рисунок 1 – Поперечное сечение пролетного строения моста через р. Нягов длиной 15 м с составными прогонами из бревен и монолитной железобетонной плитой
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Cross section of the bridge span across the Nyagov River, 15 m long, composite beams made of logs and monolithic reinforced concrete slab.
Source: completed by authors.

³⁶ Патент № RU 35636 U1 Российская Федерация.

³⁷ Патент № RU 2766385 C1 Российская Федерация.



Рисунок 2 – Изготовление составных прогонов из бревен длиной 15 м
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Manufacturing process of composite beams based on the use of logs 15 m long.
Source: completed by authors.



Рисунок 3 – Изготовление железобетонной плиты проезжей части
(опалубочные работы и устройство нагельных соединений)
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Manufacturing reinforced concrete driveway slab
(formwork and nail joints).
Source: completed by authors.



Рисунок 4 – Испытание моста через р. Нягов.
Установка временной нагрузки
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Testing the bridge over the Nyagov River.
Temporary load application
Source: completed by authors.

Соединение бревен по высоте содержит стальные накладки и жестко закрепленные в них сваркой цилиндрические глухие нагели, вклеиваемые в тело окантованных бревен, сопрягаемых между собой посредством наложения окантованных поверхностей друг на друга, зеркального совмещения стальных накладок, установки стяжных болтов и сварки кромок стальных накладок фланговыми швами (см. рисунок 2). Соединение бревен по длине выполняется посредством двухсторонних боковых накладок и стальных болтов. Объединение составных прогонов с монолитной железобетонной плитой посредством глухих цилиндрических нагелей представлено на рисунке 3.

Работа конструкции деревожелезобетонного пролетного строения была проверена статическими и динамическими испытаниями моста временной нагрузкой (см. рисунок 4). Результаты испытаний пролетного строения $L=15.0$ м показали, что железобетонная плита эффективно включается в совместную работу с прогонами. При всех схемах загрузки отмечено соответствие результатов экспериментального исследования и теоретического расчёта. Полученные результаты подтвердили проектные характеристики жёсткости деревожелезобетонного пролетного строения с составными прогонами из бревен.

В качестве аналога, приведенного выше решения, может найти применение в строительстве конструкция пролетного строения с составными прогонами из брусьев и железобетонной плиты³⁸, отличающейся от прототипа тем, что многоярусные прогоны составлены из брусьев, плотно уложенных друг на друга и объединенных между собой по боковым плоскостям парными стальными накладками и сквозными болтами как в местах поперечных стыков, так и по продольным швам, причем для объединения составных прогонов с монолитной железобетонной плитой верхние брусья прогонов снабжены закрепленными к ним на болтах и распределенными с определенным интервалом по длине пролета стальными парными накладками с выступами и отверстиями для пропуска гибких стержневых упоров.

Применение составных прогонов из бруса и объединение их для совместной работы между собой и с монолитной железобетонной плитой парными стальными накладками позволяет существенно упростить процесс изготовления прогонов, снизить трудоемкость устройства соединений, повысить их надежность и доступность при эксплуатации за счет применения горизонтальных цилиндрических нагелей. При этом наиболее прогрессивным решением, отвечающим требованиям совместной работы

³⁸ Мельников Ю.О. Определение несущей способности объединенных деревобетонных балок. ... 1968.

железобетонной плиты проезжей части и несущей деревянной конструкции, может быть деревобетонное пролетное строение из клееных балок заводского изготовления и включенной в совместную работу с ними железобетонной плиты из монолитного железобетона посредством стальных парных накладок с выступами для размещения в плите стержневых упоров.

Опыт деревобетонных мостов с клееными балками и железобетонной плитой

50 лет назад в учебнике³⁹ проф. Е.Е. Гибшман отметил: «В США широко применяют конструкции с клееными балками прямоугольного сечения, покрытыми сверху железобетонной плитой проезжей части, бетонируемой на месте и связываемой с балками с помощью металлических выпусков, прикрепленных к балкам и входящих в бетон». Эти прогрессивные конструкции не нашли достойного применения в дорожном строительстве нашей страны до сих пор, хотя в 60–70-е годы более 100 мостов с клееными балками полигонного изготовления и деревянной проезжей частью были построены в Архангельской области и республике Коми⁴⁰. При этом построенные с деревянной проезжей частью и деревянными опорами мосты выходили из строя значительно раньше установленного срока 25-летней службы для деревянных мостов, в то время как клееные балки оставались пригодными для повторного применения, но уже на построечных дорогах.

В то время вопросами совершенствования деревянных мостовых конструкций занимались многие проектные и научные коллективы страны, но приоритет в области мостового строительства был отдан железобетонным мостам. Применение же деревянных мостов на автомобильных дорогах остановилось и не получило развития, а приобретенные за рубежом заводы по изготовлению современных клееных конструкций обслуживают в настоящее время запросы промышленно-гражданского строительства.

Однако применение клееных балок заводского изготовления, отличающихся высоким качеством и индустриальностью изготовления, надежностью и долговечностью при выполнении необходимых защитных мероприятий и устройстве монолитной железобетонной плиты проезжей части, в состоянии обеспечить сопоставимый с железобетонными мостами срок службы. Это позволит существенно снизить трудозатраты, связанные с изготовлением, транспортом, монтажом достаточно трудоемких и дорогих железобетонных конструкций, заменив их более легкими и доступными конструкциями лесного производства и конструкциями из монолитного железобетона.

На рисунке 5 представлена конструкция заявляемого деревобетонного пролетного строения из клееных балок, включенных в совместную работу с железобетонной плитой проезжей части.

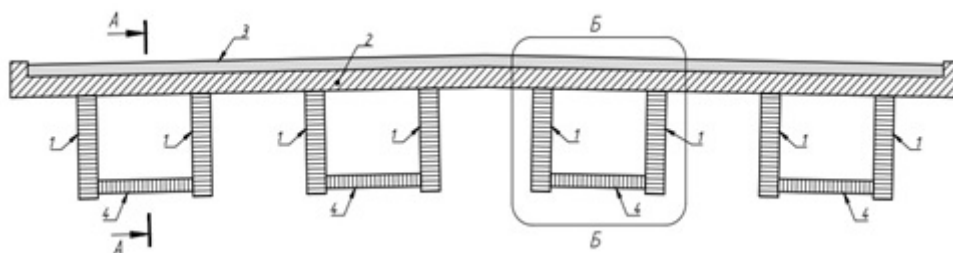


Рисунок 5 – Деревобетонное пролетное строение с балками из клееной древесины заводского изготовления.

