

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



научный рецензируемый журнал

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

“Vestnik SibADI”

Том 20, № 3. 2023
Vol.20, No. 3. 2023

наука
science

creation
творчество

образование
education

innovations
инновации

technology
технологии

tradition
традиции

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

ВЕСТНИК СИБАДИ

THE RUSSIAN AUTOMOBILE AND HIGHWAY INDUSTRY JOURNAL

DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-3

ТОМ 20, № 3. 2023

VOL. 20, No. 3. 2023

Сквозной номер выпуска – 91

Continuous issue – 91

Учредитель и издатель:

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

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ

644080, г. Омск, проспект Мира, 5
Тел. +7 (3812) 60-71-26;

Издается с 2004 года

Периодичность издания – 6 раз в год

Подписной индекс в каталоге

ООО «Урал-Пресс» 66000

Founder and Publisher:

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

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

EDITORIAL POSTAL ADDRESS

644080, Omsk, 5, Mira Ave.
Phone: +7 (3812) 60-71-26

Published since 2004
by 6 issues per year

Subscription index is 66000
in the Ural-Press catalog

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

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

Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ» предназначен для информирования научной общественности о результатах научных исследований актуальных в международном сообществе проблем, имеющих теоретическую и практическую значимость. Страницы нашего издания открыты для всех авторов, которые серьёзно 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 26.06.2023. Дата выхода в свет 30.06.2023. Формат 60×84 1/8 Гарнитура Arial. Печать оперативная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 27,25 Тираж 500 экз. Заказ 500 экземпляров. Свободная цена. Отпечатано в типографии Издательско-полиграфический комплекс Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия

Контент доступен под лицензией CC BY.

Поступившие в редакцию материалы не возвращаются.

Гонорары не выплачиваются.

Все статьи публикуются бесплатно.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

The journal is the periodical scientific edition registered as mass media. Certificate of registration media is PI NUMBER FS – 77-73591 dated on 31.08.2018 and is issued by the Federal Service of Supervision in the sphere of information technologies and mass communications (Roskomnadzor). The peer-reviewed scientific The Russian Automobile and Highway Industry Journal is included in the list of leading periodicals and recommended by the Higher Attestation Commission by a decision of the Presidium of the Higher Attestation Commission on 25.02.2011. In accordance with the order of The Ministry of Education and Science of Russia dated by December 28, 2018, No. 90 is included in the new list. Since 2017, all issues and articles of the journal have been assigned by Digital Object Identifiers (DOIs), the data of which are available in electronic version on the vestnik.sibadi.org 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 26.06.2023. Publication date is 30.06.2023. Format is 60 × 84 1/8.

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

Content is available under license CC BY.

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

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Транспортное, горное и строительное машиностроение

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

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

Транспорт

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

Трофимова Людмила Семеновна, д-р техни. 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

Кортаев 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Савельев Сергей Валерьевич, д-р техн. наук, доц., проф.
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Сибирский

государственный автомобильно-дорожный университет
(СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 57159787800, **Researcher ID** A-4081-2019,
ORCID 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ланкина Наталья Константиновна переводчик
e-mail: lankinank@yandex.ru

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

EDITORIAL TEAM

Editor-in-chief Alexandr P. Zhigadlo, Dr. of Sci. (Pedagogy), Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Corresponding Member of Academy of Military Science, Rector of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia

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

Transport, mining and mechanical engineering

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

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

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

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

Transport

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

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

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

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

Construction and architecture

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Scopus Author ID 56487473100

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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. Saveliyev, 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Д. С. Алешков, П. А. Корчагин, И. А. Тетерина, Е. В. Хирьянов

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ РОТОРНЫХ
СНЕГООЧИСТИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИХ КОНСТРУКТИВНЫХ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ 304**

И. С. Кузнецов, С. В. Савельев

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФРЕЗЕРНОГО РАБОЧЕГО
ОБОРУДОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРА 316**

В. А. Николаев

РАСЧЁТ ВЫСОТЫ ВИТКА СПИРАЛЬНОГО НОЖА 326

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

В. В. Донченко, В. А. Купавцев

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ
ДЛЯ БЕЗОПАСНОГО ПЕРЕДВИЖЕНИЯ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ
МОБИЛЬНОСТИ 338**

Ю. В. Трофименко, В. И. Комков

**АКТУАЛИЗИРОВАННЫЙ ПРОГНОЗ ЧИСЛЕННОСТИ,
СТРУКТУРЫ АВТОМОБИЛЬНОГО ПАРКА РОССИИ
ПО ТИПУ ЭНЕРГОУСТАНОВОК И ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ
ДО 2050 ГОДА 350**

А. И. Фадеев, А. М. Ильянков, В. В. Укадеров

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ ПО СЕТИ В ЗАДАЧАХ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕРЕВОЗОК ГОРОДСКИМ ПАССАЖИРСКИМ
ТРАНСПОРТОМ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ 362**

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

О. А. Побегайлов, Аль-Мсари Ахмед Абдул Руда Ауда

**ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ
СТРОИТЕЛЬСТВА В ИРАКЕ 388**

А. В. Явинский

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗИСА
НА СВОЙСТВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА 396**

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Denis S. Aleshkov, Pavel A. Korchagin, Irina A. Teterina, E. V. Khirianov
**CAPABILITIES ASSESSMENT FOR WORKING BODIES OF ROTARY
SNOWBLOWERS THROUGH DESIGN AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS
STUDY..... 305**

Ilya S. Kuznetsov, Sergey V. Saveliev
**CHARACTERISTICS DETERMINATION FOR MILLING WORKING EQUIPMENT
OF EXCAVATOR 317**

Vladimir A. Nikolayev
TURN HEIGHT CALCULATION FOR SPIRAL BLADE 327

PART II. TRANSPORT

Vadim V. Donchenko, Vladimir A. Kupavtsev
**STUDY OF URBAN INFRASTRUCTURE ELEMENTS FOR PERSONAL MOBILITY
DEVICES SAFE MOVEMENT 339**

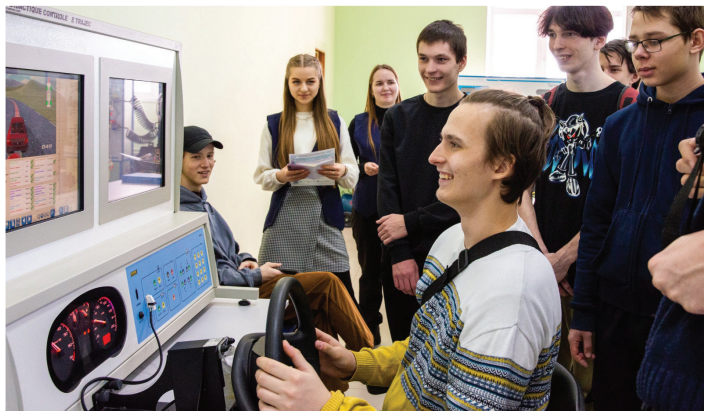
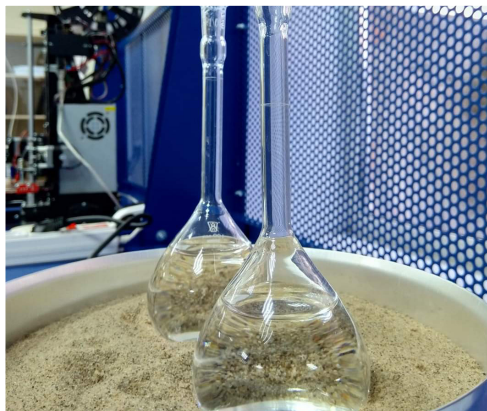
IUrii V. Trofimenko, Vladimir I. Komkov
**UPDATED NUMBER FORECAST, RUSSIAN CAR FLEET STRUCTURES
BY TYPE OF POWER PLANTS AND GREENHOUSE GAS EMISSIONS
UNTIL 2050 351**

Aleksandr I. Fadeev, Altksei M. Iliankov, Vitalii V. Ukaderov
**CORRESPONDENCE DISTRIBUTION OVER A NETWORK IN DESIGNING
PUBLIC URBAN PASSENGER TRANSPORTATION TASKS 363**

PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Oleg A. Pobegaylov, Al-Masri Ahmad Abdul Ruda Auda
**ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL RELIABILITY OF CONSTRUCTION
IN IRAQ 389**

Aleksander V. Iavinskii
**INFLUENCE OF ANTHROPOGENIC WASTE OF DIFFERENT GENESIS
ON PROPERTIES OF FINE-GRAINED CONCRETE..... 397**



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



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

Научная статья

УДК 629.464.4

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-304-315>

EDN: OUZRWW



ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ РОТОРНЫХ СНЕГООЧИСТИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИХ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Д. С. Алешков*, П. А. Корчагин, И. А. Тетерина, Е. В. Хирьянов

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),

г. Омск, Россия,

denisaleshkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4204-7221>

korchagin_pa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8936-5679>

iateterina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8012-8511>

hiryanova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-5754-2400>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. На начальных этапах проектирования питателей роторных снегоочистителей необходимо иметь относительно простые соотношения, на основании которых можно судить об их эффективности и потенциальных возможностях. Наличие таких показателей дает возможность обоснованно выбрать конструктивную схему, геометрические и кинематические параметры рабочих органов роторных снегоочистителей. Решение данных задач позволяет в значительной степени сократить время на проектирование машин и их рабочих органов. Таким образом, основная цель данного исследования заключается в оценке возможности обоснования эффективности конструкторских решений роторных снегоочистителей на ранних стадиях проектирования.

Методы и материалы. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: обоснование показателей, на основе которых будет даваться оценка эффективности, описание механизма получения их теоретических значений.

Результаты. В результате проведенных исследований получены аналитические выражения вырезаемых объемов снежной массы горизонтальной и вертикальной фрезами питателя роторного снегоочистителя. Произведена оценка времени транспортирования вырезанной снежной массы. Показана степень влияния ряда конструктивных и технологических параметров на величину вырезаемой снежной массы и время ее транспортирования.

Обсуждение и заключение. Получены уравнения длин траекторий движения произвольной точки фрезы питателя роторного снегоочистителя для ее вертикального и горизонтального расположения. Уравнения позволяют определить продолжительность взаимодействия транспортируемой снежной массы и рабочего оборудования от момента ее захвата до момента ее разгрузки.

В результате исследований определена область значений, в которой длина траектории вырезания снежной массы для горизонтальной фрезы меньше длины траектории вырезания для вертикальной фрезы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: снегоочиститель, роторный снегоочиститель, снежный массив, питатель роторного снегоочистителя, эффективность, конструктивные параметры, технологические параметры

Статья поступила в редакцию 18.04.2023; одобрена после рецензирования 05.05.2023; принята к публикации 26.06.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10014, <https://rscf.ru/project/23-29-10014>

Для цитирования: Алешков Д. С., Корчагин П. А., Тетерина И. А., Хирьянов Е. В. Оценка возможностей рабочих органов роторных снегоочистителей на основе их конструктивных и технологических параметров // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 3 (91). С. 304-315. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-304-315>

© Алешков Д. С., Корчагин П. А., Тетерина И. А., Хирьянов Е. В., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-304-315>

EDN: OUZRWW

CAPABILITIES ASSESSMENT FOR WORKING BODIES OF ROTARY SNOWBLOWERS THROUGH DESIGN AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS STUDY

Denis S. Aleshkov*, Pavel A. Korchagin, Irina A. Teterina, E. V. Khirianov

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),

Omsk, Russia

denisaleshkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4204-7221>,

korchagin_pa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8936-5679>

iateterina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8012-8511>

hiryantov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-5754-2400>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. At the initial stages of designing snow blower feeders, it is necessary to have relatively simple ratios on the basis of which one can judge their efficiency and their potential. The presence of such indicators makes it possible to reasonably choose the design scheme, geometric and kinematic parameters of the working bodies of rotary snowplows. The solution of such problems, in turn, can significantly reduce the time for designing machines and their working bodies. Thus, the main goal of this study is to assess the possibility of substantiating the effectiveness of design solutions for snow blowers in the early stages of design.

Methods and materials. To achieve this goal, such tasks as the substantiation of the indicators on the basis of which the effectiveness will be assessed, description of the mechanism for obtaining their theoretical values were solved.

Results. As a result of the research, analytical expressions were obtained for the volumes of snow mass cut by horizontal and vertical cutters of the rotary snowplow feeder. The time of transporting the cut snow mass has been estimated. The degree of influence of a number of design and technological parameters on the size of the cut snow mass and the time of its transportation is shown.

Discussion and conclusion. The equations for the lengths of the trajectories of motion of an arbitrary point of the cutter of the feeder of a rotary snowplow are obtained for its vertical and horizontal arrangement. The equations make it possible to determine the duration of the interaction between the transported snow mass and the working equipment from the moment of its capture to the moment of its unloading. As a result of the research, the range of values was determined, in which the length of the cutting path of the snow mass for a horizontal cutter is less than the length of the cutting path for a vertical cutter.

KEYWORDS: snowplow, rotary snowplow, snow mass, rotary snowplow feeder, efficiency, design parameters, technological parameters

The article was submitted 18.04.2023; approved after reviewing 05.05.2023; accepted for publication 26.06.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

The study was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 23-29-10014, <https://rscf.ru/project/23-29-10014>

For citation: Aleshkov Denis S., Korchagin Pavel A., Teterina Irina A., Khirianov E.V. Capabilities assessment for working bodies of rotary snowblowers through design and technological parameters study. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (3): 304-315. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-304-315>

© Aleshkov D. S., Korchagin P. A., Teterina I. A., Khirianov E. V., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

В работе¹ представлено иерархически упорядоченное множество существующих критериев эффективности. В качестве критериев высшего иерархического уровня выступают экономическая эффективность, удельная энергоемкость, потребляемая мощность и производительность. Кроме этого, было введено понятие четвертого измерения – времени работы элемента рабочего оборудования, которое является неотъемлемой частью критериев высших иерархических уровней². В работах [1, 2, 3] продемонстрированы возможности использования данного показателя при исследованиях рабочих органов роторных снегоочистителей³. В работах [4, 5] показана взаимосвязь времени рабочего цикла с массой машины, на примере плужных снегоочистителей. Использование критериев высшего иерархического уровня обладает существенным недостатком, связанным со сложностью их определения. Их определение связано с решением достаточно сложных уравнений динамики рабочего органа и большими затратами машинного времени либо с существенной трудоемкостью при проведении экспериментальных исследований. Например, в работе [4] представлены теоретические исследования процесса резания горизонтальной фрезой питателя фрезерно-роторного снегоочистителя, направленных на определение усилий на ленте фрезы, с целью выявления характера формирования данной силы и возможности дальнейшей оптимизации конструкции за счет изменения величины и характера действия данной силы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки эффективности инженерных решений, связанных с работой отвала снегоочистителя при проведении снегоочистительных работ, в статьях [6, 7, 8] рассматривается вертикальное перемещение рабочего органа,

на основании которого в сопоставлении со значениями сил трения рабочего органа, определяемых в результате решения дифференциального уравнения, делается суждение об эффективности исследуемого инженерного решения. Большинство критериев нижнего иерархического уровня не позволяют в полной мере оценить перспективность конструкции роторного снегоочистителя. Кроме этого, выбор основных конструктивных и технологических параметров питателя роторного снегоочистителя в существующих методиках базируется на эмпирических формулах⁴ [9, 10], которые в ряде случаев не позволяют оценить в полной мере роль того или иного параметра в общей эффективности питателя.

Таким образом, представляет определенный интерес наличие относительно простых показателей, на основе которых можно было бы судить о техническом совершенстве разрабатываемой конструкции роторного снегоочистителя.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Для суждения о степени эффективности конструкции питателя роторного снегоочистителя воспользуемся кинематическими уравнениями, описывающими движения произвольной точки на кромке ленты фрезы питателя роторного снегоочистителя. Данные уравнения представим в параметрическом виде в системе координат, представленной на рисунках 1, 2.

На расчетной схеме по определению траектории движения i -й точки фрезы в плоскости $X_0O_0Z_0$ (см. рисунок 1): R_ϕ – радиус фрезы питателя; h – толщина снежного покрова; $V_{\text{пер}}$ – поступательная скорость роторного снегоочистителя; ω_ϕ – угловая скорость вращения фрезы питателя роторного снегоочистителя; $X_{\phi i}, Y_{\phi i}$ – координаты положения i -й точки фрезы в системе координат $X_\phi O_\phi Z_\phi$.

¹ Баловнев В. Н. Оценка эффективности дорожных и коммунальных машин по технико-эксплуатационным показателям: учебное пособие / Моск. гос. автомобил.-дорож. ин-т (Гос. техн. ун-т) (МАДИ-ГТУ). М.: МАДИ, 2002. 28 с.

² Баловнев В.И., Советбеков Б.С. Оптимизация режимов эксплуатации и выбора транспортно-технологических машин методами анализа четвертой координаты рабочего процесса // Вестник КРСУ. 2014. Т.14, № 12. С. 145–148.

³ Нгуен Зань Шон. Определение оптимальных параметров и условий использования рыхлителей в строительстве: специальность 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / НгуенЗань Шон. Москва, 2005. 23 с.

⁴ Иванов А. Н., Мишин В. А. Снегоочистители отбрасывающего действия. М.: Машиностроение, 1981. 159 с.

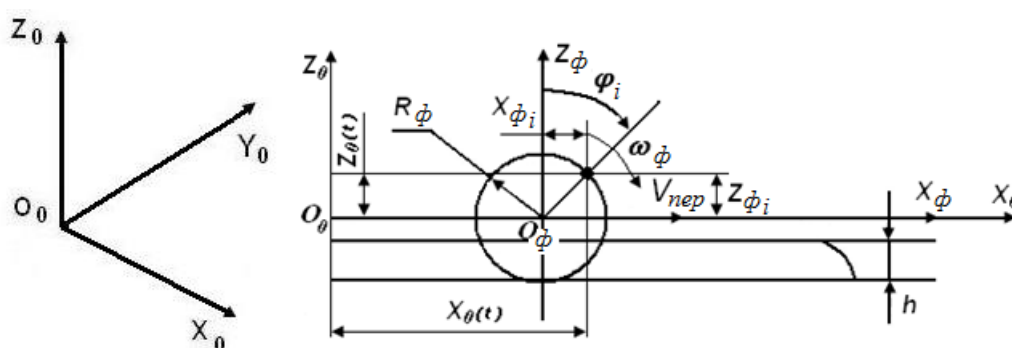


Рисунок 1 – Расчетная схема для определения траектории движения i -й точки фрезы в плоскости $X_0O_0Z_0$ (вид сбоку)
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Calculation scheme for determining the trajectory of movement i -th point of the cutter in $X_0O_0Z_0$ plane (side view)
Source: compiled by the authors.