Поперечное сечение

Источник: составлено авторами.

Figure 5– Timber-concrete span structure with beams of factory-made laminated timber.
Cross section.

Source: completed by authors.

³⁹ Гибшман Е.Е. Проектирование деревянных мостов. ... 272 с.

⁴⁰ Уткин В.А., Пузиков В.И., Казанцев Б.И., Каретников М.Ю. О применении древесины для строительства мостов. ... 2014.

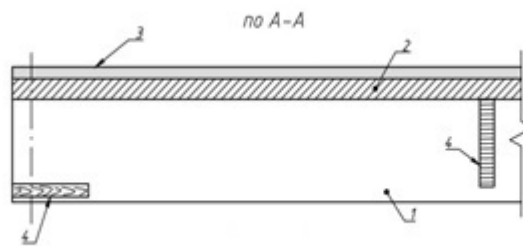


Рисунок 6 – Деревобетонное пролетное строение с балками из клееной древесины заводского изготовления. Сечение по А-А на длине полупролета
Источник: составлено авторами.

Figure 6– Timber-concrete span structure with beams of factory-made laminated timber. A-A cross-section at the half span length. Source: completed by authors.

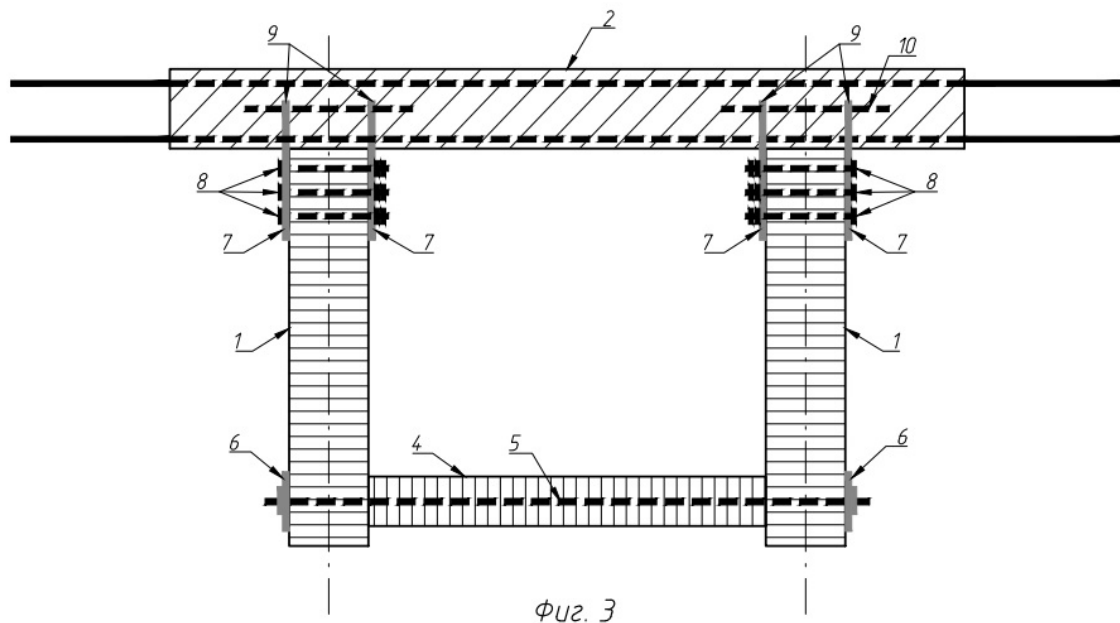


Рисунок 7 – Поперечное сечение деревобетонной секции пролетного строения с узлом объединения ж.б. плиты и клееных балок. Узел В-В
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – The cross-section of a timber-concrete section of a span with a joint of a reinforced concrete slab and glulam beams. Node B-B. Source: completed by authors.

Пролетное строение (рисунки 5, 6, 7) составлено из объединенных попарно клееных балок 1, установленных на опоры с учетом поперечного уклона и объединенных монолитной железобетонной плитой 2 с устройством гидроизоляции и ездового полотна, причем для совместной работы клееных балок 1 с монолитной железобетонной плитой 2 верхние

поояса клееных балок снабжены закрепленными к ним на болтах 8 и распределенными с определенным интервалом по длине пролета стальными парными накладками 7 с выступами 9 и гибкими упорами 10.

При этом устройство горизонтальных диафрагм в опорных зонах устранил перенапряжение и сохранность опорных зон и сечений.



Рисунок 8 – Общий вид моста через р. Тевриз на участке 76+150 км
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – General view of the bridge over the Tevriz River
Source: completed by authors.

Пролетные строения из дощато-брусчато-нагельно-гвоздевых блоков с железобетонной плитой проезжей части

Как известно⁴¹, в Омской области в период с 2003 г. по настоящее время был построен целый ряд мостов под современные нагрузки с пролетными строениями из дощато-гвоздевых блоков. В практику строительства была внедрена деревянная конструкция пролетных строений пролетом 15 м для дорог IV и V технической категории с обеспечением расчетной грузоподъемности под нагрузку А11 и НК-80. Изготовление конструкций не требовало сложного вспомогательного оборудования, отличалось простотой строительных процессов и возможностью использования местных рабочих кадров.

Опыт содержания и эксплуатации мостов в течение 15 лет, результаты двух испытаний временной нагрузкой позволил положительно оценить их состояние в условиях действующих нагрузок, выявить некоторые недостатки первоначальной конструкции, подтвердить проектные характеристики и внести предложения по дальнейшему совершенствованию этих решений. Общее состояние построенных и эксплуатируемых в настоящее время в Омской области деревянных мостов с дощато-нагельно-гвоздевыми блоками пролетных

строений можно считать удовлетворяющим современным требованиям к мостам и нагрузкам. На рисунке 8 представлен общий вид моста через р. Тевриз, построенного в 2016 г.

Мост состоит из пяти пролётов с ездой поверху, запроектирован в соответствии с требованием СП 35.13330.2011. п.6.11 для деревянных мостов под нагрузку А11, НК-80. Полная длина моста составляет 76,5 м. Полная ширина моста (расстояние между внутренними гранями перил) – 11,30 м. Общая толщина слоев проезжей части составляет 0,19 м. Все пролёты моста перекрыты дощато-гвоздевыми блоками коробчатого сечения индивидуального проектирования. В поперечном сечении размещено четыре блока с расстоянием между осями по 2,3 м. Срок службы, рекомендованный СП35.13330.2011, составляет 35 лет для деревянных мостов. Общее состояние моста оценивается службами в настоящее время как удовлетворительное и ремонтнопригодное.

Автодорожный мост через р. Малый Тевриз (рисунок 9) на участке 75+300 км автомобильной дороги IV технической категории «Большие Уки – Тевриз» в том же районе Омской области был введен в эксплуатацию в 2013 г. Срок эксплуатации моста 11 лет. Отличается от предыдущего моста наибольшим числом характерных для данной конструкции повреждений.

⁴¹ Уткин В.А., Пузиков В.И., Казанцев Б.И., Каретников М.Ю. О применении древесины для строительства мостов. ... 2014.



Рисунок 9 – Общий вид моста через р. Малый Тевриз на 75+300 км
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – General view of the bridge over the MalyeTeyvriy River
Source: completed by authors.

Мост рассчитан на временные вертикальные нагрузки А11, НК-80 в соответствии с СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы». Пролёты перекрыты дощато-гвоздевыми блоками коробчатого сечения индивидуальной проектировки с усилением нижних поясов в середине пролёта дополнительным рядом бруса, что позволило разместить в поперечном сечении три блока вместо четырех на мосту через р. Тевриз (см. рисунок 8). В обоих мостах пояса пролетного строения выполнены из брусков сечением 175 х 150 мм. Пиломатериал – древесина сосны. Соединительными элементами являются гвозди, нагели и стяжные болты, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 4028–63, ГОСТ 5781–82. Плита проез-

жей части представляет собой деревянную деревоплиту из брусков 150 х 150 мм, объединённую с дощато-гвоздевыми блоками стяжными болтами и нагелями.

При этом проезжая часть построенных мостов с поперечной брусчатой деревоплитой, подуклонкой из пескоцемента и железобетонными плитами дорожного покрытия не обеспечивает качественную защиту деревоплиты от увлажнения, особенно в местах повреждения гидроизоляции, размещения колесоотбойного бруса и тротуаров, хотя в целом защищает дощато-гвоздевые блоки от прямого увлажнения осадками.

Характерные повреждения моста представлены на рисунках 10, 11, 12, 13.



Рисунок 10 – Следы протечек воды и мест гниения поперечного настила у шкафной стенки
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Evidence of water leaks and areas of rotted cross decking at the bank abutment.
Source: completed by authors.



Рисунок 11 – Следы протечек воды и мест гниения поперечного настила над промежуточной опорой
Источник: составлено авторами.

Figure 11 – Evidence of water leaks and rotted areas in the cross deck above the intermediate abutment.
Source: completed by authors.



Рисунок 12 – Следы протечек воды и мест гниения стенки из перекрестных досок
Источник: составлено авторами.

Figure 12 – Evidence of water leaks and rotting areas in the cross-board wall.
Source: completed by authors.



Рисунок 13 – Разрушение колесоотбойного бруса, пораженного гнилью
Источник: составлено авторами.

Figure 13 – Destruction of wheel block affected by rot.
Source: completed by authors.

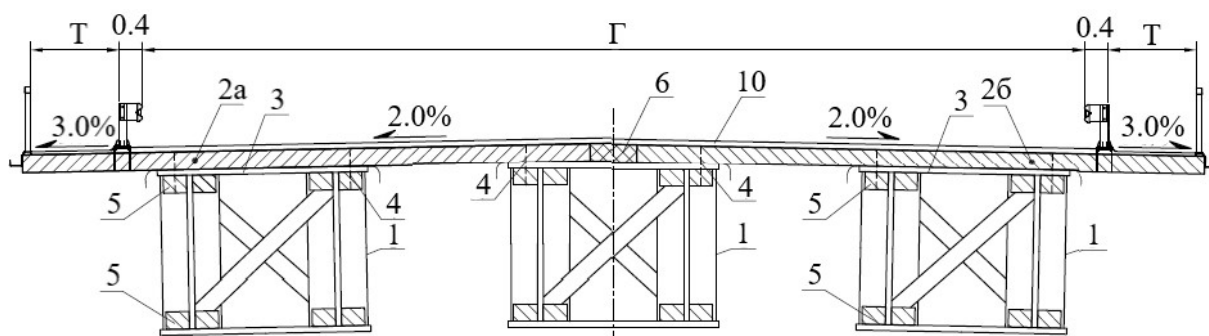


Рисунок 14 – Поперечное сечение дощато-гвоздевого пролетного строения со сборной железобетонной плитой проезжей части
Источник: составлено авторами.

Figure 14 – Cross section of board-and-nail span with precast reinforced concrete roadway slab
Source: completed by authors.

По результатам обследования данных мостов, выполненного проектно-исследовательской фирмой «ПИК» в 2024 г., можно заключить, что сооружения находятся в удовлетворительном и ремонтнопригодном состоянии. По мосту допускается пропуск автотранспорта при движении в неконтролируемом потоке по схеме А11, НК 80. Межремонтный срок определен в 8 месяцев.

Однако обращают на себя следующие рекомендации проектировщиков:

а) по проезжей части: 1 – требуется перекладка плит проезжей части с учетом обеспечения нормативного продольного и поперечного уклонов; 2 – требуется замена гидроизоляционного покрытия; 3 – требуется замена колесоотбойного бруса;

б) по пролетным строениям требуется: 1 – замена поврежденных брусьев; 2 – замена поперечного настила; 3 – очистка от коррозии и покраска болтов.