Траектория движения i -й точки фрезы в плоскости $X_0O_0Z_0$ описывается уравнениями⁵ [11,12]:

$$\begin{cases} x_0(t) = V_{nep} \cdot t + R_\phi \cdot \sin(\omega_\phi \cdot t); \\ z_0(t) = R_\phi \cdot \cos(\omega_\phi \cdot t); \\ y_0(t) = R_\phi \cdot \omega_\phi \cdot \text{tg} \theta \cdot t, \end{cases} \quad (1)$$

где t – параметр времени, с.

Уравнения движения i -й точки наружной кромки вертикальной режущей полосы описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} x_0 = V_{nep} \cdot t + R_\phi \cdot \sin(\omega_\phi \cdot t), \\ y_0 = R_\phi \cdot \cos(\omega_\phi \cdot t). \end{cases} \quad (2)$$

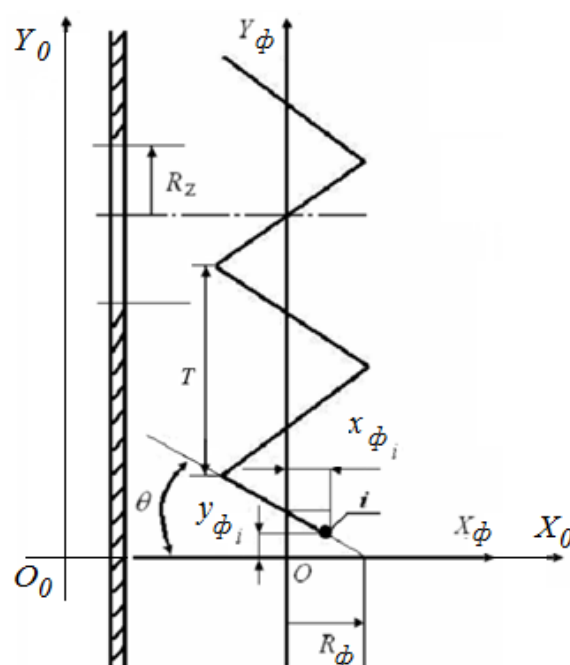


Рисунок 2 – Расчетная схема для определения траектории движения i -й точки фрезы в плоскости $X_0O_0Y_0$:
 θ – угол захода ленты фрезы, град;
 T – шаг винтовой линии ленты фрезы;
 R_z – радиус загрузочного окна
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Calculation scheme for determining the trajectory movement of the i -th point of the cutter in $X_0O_0Y_0$ plane:
 θ – angle of entry of the cutter belt, degrees;
 T – screw pitch cutter belt lines;
 R_z – loading window radius
Source: compiled by the authors.

⁵ Аюпова Н. Ю. Повышение эффективности рабочего процесса питателя фрезерно-роторного снегоочистителя: специальность 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Аюпова Наталья Юрьевна. Омск, 2021. 182 с.

Из систем уравнений (1), (2) легко определяются траектории произвольной точки наружной кромки горизонтальной и вертикальной фрез питателя. Согласно⁶ [13,14] уравнение траектории произвольной точки горизонтальной фрезы, после ряда преобразований, описывается уравнением вида

$$x_{0i} = \frac{V_{nep} \cdot y_{0i}}{R_{\phi} \cdot \omega_{\phi} \cdot tg\theta} + R_{\phi} \cdot \sin \left(\frac{y_{0i}}{R_{\phi} \cdot \omega_{\phi} \cdot tg\theta} \right). \quad (3)$$

Соответственно, уравнение траектории движения наружной кромки вертикальной режущей полосы в плоскости $X_0O_0Y_0$, будет иметь вид

$$x_{0i} = \frac{V_{nep}}{\omega_{\phi}} \arccos \frac{y_{0i}}{R_{\phi}} + \sqrt{R_{\phi}^2 - y_{0i}^2}. \quad (4)$$

На рисунке 3 представлены траектория движения произвольной точки вертикальной и горизонтальной фрез питателя роторного снегоочистителя.

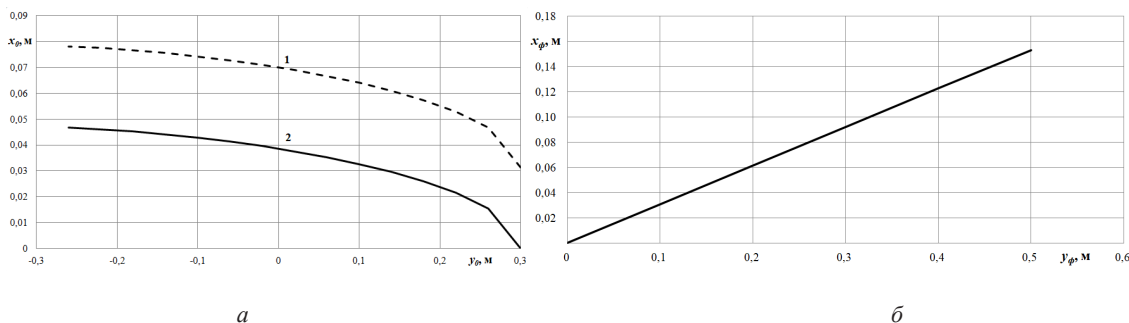


Рисунок 3 – Траектория движения произвольной точки фрезы питателя роторного снегоочистителя:
а – вертикально расположенная фреза:
1 – i вертикальная полоса; 2 – i+1 вертикальная полоса;
б – горизонтально расположенная фреза питателя роторного снегоочистителя
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – The trajectory of an arbitrary point milling cutter feeder of a rotary snow blower, where: a) vertical cutter:
1 – i vertical stripe; 2 – i+1 vertical stripe,
b) horizontal cutter feeder snow blower
Source: compiled by the authors.

Из рисунка 3 следует, что траектория движения произвольной точки фрезы вертикального питателя носит нелинейный характер в отличие от горизонтально расположенной фрезы.

Далее воспользуемся уравнением объема, представленного в работе [6], полученного на основе известного свойства тройного интеграла при интегрировании системы уравнений⁷. Данное уравнение имеет вид

⁶ Яблонский А. А., Никифорова В. М. Курс теоретической механики. Статика. Кинематика. Динамика: учебное пособие. 8-е изд., стереотипное. СПб.: Лань, 2001. 764 с.

⁷ Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления: учебное пособие: в 2-х т. Издание стереотипное. М.: Интеграл-Пресс, 2006. Т. 1. 415 с.

$$W_{\phi} = 4 \cdot \pi^2 \cdot h \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot R_{\phi} \cdot \frac{V_{nep}}{n_3 \cdot \omega_{\phi}}, \quad (5)$$

где θ – угол захода ленты фрезы, град.

Применим аналогичный подход к вертикальной фрезе питателя роторного снегоочистителя. Пределами интегрирования будут являться:

- по x : нижний предел интегрирования равен 0; верхний предел интегрирования, согласно (4), имеет вид

$$\frac{V_{nep}}{\omega_{\phi}} \arccos \frac{y_{0i}}{R_{\phi}} + \sqrt{R_{\phi}^2 - y_{0i}^2};$$

- по y : нижний предел интегрирования, с учетом принятой системы координат, для одной вертикальной фрезы, равен R_{ϕ} ; верхний предел интегрирования, соответственно, R_{ϕ} ;

- по z : нижний предел интегрирования равен 0; верхний равен толщине снежного покрова, h .

Теоретический объем, W , который вырезает i вертикальная полоса вертикального питателя из снежного массива, представлен как тройной интеграл следующим выражением:

$$W = \int_0^h dz \cdot \int_{-R_{\phi}}^{R_{\phi}} dy \cdot \int_0^{\frac{V_{nep}}{\omega_{\phi}} \arccos \frac{y_{0i}}{R_{\phi}} + \sqrt{R_{\phi}^2 - y_{0i}^2}} dx.$$

В результате интегрирования теоретический объем, W , который вырезает i вертикальная полоса вертикального питателя из снежного массива, будет определяться выражением

$$W = 4 \cdot \frac{V_{nep}}{\omega_{\phi}} \cdot \frac{\pi}{n} \cdot R_{\phi} \cdot h, \quad (6)$$

где n – количество вертикальных режущих полос вертикального питателя роторного снегоочистителя.

Сравнение формул вырезаемых объемов вертикальным (6) и горизонтальным питателями (5) показывает, что они равны при $\operatorname{tg} \theta = 1/\pi$, что соответствует углу захода ленты фрезы горизонтального питателя $\theta = 17,7^\circ$. При $\theta > 17,7^\circ$ горизонтальный питатель вырезает больший объем. Соответственно, при $\theta < 17,7^\circ$ горизонтальный питатель вырезает меньший объем снежной массы из снежного массива по сравнению с вертикальным питателем при прочих равных условиях.

На рисунке 4 представлена зависимость изменения вырезаемого объема от угла захода ленты горизонтальной фрезы, θ , и отношения V_{nep}/ω_{ϕ} , а также зависимость вырезаемого объема снежной массы вертикальным питателем от аналогичных параметров, при прочих равных условиях.

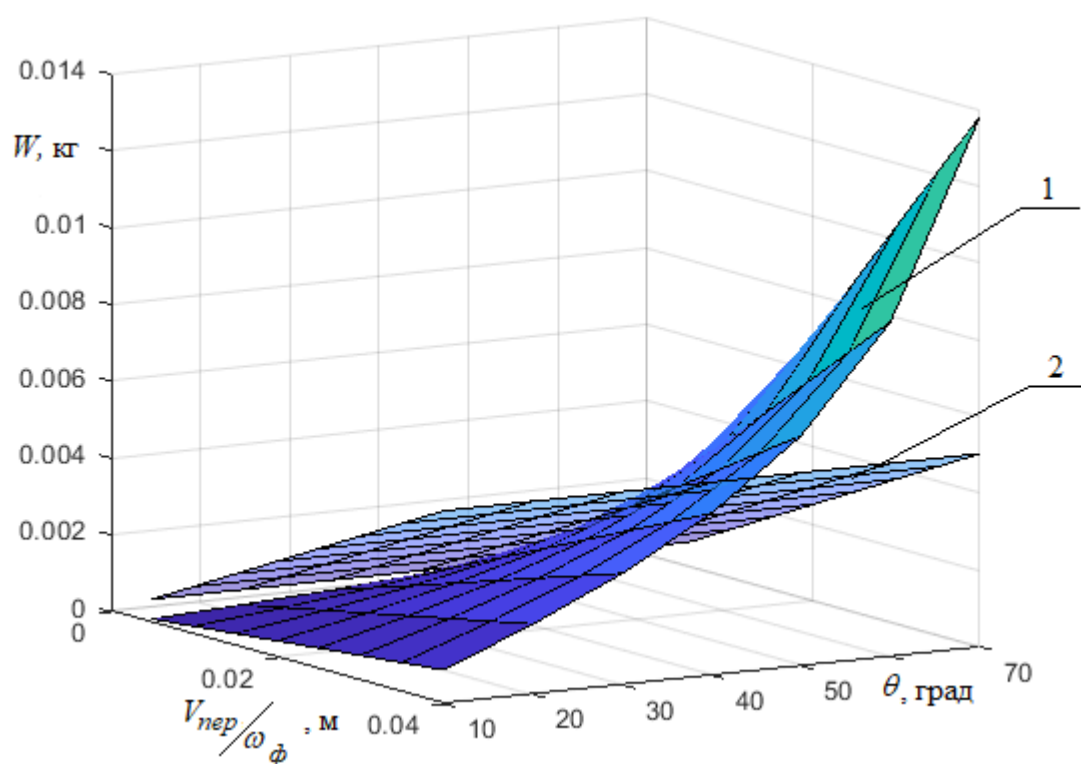


Рисунок 4 – Зависимость изменения вырезаемого объема снежной массы, в зависимости от отношения, $V_{\text{пер}}/\omega_{\phi}$, и угла захода, θ , ленты горизонтальной фрезы:
1 – вырезаемый объем горизонтальной фрезой питателя, W_{ϕ} ;
2 – вырезаемый объем вертикальной фрезой питателя роторного снегоочистителя, W
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – The dependence of the change in the cut volume of the snow mass, depending on the ratio, $V_{\text{пер}}/\omega_{\phi}$, and the angle of approach, θ , horizontal cutter belt,
1 – cut volume of the horizontal cutter feeder, W_{ϕ} ;
2 – cut volume by a vertical cutter snow blower feeder, W
Source: compiled by the authors.

Представленные на рисунке 4 вырезаемые объемы снежной массы определены в диапазонах поступательных скоростей роторного снегоочистителя и угловых скоростей вращения фрез, обеспечивающих выполнение условия, описанного в работах⁵ [15, 16, 17].

Зависимости вырезаемого объема снежной массы вертикальной и горизонтальной фрезами питателей роторного снегоочистителя представлены на рисунке 5.

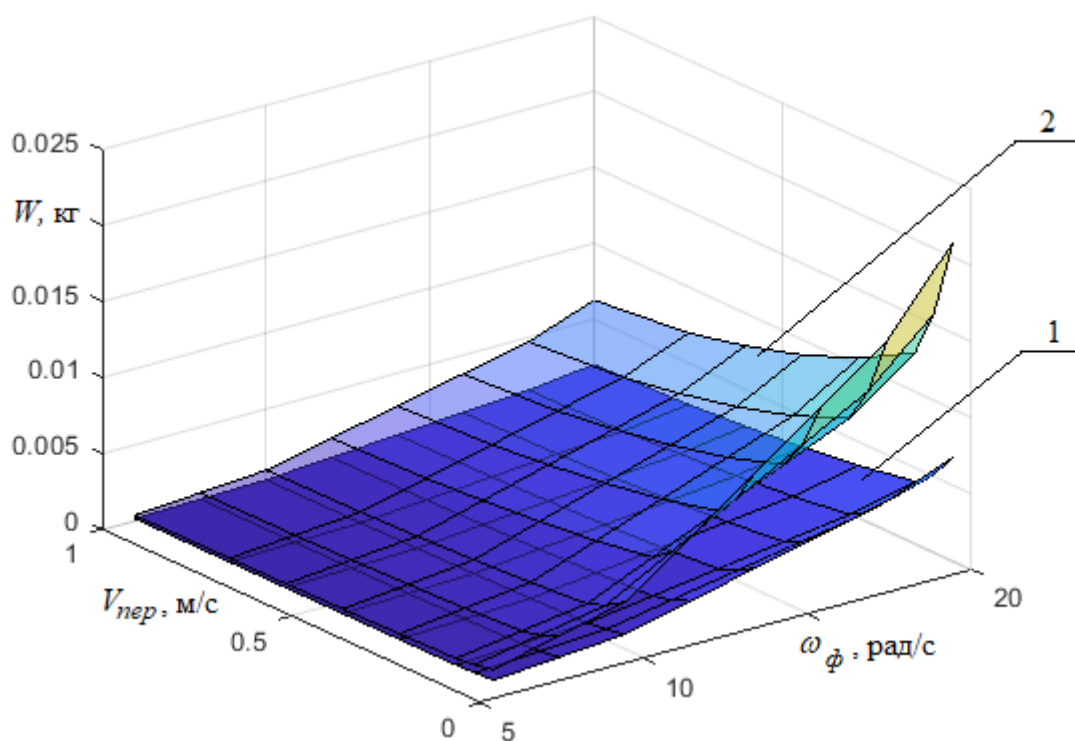


Рисунок 5 – Зависимость изменения вырезаемого объема снежной массы в зависимости от поступательной скорости снегоочистителя, $V_{пер}$, и угловой скорости вращения, ω_{ϕ} , фрезы питателя:
1 – вырезаемый объем горизонтальной фрезой питателя, W_{ϕ} ;
2 – вырезаемый объем вертикальной фрезой питателя роторного снегоочистителя, W
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Dependence of the change in the cut volume snow mass, depending on forward speed snowplow, $V_{пер}$, and angular velocity of rotation, ω_{ϕ} , cutter feeder, where:
1 – cut volume by the horizontal cutter of the feeder, W_{ϕ} ;
2 – cut volume by a vertical cutter snow blower feeder, W
Source: compiled by the authors.

Анализ полученных зависимостей показал, что наибольший объем вырезаемой снежной массы можно получить для роторных снегоочистителей с вертикальным расположением фрезы питателя.

Зная уравнение траектории резания, можно определить путь, который пройдет участок рабочего органа от момента захвата снежной массы до момента разгрузки. Для этого необходимо вычислить определенный интеграл⁷ [18]:

$$L = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{(x'_t)^2 + (y'_t)^2} \cdot dt. \quad (7)$$

Соответственно, для вертикальной фрезы питателя с нижним пределом интегрирования, $t_1=0$; верхним пределом интегрирования, $t_2=\pi/\omega_{\phi}$, имеем

$$L = \int_0^{\pi/\omega_\phi} \sqrt{\left(V_{\text{пер}} + R_\phi \cdot \omega_\phi \cdot \cos(\omega_\phi \cdot t)\right)^2 + \left(R_\phi \cdot \omega_\phi \cdot \sin(\omega_\phi \cdot t)\right)^2} dt. \quad (8)$$

Интеграл (8) может быть отнесен к эллиптическим интегралам второго рода и последующим выходом на сумму ряда. Последующие данные были получены в результате численного интегрирования (8) в заданных пределах [19].

Проведем аналогичные преобразования для фрезы питателя роторного снегоочистителя, расположенного горизонтально. Длина траектории движения произвольной точки фрезы, L , имеет вид

$$L = \int_0^{2\pi/\omega} \sqrt{V^2 + 2V\omega R_\phi \cos \omega t + \omega^2 R_\phi^2 \cos^2 \omega t + R_\phi^2 \cdot \omega^2 \cdot \tan^2 \theta dt}. \quad (9)$$

На рисунке 6 представлены зависимости длины траекторий, L , вырезания снежной массы из снежного массива в зависимости от $V_{\text{пер}}$ и ω_ϕ .

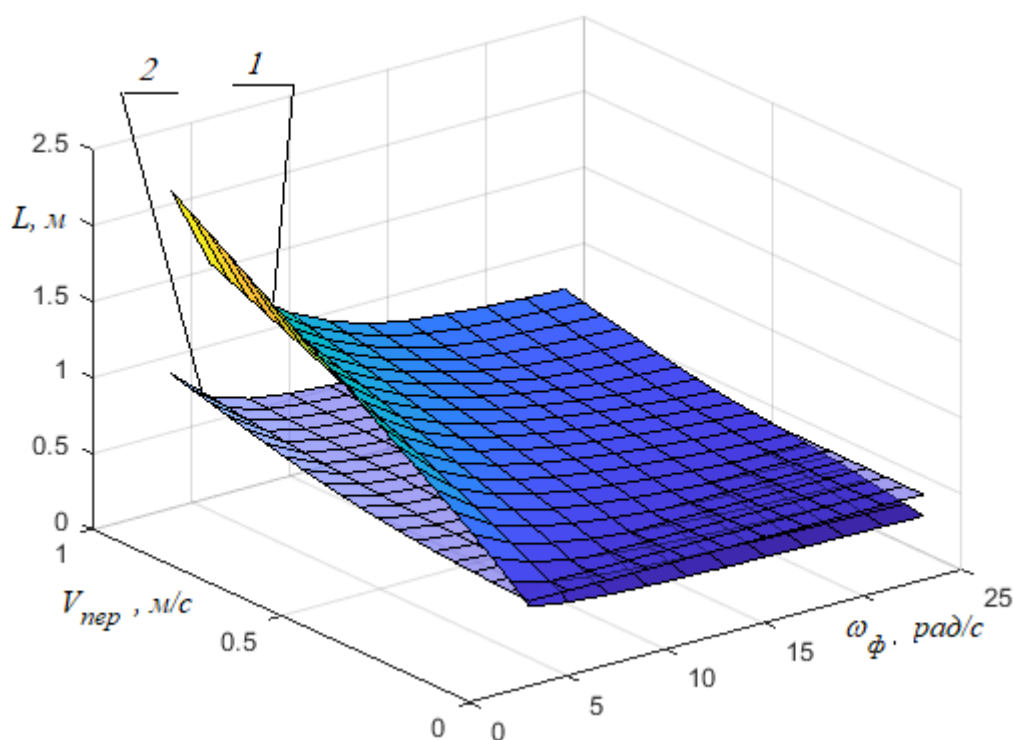


Рисунок 6 – Зависимость длины траекторий, L , вырезания снежной массы из снежного массива в зависимости от $V_{\text{пер}}$ и ω_ϕ :
1 – горизонтальной фрезой;
2 – вертикальной фрезой питателя роторного снегоочистителя
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Dependence of the length of the trajectories, L , cutting the snow mass from the snow mass, depending on $V_{\text{пер}}$ and ω_ϕ , where:
1 – horizontal cutter; 2 – vertical cutter of the feeder of the rotary snowplow
Source: compiled by the authors.

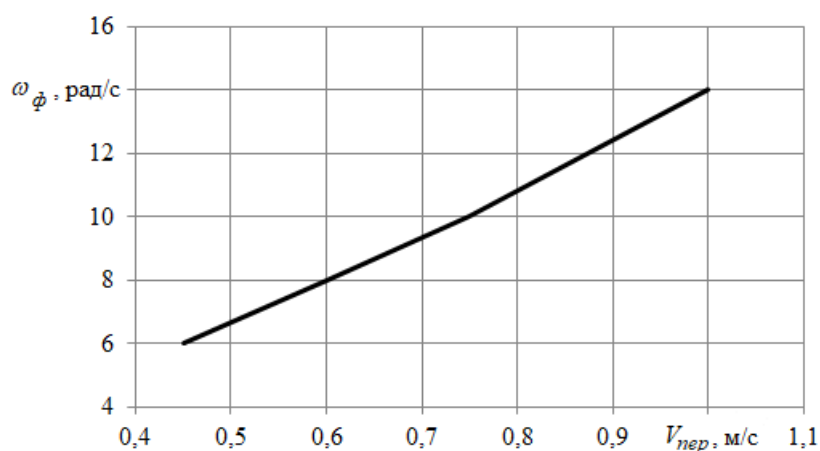


Рисунок 7 – Кривая равной длины траектории вырезания снежной массы горизонтальной и вертикальной фрезами питателей роторного снегоочистителя в зависимости от $V_{пер}$ и ω_{ϕ} при $R_{\phi}=0,15$ м
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Curve of equal length trajectory cutting snow mass horizontal and vertical milling cutters of rotary snow blower feeders depending on $V_{пер}$ and ω_{ϕ} at $R_{\phi}=0.15$ m
Source: compiled by the authors.

Из рисунка 6 следует, что при скорости роторного снегоочистителя с горизонтальной фрезой питателя более 0,45 м/с, длина траектории вырезания снежной массы превышает аналогичный параметр для роторного снегоочистителя с вертикальной фрезой при любых значениях угловой скорости фрезы питателя. Дальнейшее увеличение скорости снегоочистителя ведет к необходимости увеличения, ω_{ϕ} , и нелинейному росту, L , для горизонтальной фрезы. Величина траектории, L , вырезания снежной массы из снежного массива для горизонтальной фрезы превосходит, L , для вертикальной фрезы. На рисунке 7 представлена граница областей значений, $V_{пер}$ и ω_{ϕ} , ниже которой длина траектории вырезания снежной массы горизонтальной фрезой питателя роторного снегоочистителя превышает длину траектории вырезания вертикальной фрезой, вычисленная для $R_{\phi}=0,15$ м.

Из рисунка 7 следует, что для каждого из рассматриваемых видов питателей роторного снегоочистителя существует своя область значений кинематических параметров фрезы питателя, при которых линия траектории резания меньше, что дает основания предположить о том, что в данных областях соответствующие питатели будут эффективнее и по критериям эффективности более высоких иерархических уровней.

Представленная граница равных длин траекторий вырезания снежной массы для верти-

кального и горизонтального питателей позволяет судить о возможностях интенсификации работы питателей с горизонтальной и вертикальной фрезами за счет увеличения их поступательных скоростей и угловых скоростей вращения.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение теоретических значений вырезаемых объемов горизонтальной и вертикально расположенной фрезой роторного снегоочистителя позволяет сделать вывод о потенциальных возможностях питателей. При углах захода фрезы θ меньше $17,7^{\circ}$, горизонтальный питатель роторного снегоочистителя вырезает меньший объем снежной массы, чем вертикальный питатель при прочих равных условиях.

Полученные уравнения длин траекторий движения произвольной точки фрезы питателя роторного снегоочистителя для вертикального и горизонтального расположения фрезы позволяют определить продолжительность взаимодействия транспортируемой снежной массы и рабочего оборудования от момента ее захвата до момента ее разгрузки. Установлено, что существует область значений $V_{пер}$ и ω_{ϕ} , в которой длина траектории вырезания снежной массы для горизонтальной фрезы меньше длины траектории вырезания для вертикальной фрезы. Увеличение значений $V_{пер}$ и ω_{ϕ} приводит к нелинейному росту длины траектории

вырезания снежной массы для горизонтальной фрезы и ее значение уже превышает аналогичный параметр для вертикальной фрезы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Закиров М. Ф. Оптимизация рабочей скорости фрезерно-роторного снегоочистителя // Строительные и дорожные машины. 2015. № 10. С. 55–57.

2. Алешков Д. С. Геометрические и кинематические характеристики питателя и метательного аппарата фрезернороторного снегоочистителя // Вестник СибАДИ. 2018. Т. 15, № 5(63). С. 638–648. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-5-638-648>.

3. Желудкевич Р. Б., Иванова Н. В., Кайзер Ю. Ф. [и др.] Рабочий орган с режущими дисковыми резцами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 7. С. 136–143.

4. Трофимова И. Ф., Баловнев В. И. Плужный снегоочиститель для скоростной очистки автомобильных дорог от снега // Технология колесных и гусеничных машин. 2015. № 4. С. 49–55.

5. Дудкин М. В., Ким А. И., Молдаханов Б. А., Роговский В. В. Определение усилий на рабочем органе фрезерно-роторного снегоочистителя // Труды университета. 2022. № 2(87). С. 16–22. DOI 10.52209/1609-1825_2022_2_16.

6. Вахидов У. Ш., Ерасов И. А., Мокеров Д. С., Молев Ю. И. Методика выбора рациональных параметров роторно-винтового движителя, обеспечивающих минимальный уровень шума при движении по льду // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2020. № 1 (128). С. 113–121. DOI: 10.46960/1816-210X_2020_1_113

7. Летопольский А. Б., Тетерина И. А., Корчагин П. А. Ротор проходческого щита // Вестник машиностроения. 2022. № 2. С. 15–18. DOI: 10.36652/0042-4633-2022-2-15-18

8. Алешков Д. С., Корчагин П. А., Тетерина И. А. Исследование математической модели работы ротора роторного снегоочистителя // Строительные и дорожные машины. 2022. № 8. С. 18–22.

9. Баловнев В. И., Данилов Р. Г. Роторные снегоочистители // Строительные и дорожные машины. 2019. № 6. С. 10–20.

10. Кузнецов А. В., Сладкова Л. А. Конструкционные особенности устройства ударного действия, предназначенного для борьбы с зимней скользкостью // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 3. С. 260–267.

11. Алешков Д. С., Корчагин П. А., Тетерина И. А. Математическая модель процесса транспортирования снежной массы в роторе снегоочистителя // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19, № 5 (87). С. 610–623. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-5-610-623

12. Дудкин М. В., Молдаханов Б. А., Бугаев А. Б. Классификация методов повышения эффективности работы питателей шнеко- и фрезерно-роторных снегоочистителей // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. 2022. № 2. С. 67–70. DOI 10.51885/1561-4212_2022_2_64

13. Плотникова В. А., Калёнов К. А., Захаров Д. П. Обзор снегоочистителей роторного типа // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2022. № 13. С. 43–47. DOI: 10.26160/2309-8864-2022-13-43-47

14. Баловнев В. И., Данилов Р. Г. Снегопогрузки // Строительные и дорожные машины. 2020. № 1. С. 3–9.

15. Сладкова Л. А., Григорьев П. А., Кустарев Г. В. О необходимости создания инфраструктуры в регионах Арктики // Строительные и дорожные машины. 2021. № 11. С. 24–31.

16. Serebrennikov A.A., Plohov A.A. (2020) Working process for installing snow melting plants with active working element. E3S Web of Conferences: "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2020" С. 01057. DOI: 10.1051/e3sconf/202019301057

17. Мерданов Ш. М., Конев В. В., Мальцева Л. П. Повышение эффективности плужной снегоуборочной машины // Фундаментальные исследования. 2016. № 5–3. С. 491–496.

18. Пеленко В. В., Хлыновский А. М., Баринев Г. В. Повышение ресурса пары трения нож-решетка в шнековых измельчителях твердообразных материалов // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2022. № 1 (59). С. 29–36.

19. Жарников В. Б., Пасько О. А., Ушакова Н. С., Макарецова Е. С. О содержании мониторинга снежных отвалов и подверженных их влиянию земель северных городов (на примере города Томска) // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2019. Т. 24, № 1. С. 174–191. DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-1-174-191.

REFERENCES

1. Zakirov M. F. Optimizacija rabochej skorosti frezerno-rotornogo snegoochistitelja [Optimization of the operating speed of the milling and rotary snow blower]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2015; 10: 55-57. (In Russ.)

2. Aleshkov D.S. Geometric and kinematic characteristics of feeder and thrower of milling and rotary snowblower. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018;15 (5): 638-648. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-5-638-648>

3. Zhelukevich R. B., Ivanova N. V., Kajzer Ju. F. i dr. Rabochij organ s rezhushhimi diskovymi rezcami [Working tool with cutting disk cutters]. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*. 2017; 7: 136-143. (In Russ.)

4. Trofimova I. F., Balovnev V. I. Pluzhnyj snegoochistitel' dlja skorostnoj ochistki avtomobil'nyh dorog ot snega [Plow snow plow for high-speed clearing of roads from snow]. *Tehnologija kolesnyh i gusenichnyh mashin*. 2015; 4: 49-55. (In Russ.)

5. Dudkin M. V., Kim A. I., Moldahanov B. A., Rogovskij V.V. Opredelenie usilij na rabochem organe frezerno-rotornogo snegoochistitelja [Determination of forces on the working element of the milling and rotary snow blower]. *Trudy universiteta*. 2022; 2 (87): 16-22. DOI 10.52209/1609-1825_2022_2_16. (In Russ.)

6. Vahidov U. Sh., Erasov I. A., Mokerov D. S., Molev Ju. I. Metodika vybora racional'nyh parametrov rotorno-vintovogo dvizhitelja, obespechivajushih minimal'nyj uroven' shuma pri dvizhenii po l'du [Procedure for selection of rational parameters of rotor-screw propulsor providing minimum noise level when moving on ice]. *Trudy NGTU im. R. E. Alekseeva*. 2020; 1 (128): 113-121. DOI: 10.46960/1816-210X_2020_1_113 (In Russ.)

7. Letopol'skij A. B., Teterina I. A., Korchagin P. A. Rotor prohodcheskogo shhita [Penetration panel rotor]. *Vestnik mashinostroenija*. 2022; 2: 15-18. DOI: 10.36652/0042-4633-2022-2-15-18 (In Russ.)

8. Aleshkov D. S., Korchagin P. A., Teterina I. A. Issledovanie matematicheskoy modeli raboty rotora rotnogo snegoochistitelja [Study of mathematical model of rotor operation of rotary snow plow]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2022; 8: 18-22. (In Russ.)

9. Balovnev V. I., Danilov R. G. Rotornye snegoochistiteli [Study of mathematical model of rotor operation of rotary snow plow]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2019; 6: 10-20. (In Russ.)

10. Kuznecov A. V., Sladkova L. A. Konstrukcionnye osobennosti ustrojstva udarnogo dejstviya, prednaznachennogo dlja bor'by s zimnej skol'zkost'ju [Structural features of the impact device designed to combat winter slipperiness]. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*. 2020; 3: 260-267. (In Russ.)

11. Aleshkov D. S., Korchagin P. A., Teterina I. A. Mathematical model of the snow mass transportation process in the snowblower rotor. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (5): 610-623. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-610-623>

12. Dudkin M. V., Moldahanov B. A., Bugaev A. B. Klassifikacija metodov povyshenija jeffektivnosti raboty pitatelej shneko- i frezerno-rotornyh snegoochistitelej [Classification of Methods for Improving the Efficiency of Screw and Mill-Rotary Snow Plows]. *Vestnik Vostochno-Kazahstanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. D. Serikbaeva*. 2022; 2: 67-70. DOI 10.51885/1561-4212_2022_2_64. (In Russ.)

13. Plotnikova V. A., Kaljonov K. A., Zaharov D. P. Obzor snegoochistitelej rotnogo tipa [Overview of Rotary Type Snow Plows//Automated Engineering Design]. *Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii*. 2022; 13: 43-47. DOI: 10.26160/2309-8864-2022-13-43-47. (In Russ.)

14. Balovnev V. I., Danilov R. G. Snegopogruzchiki [Snow loaders]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2020; 1: 3-9. (In Russ.)

15. Sladkova L. A., Grigor'ev P. A., Kustarev G. V. O neobходимosti sozdanija infrastruktury v regionah Arktiki [On the need to create infrastructure in the regions of the Arctic]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2021; 11: 24-31. (In Russ.)

16. Serebrennikov A. A., Plohov A. A. (2020) Working process for installing snow melting plants with active working element. E3S Web of Conferences: "International Conference on Modern Trends in Man-

ufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2020" C. 01057. DOI: 10.1051/e3sconf/202019301057. (In Russ.)

17. Merdanov Sh. M., Konev V. V., Mal'ceva L. P. Povysenie jeffektivnosti pluzhnoj snegouborochnoj mashiny [Improved efficiency of plowing snow blower]. *Fundamental'nye issledovanija*. 2016; 5-3: 491-496. (In Russ.)

18. Pelenko V. V., Hlynovskij A. M., Barinov G. V. Povysenie resursa pary trenija nozh-reshetka v shnekovyh izmel'chiteljah tverdoobraznyh materialov [Increased life of friction pair of knife-grid in screw grinders of solid materials]. *Tehniko-tehnologicheskie problemy servisa*. 2022; 1 (59): 29-36. (In Russ.)

19. Zharnikov V. B., Pas'ko O. A., Ushakova N. S., Makarcova E. S. O soderzhanii monitoringa snezhnyh otvalov i podverzhennyh ih vlijaniju zemel' severnyh gorodov (na primere goroda Tomska) [On the content of monitoring snow dumps and the lands of northern cities subject to their influence (on the example of the city of Tomsk)]. *Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tehnologij)*. 2019; T. 24. № 1: 174-191. DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-1-174-191. (In Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов научной статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTIONS

Each author has an equal share of contributions to the theoretical sections of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алешков Денис Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры автоматизации и энергетического машиностроения, SPIN-код: 2503-8585.

Корчагин Павел Александрович – д-р техн. наук, проф. кафедры общеобразовательных дисциплин, SPIN-код: 5319-0662.

Тетерина Ирина Алексеевна – канд. техн. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела научно-исследовательского управления, SPIN-код: 6589-2080.

Хирьянов Евгений Викторович – аспирант очной формы обучения.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Denis S. Aleshkov – Cand. of Sci., Associate Professor of the Automation and Power Engineering Department, SPIN-код: 2503-8585.

Pavel A. Korchagin – Dr. of Sci., Professor of the "General Educational Disciplines Department, SPIN-код: 5319-0662.

Irina A. Teterina – Cand. of Sci., Senior researcher of the Research Department, SPIN-код: 6589-2080.

Evgeniy V. Khiryanov – Postgraduate student.

Научная статья

УДК 622.692.4

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-316-325>

EDN: HRKZQU



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФРЕЗЕРНОГО РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРА

И. С. Кузнецов*, С. В. Савельев*Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)**г. Омск, Россия,**mrprogamer111@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-6524-4976>**saveliev_sergval@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4034-2457>***ответственный автор*

АННОТАЦИЯ

Введение. Протяженная сеть трубопроводов на территории нашей страны нуждается в своевременном качественном ремонте. Используемый до сих пор шанцевый инструмент повышает трудоемкость работ по капитальному ремонту трубопроводов, что вынуждает создавать решения для механизации процесса подкопа трубопровода. Целью исследования, приведенного в данной статье, является определение производительности и суммарного крутящего момента рабочего оборудования экскаватора. Показан общий вид рабочего оборудования с обозначением позиций, необходимых для выполнения исследования.

Методы и материалы. Введено понятие удельных величин крутящего момента и мощности, приходящихся на один резец рабочего оборудования. Установлены зависимости суммарной производительности резцов и крутящего момента резцов. В связи с особенностью конструкции рабочего оборудования каждая из зависимостей рассмотрена отдельно для передних и задних резцов. Получены поверхности, отражающие влияние угловой скорости вращения фрезерной головки и угла установки резцов на исследуемые параметры.

Результаты. На основе полученной зависимости суммарного крутящего момента фрезерного рабочего оборудования была составлена номограмма. Задавая количество резцов N , скорости вращения рабочего фрезерной головки n и число ударов ударника ДорНИИ, можно определить необходимый крутящий момент гидромотора.