При этом сохранность несущих дощато-гвоздевых блоков практически обеспечивается за счет конструктивных мероприятий без повреждений и может быть гарантирована на проектный срок эксплуатации и содержания.

Вполне очевидно, что отмеченные повреждения и дефекты связаны с недостаточными защитными свойствами проезжей части мостов. В этих условиях необходимо проведение постоянных защитных мероприятий с увеличением затрат по содержанию и капитальному ремонту построенных мостов.

В случае капитального ремонта может быть предложена конструкция проез-

жей части из сборных железобетонных плит специального изготовления, уложенных поперек на всю ширину моста на несущие дощато-брусчато-нагельные-гвоздевые блоки с объединением их между собой над средним блоком продольным швом из монолитного железобетона (рисунок 14). При этом вместо конструкции пролетного строения с четырьмя дощато-гвоздевыми блоками может быть применена конструкция, содержащая 3 блока с усиленными поясами. Данная конструкция позволит существенно снизить материалоемкость древесины, уменьшить трудозатраты и стоимость, увеличить защитные свойства, а следовательно, долговечность пролетного строения. Все это в целом отвечает современным требованиям, связанным с обеспечением жизнестойкости, надежности, срока службы и капитальности деревянных мостов.

Опыт проектирования и строительства деревобетонных мостов с клееными балками сталежелезобетонных мостов указывает на эффективность включения железобетонной плиты проезжей части в совместную работу с главными балками. Основным препятствием для конструктивного объединения монолитной железобетонной плиты с блоками ДГБ для работы на сдвиг было отсутствие способов таких соединений, кроме известных нагельных. Однако реализовать данные соединения в виду насыщенности верхних брусчатых поясов ДГБ поперечными нагельными скреплениями практически невозможно.

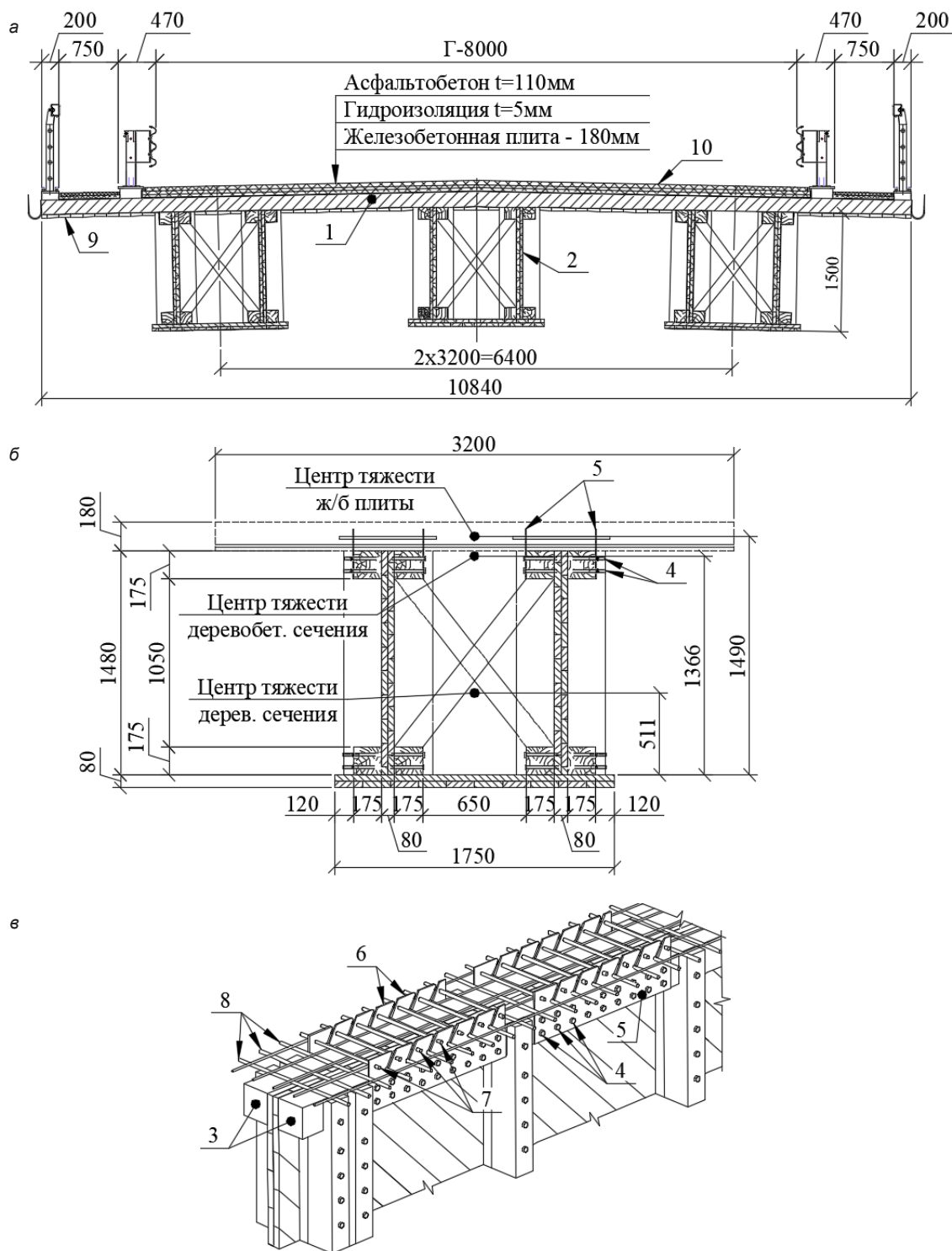


Рисунок 15 – Поперечное сечение дощато-гвоздевого пролетного строения с монолитной железобетонной плитой проезжей части:
а – общий вид; б – конструкция отдельного блока;
в – конструкция объединения дощато-гвоздевых блоков с железобетонной плитой
Источник: составлено авторами.

Figure 15 – Cross-section of board-and-nail span with monolithic reinforced concrete roadway slab.
а – general view; б – single block design;
в – design of jointed board-and-nail blocks and reinforced concrete slab.
Source: completed by authors.