Заключение. По результатам проведенного теоретического исследования процесса резания грунта при помощи фрезерного рабочего оборудования экскаватора установлены зависимости суммарной производительности и суммарного крутящего момента рабочего оборудования. Построенные графические зависимости помогают определить степень влияния конструктивных и режимных параметров оборудования на процесс его работы. Созданная номограмма рекомендуется к применению при проектировании рабочего оборудования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ремонт трубопроводов, подземный трубопровод, экскаватор гидравлический, землеройная машина, разработка грунта

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы благодарят за поддержку научных исследований коллектив кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» ФГБОУ ВО «СибАДИ», а также рецензентов статьи.

Статья поступила в редакцию 01.02.2023; одобрена после рецензирования 27.03.2023; принята к публикации 26.06.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Кузнецов И. С., Савельев С. В. Определение характеристик фрезерного рабочего оборудования экскаватора // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 3 (91). С. 316-325. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-316-325>

© Кузнецов И. С., Савельев С. В., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-316-325>
EDN: HRKZQU

CHARACTERISTICS DETERMINATION FOR MILLING WORKING EQUIPMENT OF EXCAVATOR

Ilya S. Kuznetsov*, Sergey V. Saveliev

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)

Omsk, Russia

mrprogamer111@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-6524-4976>

saveliev_sergval@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4034-2457>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The long network of pipelines on the territory of our country needs timely and high-quality repairs. The trenching tool used so far increases the complexity of work on the overhaul of pipelines, which forces to create solutions for mechanizing the process of digging the pipeline. The purpose of the study conducted in this article is to determine the performance and total torque of the working equipment of the excavator. A general view of the working equipment with the designation of the positions necessary for the study is given.

Methods and materials. The concept of specific values of torque and power per one cutter of working equipment has been introduced. The dependencies of the total productivity of the cutters and the torque of the cutters are established. Due to the peculiarity of the design of the working equipment, each of the dependencies is considered separately for the front and rear incisors. The surfaces that reflect the influence of the angular velocity of rotation of the milling head and the angle of installation of the cutters on the parameters under the study are constructed.

Results. Based on the obtained dependence of the total torque of the milling working equipment, a nomogram was compiled. By setting the number of N cutters, the speed of rotation of n working milling head and the number of strokes of the DorNII (Road Research Institute) striker, it is possible to determine the required torque of the hydraulic motor.

Conclusions. According to the results of the theoretical study of the process of cutting soil with the help of excavator milling working equipment, the dependencies of the total productivity and total torque of the working equipment were established. The constructed graphic dependencies help to determine the degree of influence of design and operating parameters on the work process. The created nomogram is recommended for use in the design of working equipment.

KEYWORDS: pipeline repair, underground pipeline, hydraulic excavator, earthmoving machine, excavation.

GRATITUDES. The authors thanks the scientific research the team of the Operation of Oil and Gas and Construction Equipment Department of the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), as well as the reviewers of the article for their support.

The article was submitted 01.02.2023; approved after reviewing 27.03.2023; accepted for publication 26.06.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Kuznetsov Ilya S., Saveliev Sergey V. Characteristics determination for milling working equipment of excavator. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (3): 316-325. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-316-325>

© Kuznetsov I. S., Saveliev S. V., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

Протяженная сеть трубопроводов на территории Российской Федерации нуждается в своевременном ремонте. Качественное и быстрое выполнение ремонта снижает затраты на обслуживание трубопроводной сети и повышает отказоустойчивость всей системы [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Для этого необходимо использовать современные разработки в области эксплуатации и ремонта трубопроводов^{1,2,3,4,5,6} [7, 8, 9].

Технологическая карта ремонта трубопроводов до сих пор предусматривает использование шанцевого инструмента, хотя в настоящее время существуют способы механизированного удаления грунта, расположенного под трубопроводом^{7,8} [10, 11, 12, 13, 14, 15]. Одним из перспективных способов является применение ранее предложенного фрезерного рабочего оборудования экскаватора⁹. Оно разработано для установки на одноковшовые гидравлические экскаваторы. Привод гидромотора и гидроцилиндра рабочего оборудования обеспечивается подключением к гидравлическим линиям экскаватора, расположенным на рукояти и предназначенным для питания рабочего оборудования. После откапывания прямиков траншеи ковш экскаватора заменяется предлагаемым рабочим оборудованием. Оператор опускает рабочее оборудование на определенную глубину, запускает вращение фрезерной

головки и производит подачу гидроцилиндра рабочего оборудования до полного удаления грунта под трубопроводом.

В настоящий момент ведется работа по совершенствованию конструкции и созданию математической модели предлагаемого рабочего оборудования. Целью представленного в статье исследования является определение производительности и суммарного крутящего момента рабочего оборудования экскаватора. Фрезерное рабочее оборудование для подкопа трубопровода, установленное на базовую машину – экскаватор, представлено в виде схемы на рисунке 1.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для всестороннего понимания процесса взаимодействия резцов с грунтом введем понятие удельных величин крутящего момента и мощности, приходящихся на один резец и определяемых как частные этих величин на толщину рыхления h_p , а также понятие удельной производительности как отношение производительности к мощности.

Толщина рыхления грунта резцами определяется зависимостью

$$h_p = l_p \cdot \sin \alpha_p, \quad (1)$$

где l_p – длина резца; α_p – угол резания.

¹ Современные методы ремонта трубопроводов / Н. Х. Халлыев, Т. Н. Абасова, В. Г. Селиверстов [и др.]. Москва: ИРЦ Газпром, 1997. 44 с. (Газовая промышленность. Обзорная информация. Серия: Транспорт и подземное хранение газа). Текст: непосредственный.

² Решетников А. Д. Технологические процессы строительства и капитального ремонта магистральных газопроводов в сложных природно-климатических условиях / А. Д. Решетников. М.: СИП РИА, 2004. 320 с.

³ Технология сооружения газонефтепроводов / под ред. Ф. М. Мустафина. Т. 1. Уфа: Нефтегазовое дело, 2007. 632 с.

⁴ Аникин Е.А. Эффективные методы ремонта магистральных трубопроводов / Е.А. Аникин, Р.Д. Габелая, В.В. Салюков, Н.Х. Халлыев и др. М.: ИРЦ Газпром 2001. 108 с.

⁵ Кузнецов, И. С. К вопросу автоматизации расчета магистрального нефтепровода / И. С. Кузнецов // Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Омск, 08–09 февраля 2018 года / Министерство образования и науки Российской Федерации; Правительство Омской области; Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2018. С. 19–24.

⁶ Лукьянов А. А. Анализ напряженно-деформированного состояния ремонтных конструкций магистральных трубопроводов // Сварка и контроль - 2013: материалы международной научно-технической конференции, посвященной 125-летию изобретения Н. Г. Славяновым электродуговой сварки плавящимся электродом (Пермь, 15–17 мая 2013 г.). 2013. С. 181–188.

⁷ Баталин Ю. П. Организация строительства магистральных трубопроводов / Ю. П. Баталин, В. Л. Березин, Л. Г. Телегин, Б. Н. Ку репин. Москва: Недра, 1980. 344 с.: ил.; 22 см.

⁸ Халлыев Н.Х. Ремонт локальных участков трубопроводов / Н. Х. Халлыев, В. Г. Селиверстов, и др. Обз. Информ. Сер. Ремонт трубопроводов. М.: ИРЦ Газпром, 2001. 73 с.

⁹ Кузнецов, И. С. Особенности технологии применения фрезерного рабочего оборудования экскаватора для подкопа трубопровода / И. С. Кузнецов, А. И. Демиденко // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, Омск, 25–26 ноября 2021 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2021. С. 18–21.

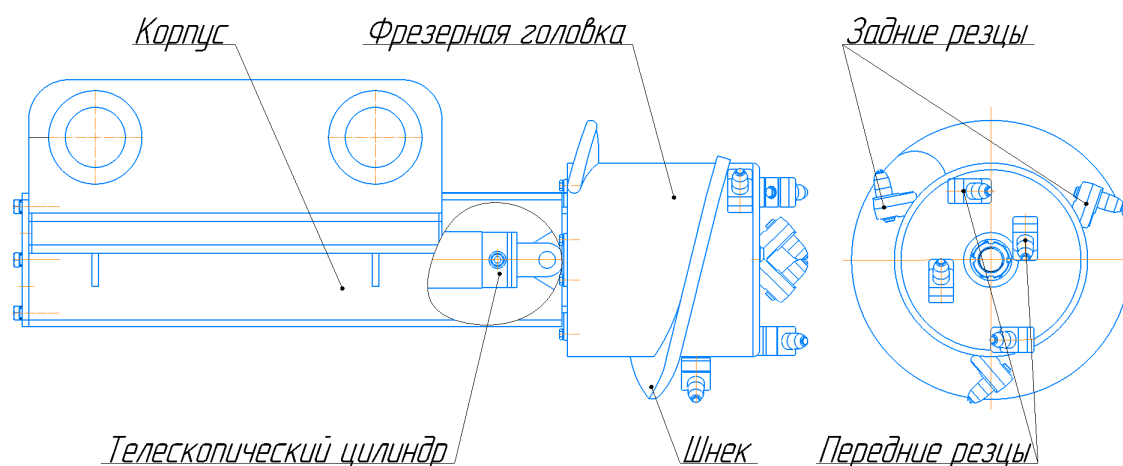


Рисунок 1 – Общий вид фрезерного рабочего оборудования
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – General view of the milling working equipment
Source: compiled by the authors.

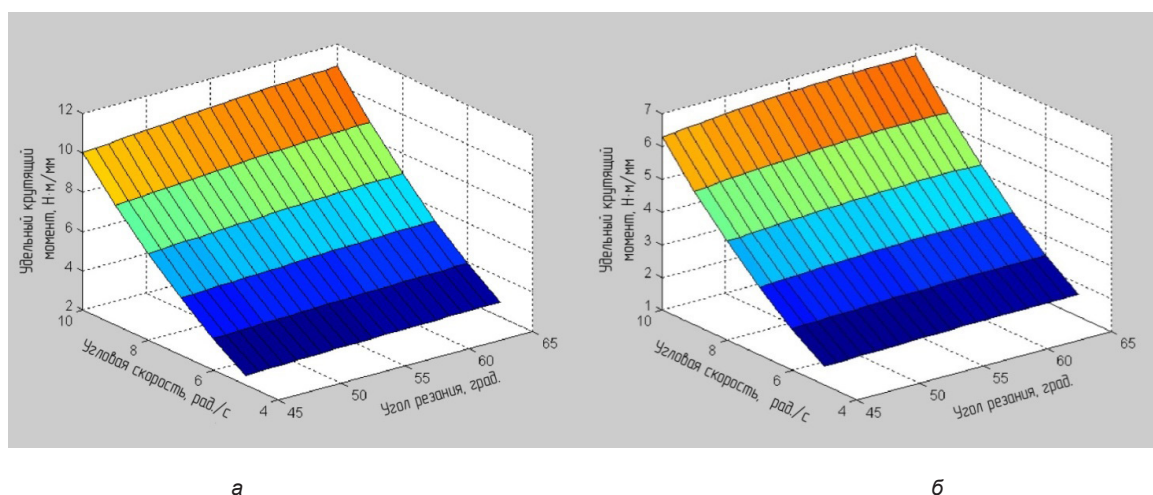


Рисунок 2 – Зависимость удельного крутящего момента от угла резания и угловой скорости:
а – на переднем резце; б – на заднем резце
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Dependence of the specific torque on the cutting angle and angular velocity:
a) on the front cutter; b) on the rear cutter
Source: compiled by the authors.

Для заднего резца производительность можно вычислить следующим образом:

$$\Pi_Z = v_{cp} \cdot h_p \cdot (R + 0,5h_p) \cdot \omega, \quad (2)$$

где v_{cp} – средняя ширина резца; R – радиус установки задних резцов; ω – скорость вращения фрезерной головки.

Суммарная производительность передних резцов вычисляется из зависимости

$$\begin{aligned} \Pi_P &= 2v_{cp} \cdot h_p \cdot R_W + 2v_{cp} \cdot h_p \cdot 0,5R_W = \\ &= 3v_{cp} \cdot h_p \cdot R_W, \end{aligned} \quad (3)$$

где R_W – радиус установки передних резцов.

Ранее были получены зависимости, позволяющие рассчитать крутящий момент и мощность на резцах фрезерного рабочего оборудования [16, 17]. На рисунках 2, 3 представлены поверхности, отражающие зависимость удельного крутящего момента и удельной мощности на один задний и передний резец в зависимости от угла резания и угловой скорости.

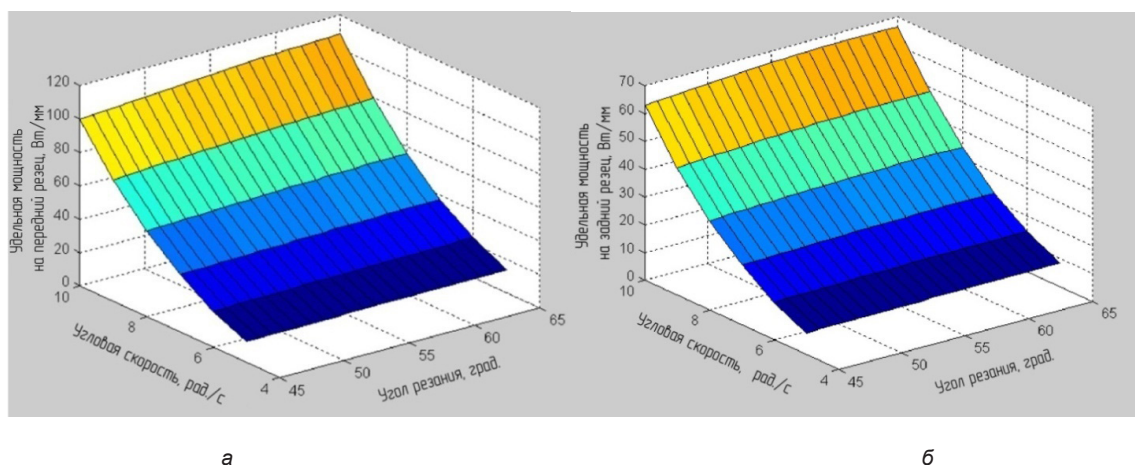


Рисунок 3 – Зависимость удельной мощности от угла резания и угловой скорости:
а – на переднем резце; б – на заднем резце
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Dependence of power density on cutting angle and angular velocity
a) on the front cutter; b) on the rear cutter
Source: compiled by the authors.

На основе зависимости (3) получены поверхности, отражающие зависимость удельной производительности для заднего и переднего резца от угла резания и угловой скорости. Данные зависимости изображены на рисунке 4.

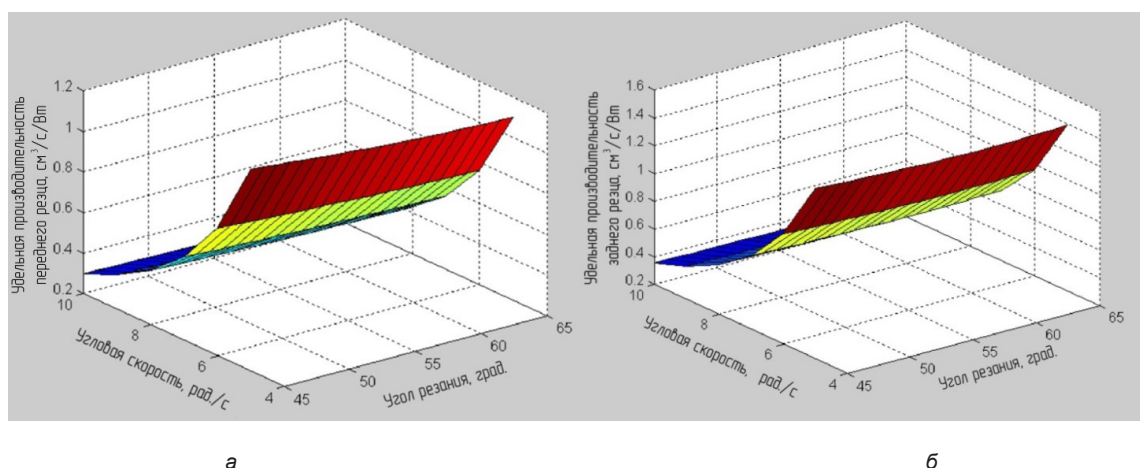


Рисунок 4 – Зависимость удельной производительности от угла резания и угловой скорости:
а – на переднем резце; б – на заднем резце
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Dependence of specific productivity on cutting angle and angular speed
a) on the front cutter; b) on the rear cutter
Source: compiled by the authors.

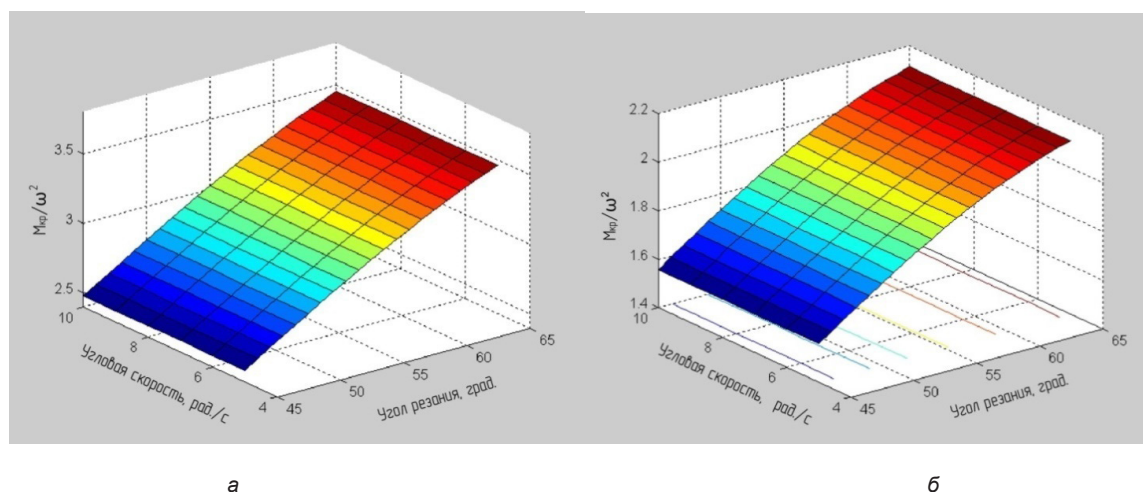


Рисунок 5 – Зависимость $M_{кр}/\omega^2$ от угла резания и угловой скорости:
а – для переднего резца; б – на заднем резце
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – $M_{кр}/\omega^2$ dependence on the cutting angle and angular velocity
a) for front cutter; b) for rear cutter
Source: compiled by the authors.

Из анализа графиков зависимостей для резцов следует, что крутящий момент и мощность на задних резцах, а также их удельные величины снижаются с уменьшением угловой скорости и снижением угла резания. При этом возрастает удельная производительность резцов. Однако при больших значениях угла резания ухудшается удаление срезанного грунта из забоя. Поэтому ограничиваем значение угла резания верхним пределом $\alpha_p = 60^\circ$. Из ряда современных высокомоментных гидромоторов принимаем максимальное значение угловой скорости $\omega = 10$ рад/с.

Анализируя исходные теоретические зависимости, можно заметить, что крутящий момент на резцах пропорционален квадрату угловой скорости ω^2 . Для проверки этой гипотезы строим графики зависимостей $M_{кр}/\omega^2$ от

угла резания и угловой скорости для заднего и переднего резцов (рисунок 5).

Анализ полученных графиков показывает, что величина $M_{кр}/\omega^2$ действительно не зависит от угловой скорости. Таким образом, для задних и передних резцов справедливы зависимости:

$$M_Z/\omega^2 = f_1(\alpha_p); \quad (4)$$

$$M_P/\omega^2 = f_2(\alpha_p), \quad (5)$$

где M_Z – крутящий момент на одном заднем резце, M_P – суммарный крутящий момент на передних резцах.

Графики функций $f_1(\alpha_p)$ и $f_2(\alpha_p)$ представлены на рисунке 6.

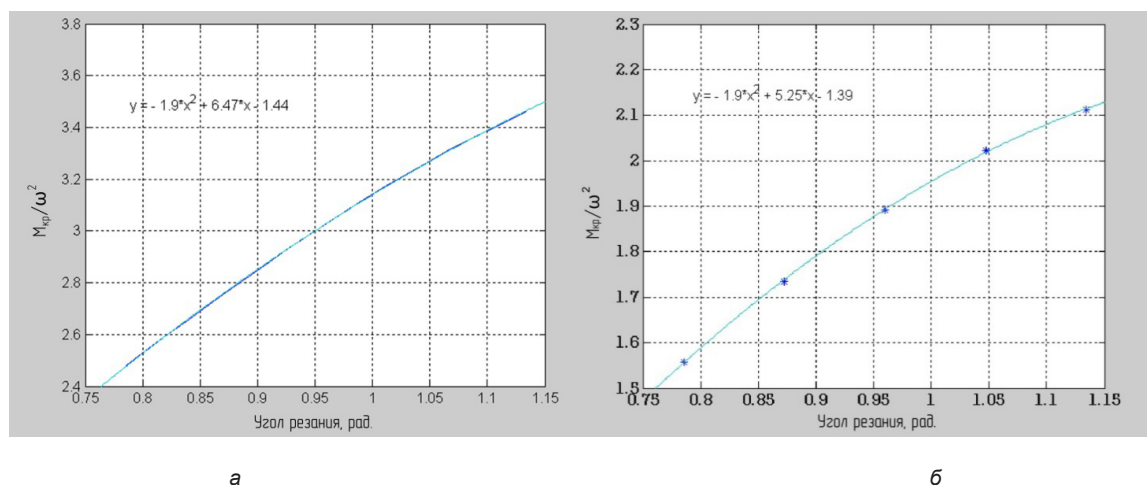


Рисунок 6 – Зависимость $M_{кр}/\omega^2$ от угла резания
а – для переднего резца; б – на заднем резце
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Dependence of $M_{кр}/\omega^2$ on the cutting angle
a) for front cutter; b) for rear cutter
Source: compiled by the authors.

Установлено, что графики функций успешно аппроксимируются квадратичной зависимостью

$$f_1(\alpha_p) = 5,25\alpha_p - 1,9\alpha_p^2 - 1,39; \quad (6)$$

$$f_2(\alpha_p) = 6,47\alpha_p - 1,9\alpha_p^2 - 1,44. \quad (7)$$

С учетом зависимостей (4) и (5) получим суммарный крутящий момент резцов

$$\Sigma M = \omega^2 [n(5,25\alpha_p - 1,9\alpha_p^2 - 1,39) + (6,47\alpha_p - 1,9\alpha_p^2 - 1,44)], \quad (8)$$

где n – количество задних резцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для удобства использования зависимости (8) была составлена номограмма, которая позволяет определить необходимый крутящий

момент гидромотора при проектировании спецоборудования без необходимости выполнения расчетов (рисунок 7).

Использовать номограмму необходимо следующим образом. На шкалах N и n отмечаем точки a и b , соответствующие числу задних резцов и частоте вращения фрезерной головки. Через отмеченные точки проводим прямую и продолжаем ее до пересечения со шкалой M/C_y (точка b). На шкале C_y отмечаем точку r , которая соответствует числу ударов ударника ДорНИИ. Через точки b и r проводим прямую, находим точку ее пересечения со шкалой M (точка d), соответствующую суммарному моменту сопротивления резанию. Требуемый крутящий момент гидромотора находим, прибавляя к полученному значению требуемый крутящий момент для привода шнека. По каталогу выбираем гидромотор, задаваясь значениями крутящего момента и частоты вращения рабочего органа.

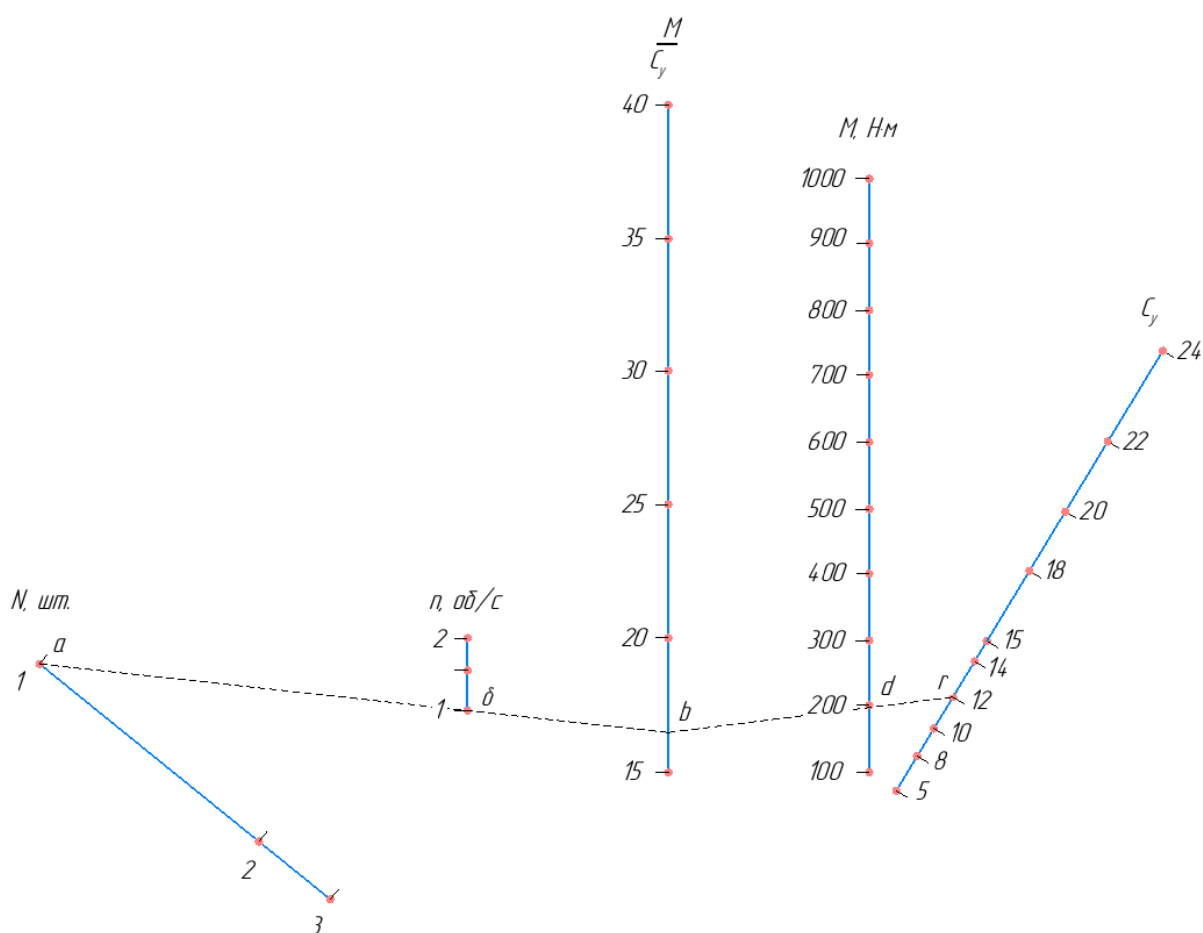


Рисунок 7 – Номограмма выбора крутящего момента гидромотора
Источник: составлено авторами.

Figure 7– Motor torque selection nomogram
Source: compiled by the authors.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило определить зависимости суммарной производительности и суммарного крутящего момента фрезерного рабочего оборудования. Построенные графические зависимости помогают определить степень влияния конструктивных и режимных параметров на процесс работы. Созданная номограмма может применяться при проектировании рабочего оборудования для выполнения предварительных расчетов с возможностью быстрого получения результата.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Chen F., Wu Ch. A novel methodology for forecasting gas supply reliability of natural gas pipeline systems // *Frontiers in Energy*. 2020. Issue 2. P. 213–223.

2. Зорин Е. Е., Толстов А. Э., Ефимов В. М. Напряженно-деформированное состояние трубопроводов подземной прокладки в условиях криолитозоны // *Нефть, газ и бизнес*. 2015. № 9. С. 9–12.

3. Набиев Р. Р. Обеспечение надежности длительно эксплуатируемых нефтепроводов // *Трубопроводный транспорт нефти*. 2010. № 12. С. 9–11.

4. Шарыгин Ю. М., Романцов С. В., Шарыгин А. М. Повышение прочности дефектных труб, усиленных композитными муфтами с болтовым соединением // *Транспорт и подземное хранение газа*. 2002. № 3. С. 104–107.

5. Непроектные положения газопроводов, проложенных подземным способом в районах многолетнемерзлых грунтов / А. М. Большаков [и др.] // *Газовая промышленность*. 2014. № 4. С. 66–69.

6. Булавинцева А. Д., Мазуркин П. М. Динамика аварий по причиненному ущербу на линейной части магистральных нефтепроводов ОАО АК «Транснефть» // *Современные наукоемкие технологии*. 2011. № 4. С. 64–67.

7. Черняев К. В. Мониторинг технического состояния нефтепроводов // Трубопроводный транспорт нефти. 2000. № 9. С. 14–17.

8. Моделирование динамики регулируемого гидромотора / Р. Т. Емельянов [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2014. № 8. С. 181–185.

9. Мухаммедова Д. Ч. Современные технические и технологические решения по повышению эффективности ремонта газопроводов // Молодой ученый. 2011. Т. 1, № 5-1. С. 86–88.

10. Пенчук В. А. Закономерности разрушения грунта рабочими органами машин для земляных работ // Известия ВУЗов. Строительство. 1999. № 1. С. 97–102.

11. Тиратсу Д. О выводе из эксплуатации объектов добычи и транспорта нефти: опыт Великобритании // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. № 1. С. 82–83.

12. Ruggieri C., Fernando D. Numerical modelling of ductile crack extension in highpressure pipeline with longitudinal flaws // Engineering Structures. 2011. Vol. 33. No. 5. 1423–1438.

13. Archibald I. C. Soil stabilizer // Pipeline and Gas Journal. 1984. No. 11. P. 44–46.

14. Timashev S., Bushinskaya A. Methods of assessing integrity of pipeline systems with different types of defects // Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems. 2016. Vol. 30. P. 9–43.

15. Mourad N., Rabia K. Pipelines reliability analysis under corrosion effect and residual stress // Arabian Journal for Science and Engineering. 2015;40(11):3273–3283.

16. Кузнецов И. С. Теоретические исследования процесса взаимодействия резца фрезерного рабочего оборудования экскаватора с грунтом // Вестник СибАДИ. 2021. Т. 18, № 1 (77). С. 42–50. DOI 10.26518/2071-7296-2021-18-1-42-50.

17. Демиденко А. И., Кузнецов И. С. Совершенствование конструкции рабочего оборудования гидравлического экскаватора // Вестник СибАДИ. 2020. Т. 17, № 1 (71). С. 12–21. DOI 10.26518/2071-7296-2020-17-1-12-21.

REFERENCES

1. Chen F., Wu Ch. A novel methodology for forecasting gas supply reliability of natural gas pipeline systems. *Frontiers in Energy*. 2020. Issue 2. P. 213–223.

2. Zorin E. E., Tolstov A. E., Yefimov V. M. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye truboprovodov podzemnoy prokladki v usloviyakh kriolitozony [Stress-strain state of underground pipelines in permafrost]. *Neft', gaz i biznes*. 2015; 9: 9–12. (In Russ.)

3. Nabiye R. R. Obespecheniye nadezhnosti dliitel'no ekspluatiruyemykh nefteprovodov [Ensuring the reliability of long-term oil pipelines]. *Truboprovodnyy transport nefti*. 2010; 12: 9–11. (In Russ.)

4. Sharygin YU. M., Romantsov S. V., Sharygin A. M. Povysheniye prochnosti defektnykh trub, usilennykh kompozitnymi muftami s boltovym soyedineniyem [Improving the Strength of Defective Pipes

Reinforced with Bolted Composite Couplings]. *Transport i podzemnoye khraneniye gaza*. 2002; 3:104–107. (In Russ.)

5. Bol'shakov A. M. Neproyektnyye polozheniya gazoprovodov, prolozhennykh podzemnym sposobom v rayonakh mnogoletnemerzlykh gruntov [Non-design provisions of gas pipelines laid underground in areas of permafrost soils]. *Gazovaya promyshlennost'*. 2014; 4: 66–69. (In Russ.)

6. Bulavintseva A. D., Mazurkin P. M. Dinamika avari po prichinennomu ushcherbu na lineynoy chasti magistral'nykh nefteprovodov OAO AK «Transneft» [Dynamics of accidents due to damage on the linear part of the main oil pipelines of OAO AK Transneft]. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii*. 2011; 4: 64–67. (In Russ.)

7. Chernyayev K. V. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya nefteprovodov [Monitoring of the technical condition of oil pipelines]. *Truboprovodnyy transport nefti*. 2000; 9: 14–17. (In Russ.)

8. Yemel'yanov R. T. Modelirovaniye dinamiki reguliruyemogo gidromotora [Modeling the Dynamics of a Variable Hydraulic Motor]. *Vestnik KrasGAU*. 2014; 8: 181–185. (In Russ.)

9. Mukhammedova D. CH. Sovremennyye tekhnicheskiye i tekhnologicheskkiye resheniya po povysheniyu effektivnosti remonta gazoprovodov [Modern technical and technological solutions to improve the efficiency of gas pipeline repair]. *Molodoy uchenyy*. 2011; T. 1. № 5-1: 86–88. (In Russ.)

10. Penchuk V. A. Zakonomernosti razrusheniya grunta rabochimi organami mashin dlya zemlyanykh rabot [Patterns of soil destruction by the working bodies of machines for earthworks]. *Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo*. 1999; 1: 97–102. (In Russ.)

11. Tiratsu D. O vyvode iz ekspluatatsii ob'yektov dobychi i transporta nefti: opyt Velikobritanii [On the decommissioning of oil production and transportation facilities: UK experience]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov*. 2017; 1: 82–83. (In Russ.)

12. Ruggieri C., Fernando D. Numerical modelling of ductile crack extension in highpressure pipeline with longitudinal flaws. *Engineering Structures*. 2011; Vol. 33. No. 5: 1423–1438.

13. Archibald I. C. Soil stabilizer // Pipeline and Gas Journal. 1984; No. 11:44–46.

14. Timashev S., Bushinskaya A. Methods of assessing integrity of pipeline systems with different types of defects. *Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems*. 2016; Vol. 30: 9–43.

15. Mourad N., Rabia K. Pipelines reliability analysis under corrosion effect and residual stress. *Ara-bian Journal for Science and Engineering*. 2015; 40 (11): 3273–3283.

16. Kuznetsov I.S. Theoretical study of interaction process of cutter for milling working equipment of excavator with soil. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (1): 42–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-42-50>

17. Demidenko A.I., Kuznetsov I.S. Improvement of the hydraulic excavator's working equipment. *The Rus-*

sian Automobile and Highway Industry Journal. 2020; 17 (1): 12-21. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-12-21>

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Кузнецов И.С. – разработка конструкции рабочего оборудования, нахождение аналитических зависимостей и построение графиков.

Савельев С.В. – разработка номограммы на основе полученных данных.

AUTHORS CONTRIBUTION

Ilya S. Kuznetsov (Omsk, Russia) – working equipment design development, finding analytical dependencies and plotting.

Sergey V. Saveliev (Omsk, Russia) – development of a nomogram based on the received data.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Илья Сергеевич Кузнецов – преподаватель кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники», SPIN-код: 6890-3069.

Савельев Сергей Валерьевич – д-р техн. наук, директор Института дополнительного образования, проф. кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники», SPIN-код: 4135-8370.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ilya S. Kuznetsov (Omsk, Russia) – teacher of Oil and Gas and Construction Equipment Operation Department, SPIN-код: 6890-3069.

Sergey V. Saveliev (Omsk, Russia) – Dr. of Sci., Head of the Additional Education Institute, Professor of the Oil and Gas and Construction Equipment Operation Department, SPIN-код: 4135-8370.

Научная статья

УДК 625.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-326-336>

EDN: TTTPPI



РАСЧЁТ ВЫСОТЫ ВИТКА СПИРАЛЬНОГО НОЖА

В. А. Николаев*Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия**Nikolaev53@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-7503-6612>*

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема ускорения и удешевления строительства автодорог без снижения их качества может быть решена путём создания комплекса агрегатов непрерывного действия. Агрегаты, следуя друг за другом, осуществляют весь комплекс работ, направленных на строительство автодорог. Одним из элементов агрегата непрерывного действия, формирующего кювет, является прямоточный роторный рыхлитель. Выявлено, что для выемки грунта вблизи оси вращения ротора прямоточного роторного рыхлителя должен быть установлен, соосно с большим ротором, малый ротор с большей угловой скоростью. Малый ротор содержит: наконечник малого ротора со спиральными ножами, два зубца и два ножа. Одним из элементов малого ротора является спиральный нож. Взаимодействие с грунтом спиральных ножей исследовано недостаточно.