Сотрудниками кафедры мостов была запатентована конструкция⁴² (рисунок 15), держащая комбинированные коробчатые несущие блоки из древесины и монолитной железобетонной плиты проезжей части, объединенные для совместной работы гребенчатыми стальными накладками со стержневыми упорами.

Устройство объединения монолитной железобетонной плиты и дощато-гвоздевой конструкции (рисунок 15, в) содержит гребенчатые парные стальные накладки 5, закрепляемые к брускам 3 поясов сквозными стальными болтами (нагельными) 4 для объединения поясов ДГБ со стенками. Входящие в монолитное тело железобетонной плиты 1 гребенчатые выступы 6 снабжены стержневыми упорами 7, обеспечивающими совместную работу железобетонной плиты и блоков. Отверстия и вырезы гребенчатых выступов предназначены для пропуска арматурных стержней железобетонной плиты.

В отличие от конструкции на рисунке 14 дощато-брусчато-нагельно-гвоздевые блоки изготовлены без двухслойного усиления верхнего пояса перекрестными досками в виде открытого сверху корытного профиля.

Предложенная конструкция соединительных устройств ДГБ с железобетонной плитой проезжей части позволяет с наибольшим успехом применять деревобетонные пролетные строения на основе совместной работы железобетонной плиты и дощато-брусчато-нагельно-гвоздевых блоков. Можно с уверенностью утверждать о целесообразности их применения на автомобильных дорогах в нашей стране.

Деревобетонные композитные конструкции, хотя и обладают относительно небольшой историей применения, являются перспективным направлением в транспортном и гражданском строительстве. Они имеют ряд преимуществ в сравнении с железобетонными и деревянными конструкциями и способны занять достойное место в мостостроении.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Установлено, что многовековой опыт применения древесины в мостостроении указал на необходимость защиты мостовых сооружений от увлажнения осадками в виде дождя

и мокрого снега, что принуждало в далеком прошлом устраивать над деревянными мостами крыши. Длительный период в качестве защитных мероприятий деревянных мостов использовали антисептирование древесины. Особенно эффективно этот метод защиты проявил себя в железнодорожных мостах при пропитке шпал и мостового бруса креозотом. Но с внедрением в практику железнодорожного строительства железобетонных предварительно напряженных шпал потребность в пропитке мостового бруса отпала, а пропиточные заводы ликвидированы. Вместе с этим исчезла возможность попутного применения глубокой пропитки для элементов деревянных автомобильных мостов, а способы поверхностной обработки деревянных конструкций на второстепенных автомобильных дорогах выполняются с большими отступлениями и нарушениями норм содержания мостов. Все это требует новых решений по применению древесины в дорожном строительстве.

Применение деревобетонных пролетных строений мостов с железобетонной проезжей частью, являющейся одновременно несущей конструкцией и защитной крышей для деревянных конструкций, позволяет обеспечить требуемую долговечность и сохранность мостовых сооружений в установленные нормативные 50 лет.

Практическое применение в настоящее время могут получить деревобетонные пролетные строения мостов с:

- 1) составными прогонами из бревен и брусев;
- 2) клееными балками заводского изготовления и
- 3) дощато-брусчато-нагельно-гвоздевыми блоками полигонного изготовления.

При этом поверхностная обработка деревянных конструкций водостойкими антисептиками будет надежным средством для защиты от грибковых заболеваний всегда сухих и проветриваемых элементов мостовых конструкций.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В сборнике «Дороги и мосты» дорожного агентства РОСАВТОДОР Выпуск 32/2¹ было отмечено: «В тесном сотрудничестве проектно-исследовательской фирмы «ПИК» и ка-

⁴² Патент № RU 2731968 С1 Российская Федерация, МПК E01D 2/04. Деревобетонное пролетное строение из дощато-брусчато-нагельно-гвоздевых блоков с железобетонной плитой, включенной в совместную работу с блоками: № 2019117816: заявл. 07.06.2019: опубл. 09.09.2020 / В.А. Уткин, И.И. Готовцев. EDN CMPADP.

федры «Мосты» с КУ «УДХ Омской области в период с 2003 по 2013 г. были построены мосты с пролетными строениями длиной 15 м из дощато-гвоздевых блоков. Все деревянные конструкции мостов были изготовлены в ДРСУ «Знаменское». Открывалась новая страница в развитии и применении новых деревянных мостов при современных нагрузках. В данной статье приводятся результаты содержания построенных мостов. Отмечается их удовлетворительное состояние, соответствие современным требованиям по нагрузкам, интенсивности движения. Вместе с тем обращает на себя внимание недостаточная защищенность элементов деревянной проезжей части от увлажнения и последующего разрушения от гниения. Все это приводит к осложнению и удорожанию содержания моста, связанных с выборочной заменой непригодных элементов. Предлагаемые в статье новые решения по внедрению в производство деревобетонных пролетных строений исключают проявление отмеченных недостатков и повышают долговечность и надежность мостов с применением древесины.

К сожалению, в настоящее время «ОМСКАВТОДОР» в сотрудничестве с кафедрой мостов СИБАДИ по развитию, совершенствованию и применению деревобетонных мостов отказывает, ссылаясь на надежность известных и дорогих железобетонных мостов. Вместе с тем для обеспечения планируемого срока службы 50 лет уже построенных с деревянной проезжей частью мостов в любом случае необходима реконструкция с заменой деревянной проезжей части с железобетонными плитами покрытия на железобетонную с асфальтобетонным покрытием.