Методика исследования. Рассмотрено взаимодействие с грунтом наконечника малого ротора со спиральными ножами. Углы наклона первого и второго витка спирали определены построением развёртки. Приняты допущения: соотношение сил, действующих на часть конуса со спиралью, к части конуса без спирали равно отношению длин образующих этих частей конуса; спиральный нож не тормозит агрегат и не ускоряет его, то есть сумму сил, противодействующих внедрению конуса в грунт, уравновешивают силы, внедряющие конус в грунт. Сумма условных нормальных реакций конуса на воздействие грунта равна произведению удельного сопротивления грунта на площадь поверхности конуса и на коэффициент, учитывающий увеличение удельного сопротивления грунта по мере его уплотнения конусом.

Результаты. На основе методики произведены расчёты и построения. Площадь передней поверхности витка спирального ножа приблизительно равна произведению высоты витка на длину его средней линии. Путём построений выявлена длина средней линии витков. Зависимости длин спирали от высоты витка спирального ножа показаны на рисунках. Установлены пределы углов наклона основания первого и второго витка спирального ножа. Определена высота витка спирального ножа.

Заключение. Построением развёртки определены углы наклона первого и второго витка спирали. Путём построения проекций на поперечно-вертикальную плоскость определены длины средних линий витков спирального ножа. На основании расчётов, с учётом изнашивания в процессе эксплуатации и искажения проекции спирали на поперечно-вертикальную плоскость, принята высота витка спирального ножа 10 мм.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, автодороги, агрегаты непрерывного действия, прямоточный роторный рыхлитель, малый ротор, наконечник, спиральный нож

Статья поступила в редакцию 04.05.2023; одобрена после рецензирования 01.06.2023; принята к публикации 26.06.2023.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Николаев В. А. Расчёт высоты витка спирального ножа // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 3 (91). С. 326-336. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-326-336>

© Николаев В. А., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-326-336>
EDN: TTTPII

TURN HEIGHT CALCULATION FOR SPIRAL BLADE

Vladimir A. Nikolayev

Yaroslavl Technical University,

Yaroslavl, Russia

Nikolaev53@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-7503-6612>

ABSTRACT

Introduction. The problem of accelerating and reducing the cost of road construction without reducing their quality can be solved by creating a complex of continuous units. The units, following each other, carry out the whole range of works aimed at the construction of roads. One of the elements of the continuous unit that forms the cuvette is a direct-flow rotary ripper. It was revealed that for excavation near the axis of rotation of the rotor of a direct-flow rotary ripper, a small rotor with a higher angular velocity should be installed, coaxially with a large rotor. The small rotor contains: a small rotor tip with spiral blades, two teeth and two knives. One of the elements of the small rotor is a spiral blade. The interaction with the soil of spiral blades has not been sufficiently studied.

The method of research. The interaction with the ground of the tip of a small rotor with spiral blades is considered. The angles of inclination of the first and second turns of the spiral are determined by the construction of the scan. The following assumptions are made: the ratio of the forces acting on the part of the cone with the spiral to the part of the cone without the spiral is equal to the ratio of the lengths of the cones forming these parts; The spiral blade does not slow down the unit and does not accelerate it, that is, the sum of the forces that counteract the introduction of the cone into the ground balances the forces that introduce the cone into the ground. The sum of the conditional normal reactions of the cone to the impact of the soil is equal to the product of the resistivity of the soil and the surface area of the cone and the coefficient that takes into account the increase in the resistivity of the soil as it is compacted by the cone.

Results. On the basis of the methodology, calculations and constructions were made. The area of the front surface of the turn of the spiral blade is approximately equal to the product of the height of the turn and the length of its midline. By construction, the length of the midline of the turns was revealed. The dependences of the length of the spiral on the height of the turn of the spiral blade are shown in the figures. The limits of the angles of inclination of the base of the first and second turns of the spiral blade are established. The height of the turn blade is determined.

Conclusion. The angles of inclination of the first and second turns of the spiral are determined by constructing the scan. By constructing projections on the transverse-vertical plane, the lengths of the middle lines of the spiral blade spins are determined. Based on the calculations, taking into account wear during operation and distortion of the projection of the spiral on the transverse-vertical plane, the height of the spiral blade is 10 mm.

KEYWORDS: construction, roads, continuous units, straight-flow rotary ripper, small rotor, tip, spiral blade

The article was submitted 04.05.2023; approved after reviewing 01.06.2023; accepted for publication 26.06.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Nikolayev Vladimir A. Turn height calculation for spiral blade. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (3): 326-336. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-326-336>

© Nikolayev V. A., 2023



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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ:

1) выявлены силы воздействия грунта на наконечник малого ротора со спиральными ножами;

2) разработана методика построения развёртки для определения углов наклона первого и второго витка спирали;

3) разработана методика построения проекций на поперечно-вертикальную плоскость для определения длин средних линий витков спирального ножа;

4) на основании расчётов принята высота витка спирального ножа.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема ускорения и удешевления строительства автодорог без снижения их качества может быть решена путём создания комплекса агрегатов непрерывного действия [1]. Агрегаты, следуя друг за другом, осуществляют весь комплекс работ, направленных на строительство автодорог. Одним из элементов агрегата непрерывного действия, формирующего кювет, является прямооточный роторный рыхлитель^{1,2}. Установлено [2], что оптимальная скорость агрегата $v_a = 0,085$ м/с. Путём логических рассуждений, расчётов, построений в плоскости и пространстве определены геометрические и режимные параметры большого ротора прямооточного роторного рыхлителя диаметром 1 м [3]. Выявлено, что для выемки грунта вблизи оси вращения ротора прямооточного роторного рыхлителя должен быть установлен, соосно с большим ротором, малый ротор с большей угловой скоростью. Малый ротор содержит: наконечник малого ротора со спиральными ножами (рисунок 1), два зубца и два ножа.

Одним из элементов малого ротора является спиральный нож. Хотя теоретические ос-

новы разработки грунта весьма подробно рассмотрены^{3, 4, 5, 6, 7} [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22], взаимодействие с грунтом элементов прямооточного роторного рыхлителя почти не изучено. В частности, недостаточно исследовано взаимодействие с грунтом спиральных ножей.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим взаимодействие с грунтом наконечника малого ротора со спиральными ножами. Угловая скорость малого ротора $\omega_{мр} = 12,9$ рад/с [23]. Время одного оборота малого ротора $\tau_{1 мр} = 0,486$ с. За это время точка на витке спирального ножа переместится по ходу агрегата на расстояние около 41 мм, так как поступательная скорость этой точки близка к скорости агрегата. В целом спиральный нож не тормозит агрегат и не ускоряет его. Он, ввинчиваясь в грунт, должен бы лишь уплотнять его в радиальном направлении.

Схема условных сил, воздействующих на наконечник малого ротора со стороны грунта, показана на рисунке 1. Силы назовём условными, так как реальные силы распределены по поверхности конуса и спирального ножа, а они условно приложены к конусу с одной стороны. Для выполнения расчёта приведём в два этапа распределённые силы к сосредоточенным. На первом этапе распределённые по поверхности силы приведём к силам, распределённым по линиям. На наконечнике малого ротора есть часть конуса, не охваченная спиральным ножом. Разделим образующую этой части конуса в пропорции 1:2 и поставим на ней точку K . Воздействие грунта на эту часть конуса распределим по окружности, проходящей перпендикулярно оси малого ротора через точку K .

¹ Патент РФ №2735497. Прямоточный роторный рыхлитель / Николаев В.А.; заявл. 09.01.2019 №2019100367; опубл. 03.11.2020, Бюл. №31. 14 с.

² Патент РФ №2709849. Агрегат непрерывного действия, формирующий кювет и основание автомобильной дороги / В.А. Николаев; заявл. 17.03.2020 №2020111163; опубл. 23.12.2019, Бюл. №36.13 с.

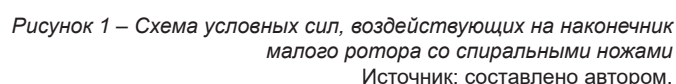
³ Баловнев [и др.] Машины для земляных работ: конструкции, расчёт, потребительские свойства: учебное пособие для вузов: в 2 кн. Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. 401 с.

⁴ Исследования рабочих органов землеройных машин непрерывного действия: Обзор / З. Е. Гарбузов, Г. А. Матушев, Г. Б. Нарет, Л. Н. Смирнов; Под общ. ред. канд. техн. наук З. Е. Гарбузова. - Москва: [б. и.], 1966. 89 с.: ил.; 21 см. (Серия I "Строительные и дорожные машины"/ М-во строит., дор. и коммун. машиностроения СССР. Науч.-исслед. ин-т информации по строит., дор. и коммун. машиностроению).

⁵ Жук А. Ф. Теоретическое обоснование рациональной технологической схемы и параметров ротационного плуга // Теория и расчёт почвообрабатывающих машин: сборник научных трудов. М.: Машиностроение, 1989. Т. 120. С. 145–153.

⁶ Попов Г. Ф. Рабочие органы фрез: материалы НТС ВИСХОМ. Вып. 27. М.: ОНТИ ВИСХОМ, 1970. С. 490–497.

⁷ Зыков Б. И. Теория рабочих процессов строительных машин: Учеб. пособие / Б. И. Зыков; М-во образования Рос. Федерации. Ярослав. гос. техн. ун-т. Ярославль: [Яросл. гос. техн. ун-т], 2003 (Тип. ЯГТУ). 114 с.



Условные силы воздействия на грунт первого витка спирали F_{c1} и второго витка спирали (по ходу агрегата) F_{c2} не равны друг другу по трём причинам. Во-первых, площади воздействия витков спирали на грунт разные. Допустим, высота спирали на всём протяжении спирального ножа одинаковая.

Тогда по мере ввинчивания в грунт длина образующей конуса монотонно увеличивается. Следовательно, будет увеличиваться площадь воздействия спирали на грунт.

Во-вторых, по мере внедрения конуса он уплотняет грунт, поэтому грунт, на который воздействует второй виток спирали, плотнее. Степень уплотнения грунта конусом зависит от многих факторов: тип грунта, его состав, влажность, пористость. Так как плотность грунта по мере внедрения в него конуса увеличивается, сила, противодействующая внедрению конуса в грунт, также будет увеличиваться. С другой стороны, чем плотнее грунт, тем более эффективно воздействие на него спирали спирального ножа. Соотношение увеличения силы, противодействующей внедрению конуса в грунт, и нарастания силы воздействия на грунт спирали спирального ножа неизвестно. Эти соотношения для различных грунтов в разном их состоянии могут быть установлены только экспериментальным путём. Для теоретического расчёта примем допущение: увеличение силы, противодействующей внедрению конуса в грунт, равновелико нарастанию силы воздействия на грунт спирали спирального ножа. Этим исключим из расчёта фактор увеличения плотности грунта по мере внедрения в грунт конуса.

В-третьих, средний угол наклона второго витка спирали меньше, чем первого витка спирали. Для графического определения углов наклона первого и второго витка спирали на рисунке 2, а по горизонтали отложим длины AB и BC проекций, образующих на осевую линию спирального ножа равные 41 мм. Из точек A , B и C вертикально отложим отрезки AD , BE и CF , равные длинам окружностей, проведённым перпендикулярно оси малого ротора через основания спирали в начале и конце её витков. Например, радиус основания первого витка спирали варьируется от 8 мм вначале до 19,5 мм [23]. Радиус основания второго витка спирали изменяется от 19,5 до 31 мм. Длина окружности $CF = 2\pi \cdot 8 \approx 50$ мм, $BE = 2\pi \cdot 19,5 \approx 122,5$ мм, $AD = 2\pi \cdot 31 \approx 195$ мм.

Соединим точки D , E и F . Из точек E и F проведём горизонтали и получим точки K и L . Соединив отрезками точки B и K , C и L , получим углы наклона основания спирали в начале первого и второго витка. Соединив отрезками точки B и D , C и E , получим углы наклона основания спирали в конце первого и второго витка.

Из построения видно, что угол наклона основания спирали в начале первого вит-

ка $39,35^\circ$ больше угла трения стали о грунт $\varphi_{ст} \approx 25^\circ$. Поэтому начальная часть (по ходу агрегата) основания первого витка спирального ножа при работе будет не только тормозиться о грунт, но и нерационально смещать его. Будет нецелесообразное расходование энергии на перемещение начальной части основания первого витка спирального ножа. Чтобы этого не произошло, следовало бы укоротить первый виток спирального ножа, удалив начальную часть.

Отложим от вертикали из точки C угол 25° . Проведём под этим углом отрезок CM , из точки M – горизонталь MN , а из точки N – вертикаль NP . Получим расстояние BP , равное 19,5 мм по оси малого ротора, на которое должен был бы распространиться первый виток спирального ножа вперёд от начала второго витка спирального ножа, если бы задняя поверхность спирального ножа была перпендикулярна оси малого ротора (рисунок 2, б).

Однако такой профиль спирального ножа нерационален, так как при ввинчивании спирального ножа в грунт часть усилия от его задней поверхности будет через грунт распространяться на конус. Таким образом, наконечник малого ротора будет тормозить своё поступательное перемещение в грунте. Поэтому целесообразнее вариант исполнения спирального ножа, при котором задняя поверхность спирального ножа перпендикулярна образующей конуса (рисунок 2, в). Угол заточки спирального ножа должен также быть меньше угла трения стали о грунт. Примем угол заточки спирального ножа 20° .

Если задняя поверхность спирального ножа перпендикулярна образующей конуса, во-первых, произойдёт небольшая трансформация угла наклона первой и второй спирали в сторону его уменьшения. Во-вторых, по мере удаления от основания витка спирального ножа также происходит трансформация угла наклона спирали в сторону его уменьшения. В-третьих, чем позднее (по ходу агрегата) спираль будет врезаться в грунт, тем больший вращающий момент необходим для преодоления сопротивления грунта внедрению торца спирального ножа, поскольку будет увеличиваться плечо силы, необходимой для внедрения торца спирального ножа. При этом увеличение момента, необходимого для преодоления сопротивления грунта внедрению торца спирального ножа, может быть большим, чем увеличение момента, вызванное нецелесообразным расходованием энергии на перемещение начальной части первого витка спирального ножа.

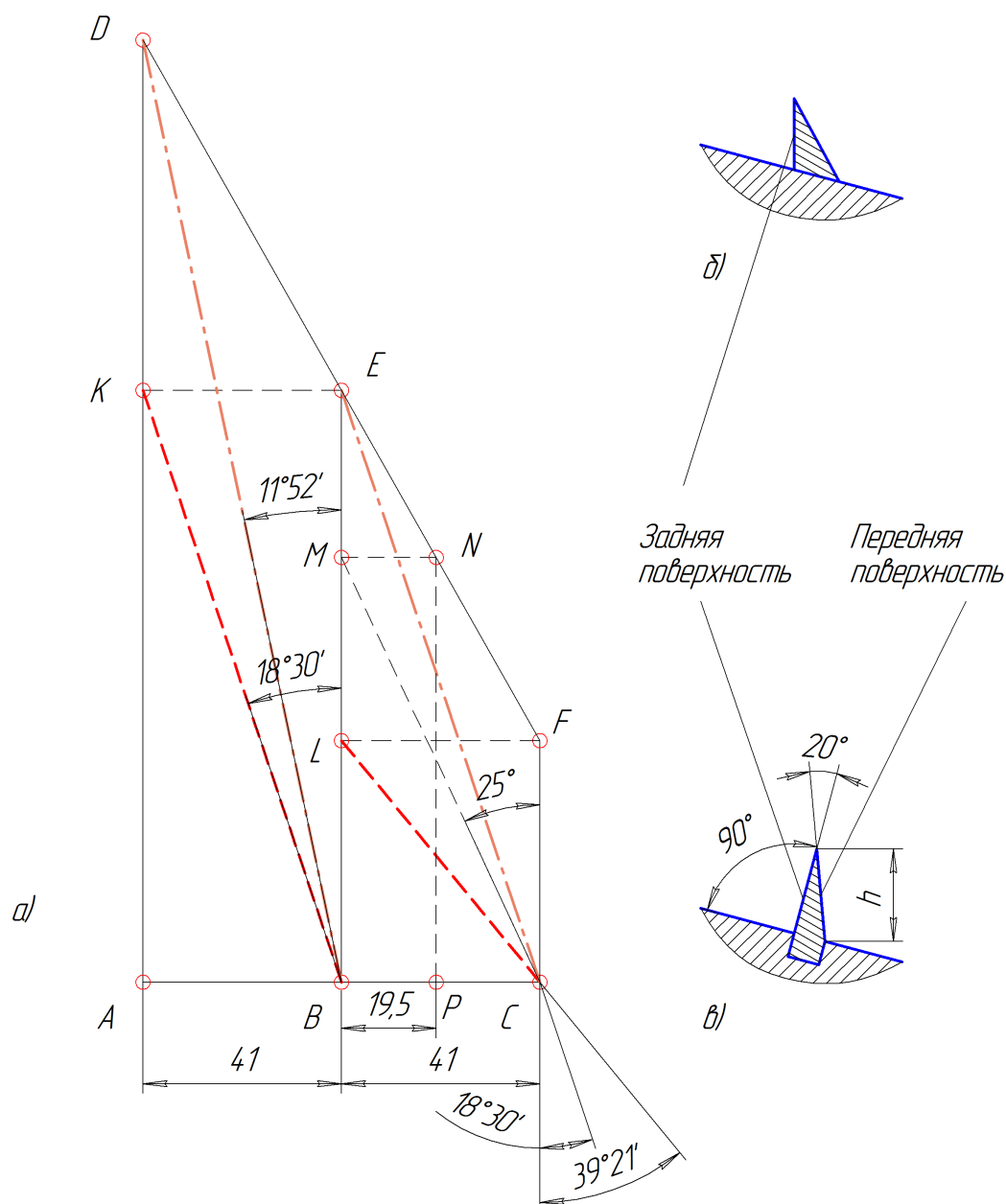


Рисунок 2 – К определению угла наклона первого и второго витка спирали:
 а – построения; б – задняя поверхность спирального ножа перпендикулярна оси малого ротора;
 в – задняя поверхность спирального ножа перпендикулярна образующей конуса
 Источник: составлено автором.

Figure 2 – To determine the angle of inclination of the first and second turns of the spiral: a - construction;
 b - the rear surface of the spiral blade is perpendicular to the axis of the small rotor;
 c – the back surface of the spiral blade is perpendicular to the forming cone
 Source: compiled by the authors.

В-четвёртых, увеличится часть конуса, не охваченная спиральным ножом, создающая лишь сопротивление поступательному перемещению агрегата. Исходя из этих предпосылок, оставим первый виток спирального ножа без изменений.

Допустим, соотношение сил, действующих на часть конуса со спиралью, к части ко-

нуса без спирали равно отношению длин образующих этих частей конуса, то есть $\frac{30}{90} = \frac{1}{3}$, или $F_{к2} = 3F_{к1}$. Допустим также, что спиральный нож не тормозит агрегат и не ускоряет его, то есть сумму сил, противодействующих внедрению конуса в грунт, уравновешивают силы, внедряющие конус в грунт:

$$F_{c1} + F_{c2} = F_{k1} + F_{k2} = 4F_{k1}. \quad (1)$$

Условная сила $4F_{k1}$, противодействующая внедрению конуса в грунт, обусловлена его трением о грунт, то есть условными силами $F_{\tau1}$ и $F_{\tau2}$. Так как угол при вершине конуса 30° , то

$$4F_{k1} = \frac{4F_{\tau1}}{\cos 15^\circ}.$$

Условная сила трения конуса

$$4F_{\tau1} = f_{c-\Gamma}(N_{k1} + N_{k2}),$$

где коэффициент трения грунта о сталь $f_{c-\Gamma} \approx 0,5$.

Сумма условных нормальных реакций конуса на воздействие грунта равна произведению удельного сопротивления грунта p на площадь поверхности конуса S_k и на коэффициент k , учитывающий увеличение удельного сопротивления грунта по мере его уплотнения конусом:

$$N_{k1} + N_{k2} = kpS_k. \quad (2)$$

Площадь поверхности конуса $S_k = \pi r l$, поэтому

$$N_{k1} + N_{k2} = kp\pi r l; \quad (3)$$

$$4F_{\tau1} = f_{c-\Gamma}kp\pi r l;$$

$$4F_{k1} = \frac{f_{c-\Gamma}kp\pi r l}{\cos 15^\circ}. \quad (4)$$

Условная сила F_{c1} , внедряющая конус в грунт, равна произведению удельного сопротивления грунта p на площадь поверхности первого витка спирали S_{1c} , на коэффициент k , учитывающий увеличение удельного сопротивления грунта по мере его уплотнения конусом и на косинус угла наклона спирали:

$$F_{c1} = kpS_{1c} \cos \beta_1. \quad (5)$$

Аналогично

$$F_{c2} = kpS_{2c} \cos \beta_2. \quad (6)$$

Подставив в формулу (1), получим

$$kp(S_{1c} \cos \beta_1 + S_{2c} \cos \beta_2) = \frac{f_{c-\Gamma}kp\pi r l}{\cos 15^\circ}, \quad (7)$$

$$S_{1c} \cos \beta_1 + S_{2c} \cos \beta_2 = \frac{f_{c-\Gamma}\pi r l}{\cos 15^\circ}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Радиус основания конуса [30] $r=31$ мм, длина образующей $l=120$ мм. Отсюда (7)

$$S_{1c} \cos \beta_1 + S_{2c} \cos \beta_2 = \frac{0,5 \cdot 3,14 \cdot 31 \cdot 120}{0,966} = 6046 \text{ мм}^2.$$

Из рисунка 2, в видно, что площадь передней поверхности витка спирального ножа приблизительно равна произведению высоты витка h на длину его средней линии, соответственно:

$$S_{1c} = hl_{c1}; S_{2c} = hl_{c2}.$$

Средняя линия – это такая спираль, которая проходит на расстоянии $h/2$ от основания витка спирального ножа. Длина средней линии витка спирального ножа зависит от геометрических параметров спирального ножа. Спроецируем несколько спиралей на поперечно-вертикальную плоскость (рисунок 3) с целью приблизительного определения графическим путём зависимостей длин средних линий от высоты витка спирального ножа. Примем высоту h витка спирального ножа 0, 5, 10, 15 мм. На рисунке 3 вначале проведём окружности штриховыми линиями, соответствующие началу и окончанию витков спиралей. Затем разделим окружности на 8 частей, проведя радиальные линии из центров окружностей под углом 45° друг от друга. Вычислим шаг увеличения диаметра. Для этого вычтем из значения диаметра окружности, на которой виток спирали заканчивается, значение диаметра окружности, на которой виток спирали начинается, и разность разделим на 8. Например: $(39-16):8=2,875$ (см. рисунок 3, а). Добавляя к предыдущему диаметру шаг увеличения диаметра, вычертим тонкими линиями концентрические окружности.

На пересечении окружностей и соответствующих им радиальных линий поставим точки и соединим эти точки плавной кривой. Получим проекции спиралей на поперечно-вертикальную плоскость. Из рисунка 3, а длина первого витка спирали $l_1=86,8$ мм, второго витка – $l_2=158,3$ мм. Из рисунка 3, б длина первого витка спирали $l_1=117,8$ мм, второго витка – $l_2=189,5$ мм. Из рисунка 3, в длина первого витка спирали $l_1=149$ мм, второго витка – $l_2=220,8$ мм. Из рисунка 3, г длина первого витка спирали $l_1=180,2$ мм, второго витка – $l_2=252$ мм.

Зависимости длин спирали от высоты витка спирального ножа показаны на рисунках 4 и 5. Итак, зависимость длины средней линии l_{c1} первого витка спирали от высоты h спирального ножа:

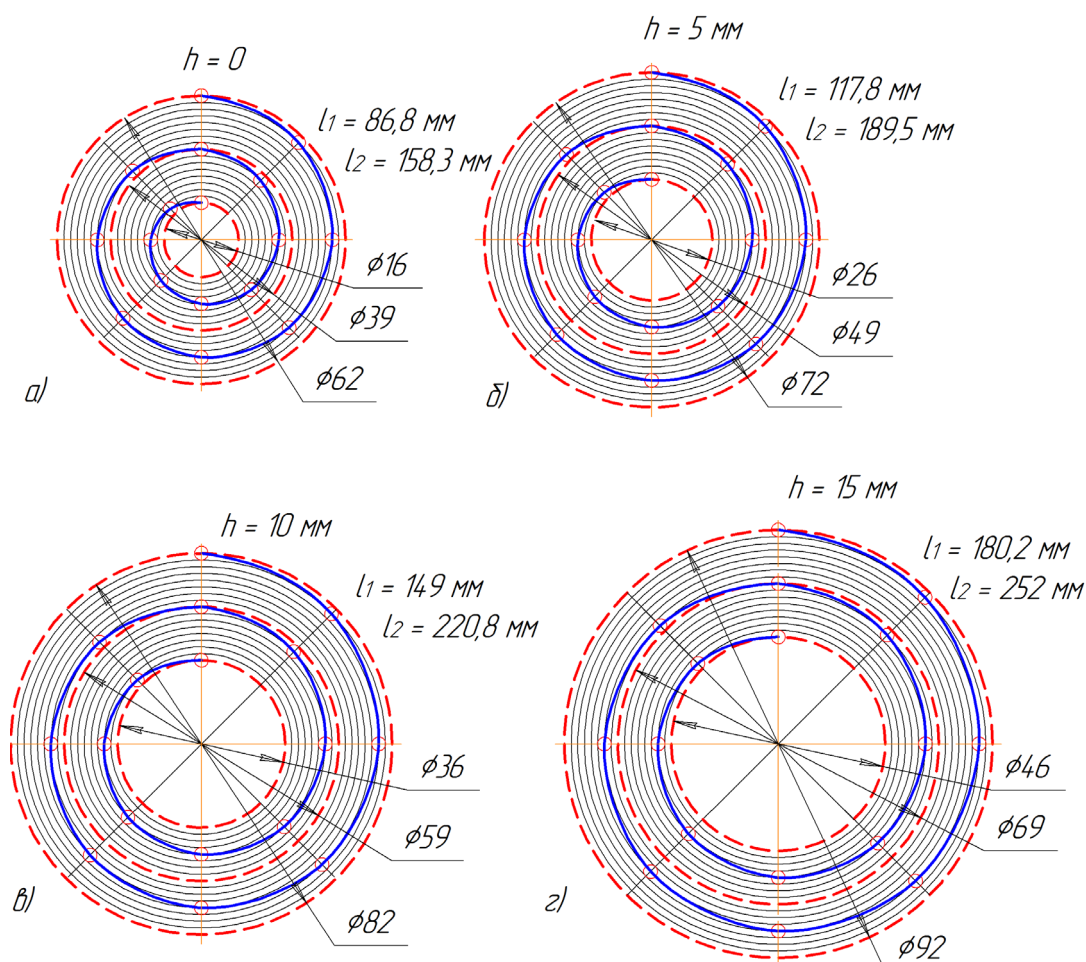


Рисунок 3 – К определению длин средних линий витков спирального ножа:
а, б, в, г – высота витка спирального ножа, соответственно, 0, 5, 10, 15 мм
Источник: составлено автором.

Figure 3 – To determine the lengths of the middle lines of the turns of the spiral blade:
a, b, c, d - the height of the turn of the spiral blade, respectively, 0, 5, 10, 15 mm
Source: compiled by the authors.

$$l_{c1} = 31,14h + 55,6, \quad (8)$$

второго витка

$$l_{c2} = 31,24h + 127. \quad (9)$$

Угол наклона основания первого витка спирального ножа изменяется приблизительно от $39,5^\circ$ в начале до $18,5^\circ$ в конце первого витка

(см. рисунок 2). Угол наклона основания второго витка спирального ножа изменяется приблизительно от $18,5^\circ$ в начале до 12° в конце второго витка.

С целью упрощения расчёта примем средние значения углов наклона оснований витков спирали: первой – $\beta_1 = 30^\circ$, второй – $\beta_2 = 15,75^\circ$, соответственно, $\cos \beta_1 = 0,866$, $\cos \beta_2 = 0,962$.

Формула (7) примет вид:

$$0,866h(31,14h + 55,6) + 0,962h(31,24h + 127) = 6046 \text{ мм}^2;$$

$$26,97h^2 + 48,15h + 30,05h^2 + 122,17h = 6046 \text{ мм}^2;$$

$$57,02h^2 + 170,32h - 6046 = 0;$$

$$h = \frac{-170,32 \pm \sqrt{170,32^2 + 4 \cdot 57,02 \cdot 6046}}{2 \cdot 57,02} = \frac{-170,32 \pm 1186,58}{114,04}.$$

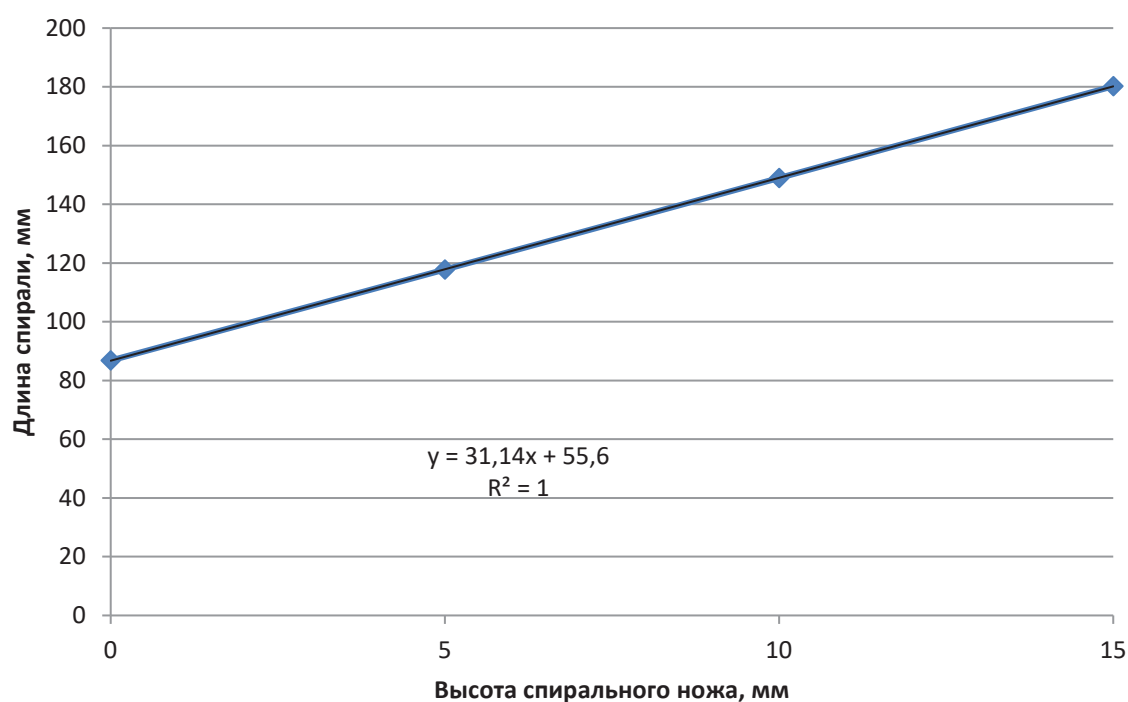


Рисунок 4 – Зависимость длины первого витка спирали от высоты спирального ножа
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Dependence of the length of the first turn of the spiral on the height of the spiral blade
Source: compiled by the authors.

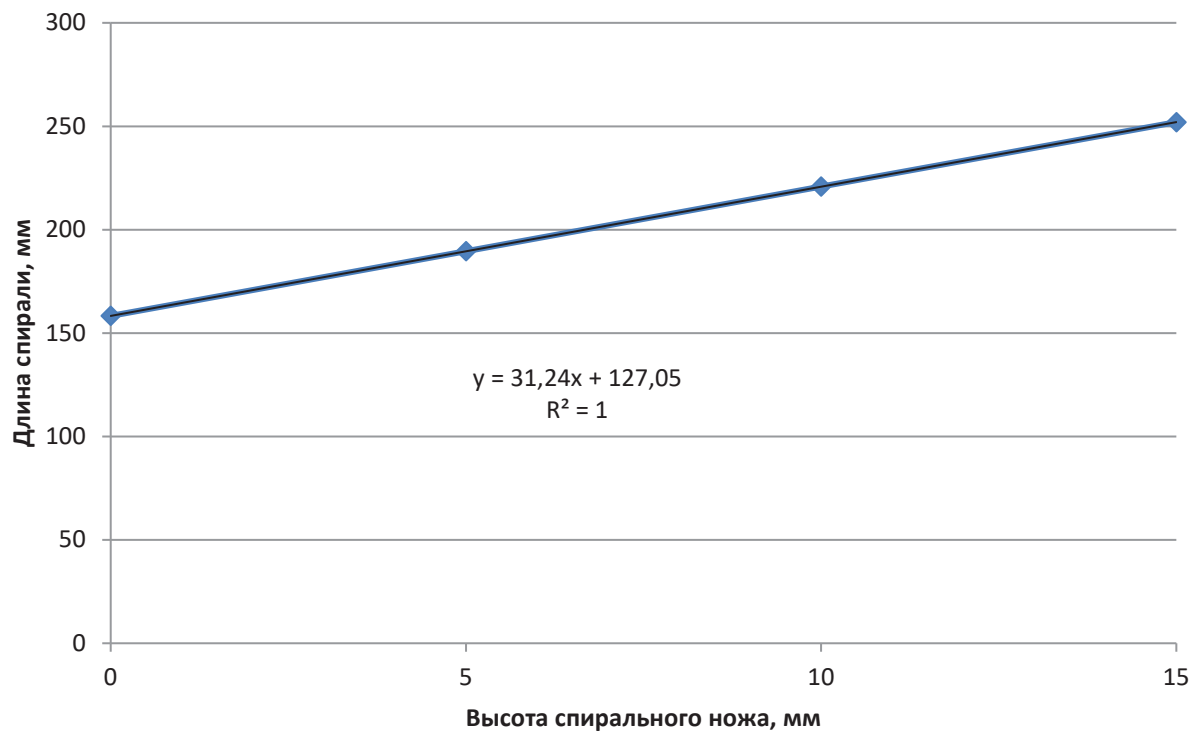


Рисунок 5 – Зависимость длины второго витка спирали от высоты спирального ножа
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Dependence of the length of the second turn of the spiral on the height of the spiral blade
Source: compiled by the authors.

Первый корень $h = \frac{-170,32+1186,58}{114,04} = 8,9$ мм. Второй корень отрицательный, поэтому не имеет смысла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построением развёртки определены углы наклона первого и второго витка спирали. Путём построения проекций на поперечно-вертикальную плоскость определены длины средних линий витков спирального ножа. На основании расчётов, с учётом изнашивания в процессе эксплуатации и искажения проекции спирали на поперечно-вертикальную плоскость, примем высоту витка спирального ножа $h=10$ мм.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Николаев В. А. Определение затрат энергии, необходимой для воздействия поверхности ножа и нижней части отвала бульдозера на грунт в начале прохода. *Вестник СибАДИ*. 2022; 19 (4): 484-499. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-484-499>
2. Николаев В. А. Расчёт скорости прямооточного роторного рыхлителя // *Дороги и мосты*. Сборник, выпуск 41/1. Москва. 2019. С. 35–39.
3. Николаев В. А. Конструктивная компоновка и режимные параметры большого ротора прямооточного роторного рыхлителя. *Вестник СибАДИ*. 2022; 19(6): 800-813. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-800-813>
4. Карасёв Г. Н. Определение силы резания грунта с учётом упругих деформаций при разрушении // *Строительные и дорожные машины*. 2008. № 4. С. 36–42.
5. Карнаухов А. И., Орловский С. Н. Определение затрат удельной энергии на процесс резания лесных почв торцевыми фрезами // *Строительные и дорожные машины*. 2010. № 1. С. 20–22.
6. Кравец И. М. Определение критической глубины резания при комбинированном резании грунтов гидрофрезой // *Строительные и дорожные машины*. 2010. № 5. С. 47–49.
7. Кириллов Ф. Ф. Детерминированная математическая модель временного распределения тягового усилия для многолезцовых рабочих органов землеройных машин // *Строительные и дорожные машины*. 2010. № 11. С. 44–48.
8. Берестов Е. И. Влияние трения грунта по поверхности ножа на сопротивление резанию // *Строительные и дорожные машины*. 2010. № 11. С. 34–38.
9. Баловнев В. И., Нгуен З. Ш. Определение сопротивлений при разработке грунтов рыхлителем по интегральному показателю прочности // *Строительные и дорожные машины*. 2005. № 3. С. 38–40.
10. Ryabets N., Kurzner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy // *Cold Regions Science and Technology*. 2003. Vol. 36. P. 115-128.

11. Liu X., Liu P. Experimental research on the compressive fracture toughness of wing fracture of frozen soil // *Cold Regions Science and Technology*. 2011. Vol. 65. P. 421-428.

12. Talalay P.G. Subglacial till and Bedrock drilling // *Cold Regions Science and Technology*. 2013. Vol. 86. P. 142-166.