Таким образом, преимущества предлагаемых новых конструкций деревобетонных пролетных строений для внедрения в дорожном строительстве очевидны.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Уткин В.А., Матвеев С.А. Проектирование деревянных мостов на автомобильных дорогах лесного комплекса // Известия вузов. Лесной журнал. 2023. № 1. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-126-152>
2. Уткин В.А., Кобзев П.Н. Автодорожные деревянные мосты нового поколения: монография. Омск, 2004. 55 с. EDN: QNSFKH
3. Rodriguest J.N., Dias A.M.P.G., Providenciat P. Timber-concrete composite bridges: State-of-the-Art-Review. «Review of TCC bridges». Bioresources. 2013; 8(4): 6630–6649. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.8.4.6630-6649>
4. Wiio M., Jutila A., Makipuro R., Salokangas L., Wistbara J. Research project development of wood bridges, literature survey of shear connections of wood-concrete composite bridges. Helsinki University of Technology. Laboratory of bridge Engineering. 1994, no. 7. p. 14.
5. Linden M.L.R. Timber-concrete composite beams. HERON. 1999. Vol. 44. no3.
6. Стуков В.П. Совершенствование конструктивно-технологической системы пролетного строения с деревожелезобетонными балками // Известия вузов. Лесной журнал. 2004. № 3. С.56–60.
7. Wacker J., Dias A. 100-Year Performance of Timber–Concrete Composite Bridges in the United States // Journal of Bridge Engineering. October 2020. 25(3). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001513](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001513).
8. Yeoh D., Fragiaco M., De Franceschi M., Heng Boon K. State of the Art on Timber-Concrete Composite Structures: Literature Review // Journal of structuring engineering. October 2011. p.1085–1095. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000353](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000353)
9. Frohnmüller J., Fischer J., Seim W. Full-scale testing of adhesively bonded timber-concrete composite beams // Materials and Structures. 2021; 54: 187. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01766-y>
10. Fuchsli M., Grönquist P., Stucki S., Mamie T., Kelch S., Burgert I., Andrea Frangi A. Push-out tests of wet-process adhesive-bonded beech timber-concrete and timber-polymer-concrete composite connections. WCTE. 2023: 3241–3247. DOI: <https://doi.org/10.52202/069179-0422>.
11. Lacis R., Circular hollow section connectors in timber-concrete CC composite structural elements // The Baltic journal of road and bridge engineering. 2016; Volume 11(1): 70–76. DOI: <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2016.08>
12. Hosseini M., Gaff M., Lair J., Hui D., Haitao L., Hosseini A., Ghosh P., Jian B. Design and analysis of timber-concrete-based civil structures and its applications: A brief review // Advanced Materials Science. 2023; 62. DOI: <https://doi.org/10.1515/rams-2022-0321>
13. Soalih H., Demir S. Current practice and recent developments of shear connectors for timber concrete composite applications: A state of the art review // Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics. 2023; 6(5): p. 422–440. DOI: <https://doi.org/10.31462/jseam.2023.05422440>
14. Стуков В.П. Анализ состояния мостов с балками из клееной древесины // Известия вузов. Лесной журнал. 2006. № 6. С.52–57. EDN: HDXGQA.
15. Стуков В.П. Деревожелезобетонные балочные мосты на автомобильных дорогах: монография; ф-л «Севмашвуз» С-Петербург. Морск. гос. техн. ун-та в г. Северодвинске. 2-е изд. испр. и доп. Архангельск, 2009. 453 с.
16. Стуков В.П. Оптимизация расстановки связей между ветвями деревожелезобетонного пролетного строения автодорожного моста // Известия вузов. Лесной журнал. 2010. № 2. С.78–82.

17. Стуков В.П. Деревожелезобетонные ба-
почные мосты: состояние, теория, исследование,
проектирование: монография. Архангельск: Сев.
(Арктич.) федер. ун-т, 2014. 316 с.

18. Уткин В.А., Готовцев И.И. Применение гре-
бенчатых упоров для объединения железобетонной
плиты и дощато-гвоздевой конструкции пролетно-
го строения моста // Вестник СибАДИ. 2020; 17(3):
414–427. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-3-414-427>

REFERENCES

1. Utkin V.A., Matveev S.A. Features of Design-
ing Wooden Bridges of the Forest Complex. *Lesnoy-
Zhurnal = Russian Forestry Journal*. 2023; 1: 126–152.
(In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-126-152>

2. Utkin V.A., Kobzev P.N. *Road timber bridg-
es of a new generation: monograph*. Omsk. 2004: 55.
EDN: QNSFKH

3. Rodrigues J.N., Dias A.M.P.G., Providencia
P. Timber-concrete composite bridges: State-of-the-
Art-Review. «Review of TCC bridges». *Bioresources*.
2013; 8(4): 6630–6649. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.8.4.6630-6649>

4. Wiio M., Jutila A., Makipuro R., Salokan-
gas L., Wistbara J. Research project development of
wood bridges, literature survey of shear connections
of wood-concret composite bridges. Helsinki Univer-
sity of Technology. *Laboratory of bridge Engineering*.
1994; 7: 14.

5. Linden M.L.R. Timber-concrete composite
beams. *HERON*. 1999; Vol.44 no 3.

6. Stukov V.P. Improvement of Construc-
tive-technological System of Bridge Framework with
Wood-Reinforced Concrete Beams. *Lesnoy Zhurnal =
Russian Forestry Journal*. 2004; 3: 56–60. (In Russ.)

7. Wacker J., Dias A. 100-Year Performance of
Timber–Concrete Composite Bridges in the United
States. *Journal of Bridge Engineering*. October 2020;
25(3). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001513](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001513).

8. Yeoh D., Fragiaco M., De Franceschi M.,
Heng Boon K. State of the Art on Timber-Concrete
Composite Structures: Literature Review. *Journal
of structuring engineering*. October 2011: 1085–
1095. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000353](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000353)

9. Frohnmüller J., Fischer J., Seim W. Full-scale
testing of adhesively bonded timber-concrete compos-
ite beams. *Materials and Structures*. 2021; 54:187.
DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01766-y>

10. Fuchslin M., Grönquist P., Stucki S., Mamie
T., Kelch S., Burgert I., Andrea Frangi A. Push-out tests
of wet-process adhesive-bonded beech timber-con-
crete and timber-polymer-concrete composite con-
nections. *WCTE*. 2023: 3241–3247. DOI: <https://doi.org/10.52202/069179-0422>.

11. Laciš R., Circular hollow section connectors
in timber-concrete CC composite structural elements.
The Baltic journal of road and bridge engineering. 2016;
Volume 11(1): 70–76. DOI: <https://doi.org/10.3846/bjr-be.2016.08>

12. Hosseini M., Gaff M., Lair J., Hui D., Haitao L.,
Hosseini A., Ghosh P., Jian B. Design and analysis of
timber-concrete-based civil structures and its appli-
cations: A brief review. *Advanced Materials Science*.
2023; 62. DOI: <https://doi.org/10.1515/rams-2022-0321>

13. Soalih H., Demir S. Current practice and re-
cent developments of shear connectors for timber con-
crete composite applications: A state of the art review.
Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics.
2023; 6(5): 422–440. DOI: <https://doi.org/10.31462/jseam.2023.05422440>

14. Stukov V.P. Analysis of the state of bridges
with beams made of glued wood. *Lesnoy Zhurnal =
Russian Forestry Journal*. 2006; 6: 52–57. (in Russ.)
EDN: HDXGQA

15. Stukov V.P. *Reinforced concrete girder bridg-
es on highways: monograph*. branch «Sevmashvuz»
St. Petersburg. Maritime State Technical University in
Severodvinsk. 2nd edition. corrected and expanded.
Arkhangelsk, 2009: 453. (in Russ.)

16. Stukov V.P. Optimization of Connections
Placement among Branches in Wood Reinforced Con-
crete Beam of Road Bridge Superstructure. *Lesnoy
Zhurnal = Russian Forestry Journal*. 2010; 2: 78–82.
(in Russ.)

17. Stukov V.P. *Reinforced concrete wooden gird-
er bridges: condition, theory, research, design; mono-
graph*. Arkhangelsk: North (Arctic) Federal University.
2014: 316. (in Russ.)

18. Utkin V.A., Gotovtsev I.I. Crested shear con-
nectors application to combine reinforced concrete
slab and plank-nailed structure of bridge span. *The
Russian Automobile and Highway Industry Journal*.
2020; 17(3): 414–427. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-3-414-427>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Уткин В.А. Формулирование темы, цели и за-
дач исследования, анализ разработанности темы
другими исследователями, обработка данных и
формулирование выводов, подготовка текста
статьи (40%).

Кобзев П.Н. Сбор материалов и исследование
деревянных мостов нового поколения, обработка
данных, подготовка текста статьи (25%).

Басич Е.Е. Сбор библиографических источни-
ков, редактирование текста статьи (10%).

Скиба В.В. Сбор материалов и обработка ре-
зультатов обследований и испытаний мостов,
сбор библиографических источников, редактиро-
вание текста статьи (25%).

CONTRIBUTIONS CO-AUTHORS

Utkin V.A. Concept design, goals and objectives of
the research, state-of-the-art analysis, processing data
and making conclusions, writing the manuscript (40%).

Kobzev P.N. Collecting materials, research into
new-generation wooden bridges, data processing, writ-
ing the manuscript (25%).

Basich E.E. Collecting literature sources, editing the text of the manuscript (10%).

Skiba V.V. Collecting materials and processing the survey results, collecting literature sources, editing the manuscript (25%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Уткин Владимир Александрович – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Мосты и тоннели» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (644080, г. Омск, просп. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2044-3242>,

SPIN-код: 4216-7640,

e-mail: prof.utkin@mail.ru

Кобзев Павел Николаевич – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Мосты и тоннели» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (644080, г. Омск, просп. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0947-6227>,

SPIN-код: 6878-0269,

e-mail: kpn_omsk@mail.ru

Басич Евгений Евгеньевич – аспирант Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (644080, г. Омск, просп. Мира, просп. д. 5), инженер-проектировщик ООО Проектно-инжиниринговая компания «Мостовик».

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3573-4759>,

e-mail: evgeniybasich@yandex.ru

Скиба Виктория Витальевна – аспирант, преподаватель кафедры «Мосты и тоннели» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (644080, г. Омск, просп. Мира, просп. д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0126-0076>,

SPIN-код: 1780-4487,

e-mail: viktoriya.skiba.97@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Utkin Vladimir A. – Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor; Bridges and Tunnels department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644080).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2044-3242>,

SPIN-code: 4216-7640,

e-mail: prof.utkin@mail.ru

Kobzev Pavel N. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor; Bridges and Tunnels department, Siberian State Automobile and Road University (SibADI) (644050, Omsk, ave. Mira, 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0947-6227>,

SPIN-code: 6878-0269,

e-mail: kpn_omsk@mail.ru

Basich Evgeny E. – postgraduate student Siberian State Automobile and Road University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644080), design engineer ООО MOSTOVIK ENGINEERING COMPANY.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3573-4759>,

e-mail: evgeniybasich@yandex.ru

Skiba Victoria V. – postgraduate student, lecturer, Bridges and Tunnels department, Siberian State Automobile and Road University (SibADI) (5, Prospect Mira, Omsk, 644080).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0126-0076>,

SPIN-код: 1780-4487,

e-mail: viktoriya.skiba.97@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются рукописи по направлениям: Транспорт. Транспортные и технологические машины; Строительство. Строительные материалы и изделия; Редакция принимает к рассмотрению **оригинальные научные статьи** объемом 8–10 стр. машинописного текста через 1 интервал, 5–8 рисунков и (или) таблиц, 20–40 ссылок; **обзорные статьи** – (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – от 10 и более страниц, от 5 и более рисунков, до 80 ссылок.

Статья должна быть неопубликованной ранее в других изданиях, написана в контексте современной литературы, обладать новизной и соответствовать профилю журнала. Автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирования и ссылок на официальные документы и другие источники. Редакция принимает на себя обязательство ограничить круг лиц, имеющих доступ к присланной в редакцию рукописи, сотрудниками редакции, членами редколлегии, а также рецензентами данной работы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий статья будет **ретрагирована** (отозвана из печати).

Следует уделить особенное внимание качеству перевода. Недопустимо при переводе пользоваться машинами-переводчиками. Перевод должен быть выполнен профессиональными переводчиками, а лучше – носителем английского языка. Необходимо учесть, что законодательство охраняет права переводчиков авторским правом наравне с правами авторов оригинальных произведений. Перевод текста – творческий процесс, производный объект авторского права, т.е. переводчик – соавтор нового произведения.

1 УДК. На первой странице, слева в верхнем углу без отступа, указываются индекс по универсальной десятичной классификации (УДК) (размер шрифта 10 пт).

2. Заглавие статьи. Заголовок (максимально 10-12 слов) должен быть информативным, лаконичным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы. Приводится на русском и английском языках, по центру полужирным шрифтом размером 12 пт. прописными буквами.

3. Фамилии авторов. Количество авторов не должно превышать четырех. Для англоязычных метаданных важно соблюдать вариант написания сведений об авторе в последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия (Anna V. Ivanova). При латинизации фамилии можно воспользоваться системой 1 BSI – Британский Институт Стандартов (British Standards Institution) транслитерации на сайте <https://translit.ru>, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи обычным шрифтом (размер шрифта 12 пт.).

4. Аннотация. Аннотация включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе научная статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению, объем от 200 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Приводится на русском и английском языках. Начинается словом «Аннотация» с прописной буквы (шрифт полужирный, курсив, 10 пт); точка; затем с прописной буквы текст (курсив, 10 пт).

5. Ключевые слова служат ориентиром для читателя и используются для поиска статей в электронных базах, поэтому должны отражать дисциплину (область науки, в рамках которой написана статья), тему, цель и объект исследования. Рекомендуемое количество ключевых слов – 10–12, количество слов внутри ключевой фразы – не более трех.

Размещаются после аннотации, на русском и английском языках.

6. Благодарности. Раздел включен в требования всеми крупными издательствами. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

7. Основные положения. Отражают ключевые результаты исследования, основное содержание статьи, изложенные тезисно и оформленные в виде 3–5 пунктов маркированного списка.

8. Основной текст статьи излагается на русском или английском языках, в электронном и бумажном виде (шрифт «Arial» (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный), в следующей последовательности:

Введение (1–4 стр.) В этом разделе описываются общая тема исследования, цели и задачи планируемой работы, теоретическая и практическая значимость, приводятся наиболее известные и авторитетные публикации по изучаемой теме, обозначаются нерешенные проблемы. Данный раздел должен содержать обоснование необходимости и актуальности исследования. Информация во Введении должна быть организована по принципу «от общего к частному».

Подразделы введения представлены на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Методы и материалы (от 2 стр. и более) В этом разделе в деталях описываются методы, которые использовались для получения результатов. Обычно сначала дается общая схема экспериментов/исследования, затем они представляются настолько подробно и с таким количеством деталей, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, организационных или структурных диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. Если было получено много похожих зависимостей, представляемых в виде графиков, то приведите только один типичный график, а данные об имеющихся количественных отличиях между ними, представьте в таблице.

Способы представления результатов представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Обсуждение и заключение. Раздел содержит интерпретацию полученных результатов исследования, предположения о полученных фактах, сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

9. Список источников (References)

В список источников включаются только те источники, которые автор использовал при подготовке статьи. Оформление библиографического списка регламентируется ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 20–40 источников, но не более 50. Из них за последние 3 года – рекомендуется указать не менее 20, иностранных – не менее 15. Важно правильно оформить ссылку на источник.

Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет.

Источники указываются в конце статьи в алфавитном порядке либо в порядке упоминания в тексте статьи.

Приводится на русском языке и в латинице по образцу, представленному на сайте журнала.

Аффилиация. Фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, ORCID i, Scopus Author ID, ResearcherID, далее указать все места работы, должность, название организации, служебный адрес, электронная почта, телефон, e-mail.

Приводится на русском и английском языках.

Технические требования к оформлению.

Формат А4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом употреблении должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подписанной 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 – подписанной подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы предоставляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

Общий порядок опубликования

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятыми редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

- с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;
- согласие на обработку персональных данных в научном периодическом издании;

При регистрации присваивается дата поступления и регистрационный номер статьи. Статьи регистрируются через электронную редакцию. Регистрация осуществляется бесплатно.

Первичная экспертиза на соответствие требованиям и профилю журнала (модерация). Зарегистрированные рукописи статей проходят первичную экспертизу на соответствие требованиям и профилю журнала. Началом для экспертизы рукописи статьи редакцией является дата регистрации статьи. Редакция журнала оставляет за собой право отбора присылаемых материалов. Только прошедшие первичную экспертизу рукописи статей, полностью соответствующие требованиям редакции журнала, соответствующие профилю журнала, получают статус «Принята к рассмотрению». Для них отдельно регистрируется дата приема рукописи статьи к рассмотрению.

Рецензирование. Принятые к рассмотрению рукописи статей направляются на слепое рецензирование для оценки их научного содержания нескольким специалистам соответствующего профиля, членам редакционной коллегии и/или редакционного совета. Экспертиза и рецензирование осуществляются бесплатно.

Решение о принятии к публикации основывается на поступивших рекомендациях рецензентов журнала. Если принято решение «рекомендовать с учетом исправления отмеченных недостатков», то автору направляются рекомендации и вопросы для исправления. Рукопись статьи, скорректированная автором, повторно направляется на рецензирование. Рукописи статей, не рекомендованные к публикации, повторно не рассматриваются. Автору рукописи направляется мотивированный отказ в публикации.

Редакционная подготовка. Рукописи статей, принятые к публикации, проходят редакционную подготовку к публикации – литературное редактирование и сверку данных, корректуру, форматирование, макетирование. Общий срок редакционной подготовки статьи, успешно прошедшей рецензирование, составляет 2 месяца в соответствии с периодичностью и графиком публикации выпусков. Корректуре статей авторам не высылается, тем не менее вопросы, возникающие в процессе редактирования высылаются авторам для согласования.

Окончательный вариант макета статьи высылается по электронной почте автору на утверждение. На рассмотрение отводится три дня, по истечении которых в случае неполучения ответа от автора, макет автоматически считается автором одобренным и в представленном виде направляется в печать.

Публикация. Подготовленный к публикации макет тиражируется в типографии СибАДИ и размещается на сайте журнала в открытом бесплатном доступе. Публикация всех статей одного выпуска осуществляется единой датой.

Метаданные опубликованных статей выпуска регистрируются в РИНЦ, размещаются в библиографических сервисах и базах данных в сроки, установленные соответствующими договорами, распространяются по подписке.