13. Li Q. Development of Frozen Soil Model // *Advances in Earth Science*. 2006. №12. P. 96-103.

14. Atkinson J. The Mechanics of Soils and Foundations. CRC. Press. 2007. 448 p.

15. Баловнев В. И., Данилов Р. Г., Улитич О. Ю. Исследование управляемых ножевых систем землеройно-транспортных машин // *Строительные и дорожные машины*. 2017. № 2. С. 12–15.

16. Нилов В. А., Фёдоров Е. В. Разработка грунта скрепером в условиях свободного резания // *Строительные и дорожные машины*. 2016. № 2. С. 7–10.

17. Чмиль В. П. Насосно-аккумулятивный привод рыхлителя с автоматическим выбором угла резания // *Строительные и дорожные машины*. 2016. № 11. С. 18–20.

18. Кабашев Р. А., Тургумбаев С. Д. Экспериментальные исследования процесса копания грунтов роторно-дисковыми рабочими органами под гидростатическим давлением // *Вестник СибАДИ*. 2016. № 4. С. 23–28.

19. Сёмкин Д. С. О влиянии скорости рабочего органа на силу сопротивления резанию грунта // *Вестник СибАДИ*. 2017. № 1. С. 37–43.

20. Константинов Ю. В. Методика расчёта сопротивления и момента сопротивления резанию почвы прямым пластинчатым ножом фрезы // *Тракторы и сельхозмашины*. 2019. № 5. С. 31–39.

21. Сыромятников Ю. Н., Храмов И. С., Войнаш С. А. Гибкий элемент в составе рабочих органов роторной почвообрабатывающей рыхлительно-сепарирующей машины // *Тракторы и сельхозмашины*. 2018. № 5. С. 32–39.

22. Пархоменко Г. Г., Пархоменко С. Г. Силовой анализ механизмов перемещения рабочих органов почвообрабатывающих машин по заданной траектории // *Тракторы и сельхозмашины*. 2018. № 1. С. 47–54.

23. Николаев В. А. Конструктивная компоновка малого ротора прямооточного роторного рыхлителя // *Вестник СибАДИ*. 2023; 20 (2): 194–203. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-194-203>

REFERENCES

1. Nikolayev V.A. Determination of the energy required to expose the surface of the knife and the bottom of the bulldozer blade to the ground at the beginning of the pass. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022;19(4):484-499. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-484-499>
2. Nikolaev V. A. Raschjot skorosti prjamotochnogo rotornogo ryhlitelja [Calculation of the speed of the ramjet rotary ripper]. *Dorogi i mosty. Sbornik, vypusk 41/1*. Moskva. 2019: 35-39. (In Russ.)
3. Nikolayev V.A. Structural layout and operating parameters for a large rotor of a direct-flow bucket

wheel type aggregator. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (6): 800-813. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-800-813>.

4. Karasjov G. N. Opredelenie sily rezanija grunta s uchjotom uprugih deformacij pri razrushenii [Definition of the cutting force of soil considering elastic deformation at fracture]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2008; 4: 36-42. (In Russ)

5. Karnauhov A. I., Orlovskij S. N. Opredelenie zatrat udel'noj jenergii na process rezanija lesnyh pochv torcevyimi frezami [Costing of specific energy on the cutting process of forest soils end mills]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 1: 20-22. (In Russ)

6. Kravec I. M. Opredelenie kriticheskoj glubiny rezanija pri kombinirovannom rezanii gruntov gidrofrezoz [Determine critical cutting depth when combined cutting soils gidrofrezoz]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 5: 47-49. (In Russ)

7. Kirillov F. F. Determinirovannaja matematicheskaja model' vremennogo raspredelenija tjavovogo usilija dlja mnogorezcovykh rabochih organov zemlerojnyh mashin [Deterministic mathematical model of the temporal distribution of traction for mnogorezcovykh working bodies of earthmoving machines]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 11: 44-48. (In Russ)

8. Berestov E. I. Vlijanie trenija grunta po poverhnosti nozha na soprotivlenie rezaniju [Influence of friction of soil on the surface of the knife cutting resistance]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 11: 34-38. (In Russ)

9. Balovnev V. I., Nguen Z. Sh. Opredelenie soprotivlenij pri razrabotke gruntov ryhlitelem po integral'nomu pokazatelju prochnosti [Identification of resistances when designing primers Ripper by a combined indicator of strength]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2005; 3: 38-40. (In Russ)

10. Ryabets N., Kurzchner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy. *Cold Regions Science and Technology*. 2003; Vol. 36:115-128.

11. Liu X., Liu P. Experimental research on the compressive fracture toughness of wing fracture of frozen soil. *Cold Regions Science and Technology*. 2011; 65: 421-428.

12. Talalay P. G. Subglacial till and Bedrock drilling. *Cold Regions Science and Technology*. 2013; Vol. 86: 142-166.

13. Li Q. Development of Frozen Soil Model. *Advances in Earth Science*. 2006;12: 96-103.

14. Atkinson J. The Mechanics of Soils and Foundations. CRC. Press. 2007: 448.

15. Balovnev V. I., Danilov R. G., Ulitich O. Ju. Issledovanie upravljajemykh nozhevykh sistem zemlerojno-transportnyh mashin [Study of guided knife systems of ground-moving vehicles]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2017; 2: 12-15. (In Russ.)

16. Nilov V. A., Fjodorov E. V. Razrabotka grunta skreperom v uslovijah svobodnogo rezanija [Ground development with a scraper in free cutting conditions]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2016; 2: 7-10. (In Russ.)

17. Chmil' V. P. Nasosno-akkumulativnyj privod ryhlitelja s avtomaticheskim vyborom ugla rezanija [Pump-accumulating ripper drive with automatic cutting angle selection]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2016; 11: 18-20. (In Russ.)

18. Kabashev R. A., Turgumbaev S. D. Jeksperimental'nye issledovanija processa kopanija gruntov rotno-diskovymi rabochimi organami pod gidrostaticheskim davleniem [Experimental studies of the process of digging soils by rotary-disk working organs under hydrostatic pressure]. *Vestnik SibADI*. 2016; 4: 23-28. (In Russ.)

19. Sjomkin D.S. O vlijanii skorosti rabocheho organa na silu soprotivlenija rezaniju grunta [On the impact of the speed of the working body on the force of resistance to ground cutting]. *Vestnik SibADI*. 2017; 1: 37-43. (In Russ.)

20. Konstantinov Ju. V. Metodika raschjota soprotivlenija i momenta soprotivlenija rezaniju pochvy pri jamym plastinchatym nozhom frezy [The method of calculating resistance and the moment of resistance to soil cutting with a straight plate cutter knife]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2019; 5: 31-39. (In Russ.)

21. Syromjatnikov Ju. N., Hramov I. S., Vojnash S. A. Gibkij jelement v sostave rabochih organov rotnoj pochvoobrabatyvajushhej ryhlitel'no-separirujushhej mashiny [Flexible element in the working organs of the rotary soil processing loosening and separating machine]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2018; 5: 32-39. (In Russ.)

22. Parhomenko G. G., Parhomenko S. G. Silovoj analiz mehanizmov peremeshhenija rabochih organov pochvoobrabatyvajushhih mashin po zadannoj traektorii [Power analysis of the mechanisms of movement of working bodies of soil processing machines on a given trajectory]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2018; 1: 47-54. (In Russ.)

23. Nikolaev V.A. Constructive layout for small rotor of straight-flow rotary ripper. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023;20(2):194-203. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-194-203>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Николаев Владимир Анатольевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные и дорожные машины», SPIN-код: 8865-0397.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir A. Nikolayev. Dr. of Sci., Professor of the Construction and Road Machinery Department, SPIN-код: 8865-0397.

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.13
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-338-349>
EDN: BVBDTX



ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ДЛЯ БЕЗОПАСНОГО ПЕРЕДВИЖЕНИЯ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ МОБИЛЬНОСТИ

В. В. Донченко, В. А. Купавцев*

Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт
автомобильного транспорта (НИИАТ)»,
г. Москва, Россия

doncenko@niiat.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0544-7608>
kupavtsev.v.a@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3964-0534>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Несмотря на введение новых поправок в правила дорожного движения, на дорогах Российской Федерации продолжают происходить ДТП с участием средств индивидуальной мобильности (СИМ). Анализ статистических показателей позволил определить, что более 90% происшествий происходит с участием СИМ, оборудованных электродвигателем, в основном это столкновения с транспортными средствами, с менее мощными, не оборудованными электродвигателем. Происходят наезды на пешеходов, что свидетельствует об определённых выбираемых условиях для движения – проезжая часть и тротуары. Помимо этого, установлено, что в данных случаях одним из возникающих видов происшествий является опрокидывание, связанное с первой очередь с имеющимися элементами на участках городских улиц и городских дорог, обладающих определённой высотой над уровнем дорог и тротуаров. С целью определения возможности опрокидывания с учетом данных элементов, в рамках выполненного исследования выполнен анализ городской инфраструктуры, определены основные элементы, представляющие опасность для движения СИМ, установлены их геометрические параметры и выполнен математический расчет условий движения.

Методы и материалы. В качестве материалов и методов выполнения исследования определены методы статистического анализа и математического расчета.

Результаты. В результате расчета авторами определены опасные для движения СИМ элементы городской инфраструктуры, при взаимодействии с которыми с большой долей вероятности произойдет опрокидывание рассматриваемого устройства и травмирование водителя СИМ.

Заключение. В результате выполненных расчетов были установлены основные опасные элементы, расположенные на городских улицах и дорогах, установлено, что на процесс опрокидывания оказывают влияние геометрические показатели самого устройства. С учетом полученных результатов определены перспективные направления повышения безопасности движения СИМ в городских транспортных системах – разработка требования к безопасности СИМ и создание специализированной инфраструктуры для безопасного движения СИМ в условиях современных городов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: средства индивидуальной мобильности, элементы городской инфраструктуры, скорость движения, опрокидывание, безопасность

Статья поступила в редакцию 07.05.2023; одобрена после рецензирования 06.06.2023; принята к публикации 26.06.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Донченко В. В., Купавцев В. А. Исследование элементов городской инфраструктуры для безопасного передвижения средств индивидуальной мобильности // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 3 (91). С. 338-349. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-338-349>

© Донченко В. В., Купавцев В. А., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-338-349>
EDN: BVBDTX

STUDY OF URBAN INFRASTRUCTURE ELEMENTS FOR PERSONAL MOBILITY DEVICES SAFE MOVEMENT

Vadim V. Donchenko, Vladimir A. Kupavtsev*

OA Research Institute of Automobile Transport (NIIAT)
donchenko@niiat.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0544-7608>
kupavtsev.v.a@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3964-0534>
*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Despite the introduction of new amendments to the rules of the road, accidents involving personal mobility device (PMD) continue to occur on the roads of the Russian Federation. The analysis of statistical indicators makes possible to determine that more than 90% of accidents occur in populated areas, with the participation of PMDs equipped with electric motor mainly collisions with vehicles, with less powerful, not equipped with electric motor mainly collisions with pedestrians occur, which indicates certain chosen conditions for driving - the roadway and sidewalks. In addition, it was found that in these cases, one of the emerging types of accidents is tipping, associated primarily with the available elements on sections of city streets and city roads, which have a certain height above the level of roads and sidewalks. In order to determine the possibility of a overturning taking these elements into account, the analysis of the urban infrastructure was determined, the main elements that pose a risk to PMD traffic were identified, their geometric parameters were established and a mathematical calculation of the traffic conditions was carried out in the study.

Methods and materials. As materials and methods for the study, the methods of statistical analysis and mathematical calculations were defined.

Results. As a result of the calculation, the authors identified the elements of the urban infrastructure that are dangerous for the movement of the PMD, when interacting with which, with a high degree of probability, the device in question will overturn and injure the driver of the PMD.

Conclusion. The calculations have identified the main hazardous elements located on the city streets and urban roads. It was found that the process of overturning is influenced by the geometric characteristics of the device. In view of the obtained results, the perspective directions of improvement of traffic safety in urban transport systems - development of requirements for safety PMD and creation of specialized infrastructure for the safe movement of the PMD in the conditions of modern cities were determined.

KEYWORDS: personal mobility devices, urban infrastructure elements, travel speed, overturning, safety

The article was submitted 07.05.2023; approved after reviewing 06.06.2023; accepted for publication 26.06.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Donchenko V. V., Kupavtsev V. A. Study of urban infrastructure elements for personal mobility devices safe movement. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (3): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-338-349>

© Donchenko V. V., Kupavtsev V. A., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

С недавнего времени на городских дорогах Российской Федерации стали появляться новые средства передвижения, такие как электросамокаты, гироскутеры и др., именуемые как средства индивидуальной мобильности (СИМ) [1, 2, 3]. Активное распространение данных средств передвижения обусловлено относительно низкой стоимостью, повышенной маневренностью, возможностью передвижения на различных участках улично-дорожной сети, предназначенной как для движения пешеходов, например тротуары, так и для автомобилей, например проезжей части, также одним из аспектов использования СИМ явилось определенное социальное дистанцирование, которое стало очень актуальным в условиях распространения COVID-19.

Несмотря на ряд положительных аспектов пользования, СИМ появляется один основной негативный фактор, связанный в первую очередь с возрастающей аварийностью [4, 5, 6]. Согласно ежегодному отчету научного центра безопасности дорожного движения¹ в общей сложности за последние 4 года в Российской Федерации было зарегистрировано 2165 происшествий (в период с 2019 по 2022 г.), в которых погибло 53 чел. и было ранено 2 257 чел. (рисунок 1). Из представленной гистограммы (см. рисунок 1) видно, что количество происшествий с каждым годом увеличивается.

Следует отметить, что показатели аварийности в Российской Федерации, связанные с автомобильным транспортом, снижаются [7, 8, 9, 10, 11, 12], что объясняется комплексным подходом к вопросу безопасности дорожного

движения и принятием концепции «нулевой смертности».

Обработка имеющегося массива данных позволяет определить основные виды происшествий, которые возникают с участием СИМ с учетом мощности рассматриваемых устройств. Так, с участием устройств малой мощности (менее 0,25 кВт) основным видом является наезд на пешехода (95%), с участием устройств, оборудованных электродвигателем, максимальной номинальной мощностью свыше 0,25 кВт (более 0,25 кВт и менее 4 кВт) основным видом происшествий является столкновение (66%). Также установлено, что более 99% происшествий происходит в пределах населенных пунктов, что свидетельствует о том, что рассматриваемые средства передвижения являются преимущественно городским видом транспорта (рисунок 2).

Имеющиеся данные по аварийности показывают, что активное использование СИМ и увеличивающийся спрос на данные устройства требуют создания безопасной инфраструктуры для их передвижения. Безусловно, создание специализированных полос для движения во многом улучшило бы ситуацию и позволило снизить имеющиеся показатели аварийности. Но помимо этого, необходимо также ограничить скорость движения таких устройств, с учетом анализа показателей аварийности определено, что СИМ малой мощности, судя по видам происшествий, в основном используют для движения тротуары, предназначенные для движения пешеходов, чем и объясняется высокий процент «наезда на пешехода» (рисунок 2, а).

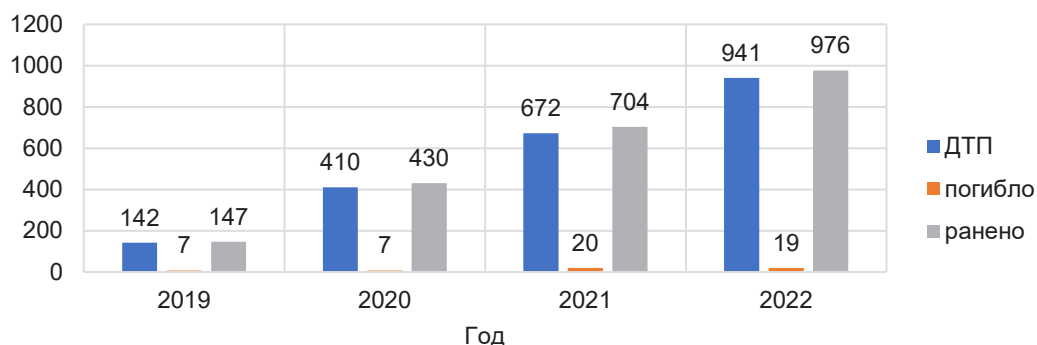


Рисунок 1 – Динамика основных показателей аварийности с участием СИМ [6]

Figure 1 – Dynamics of the main indicators of accidents involving PMD [6]

¹ Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации за 2022 год, Информационно-аналитический обзор. М.: ФКУ «НЦБДДМВДРоссии». 2023. 150 с.

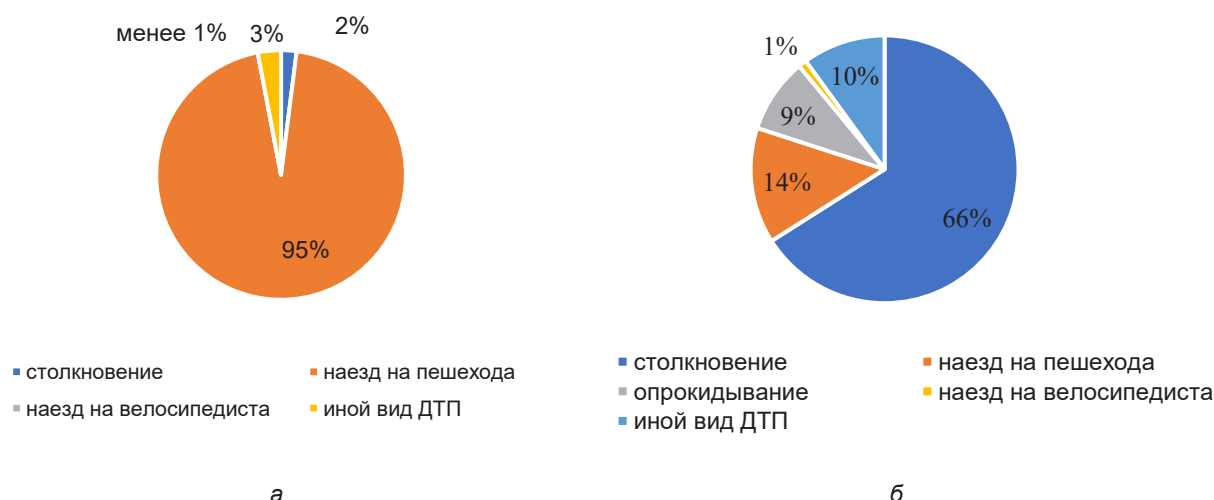


Рисунок 2 – Распределение видов ДТП с участием СИМ различной мощности [6]:
 а – распределение ДТП по видам с участием СИМ малой мощности (менее 0,25 кВт);
 б – распределение ДТП по видам с участием СИМ большей мощности (более 0,25 кВт и менее 4 кВт)

Figure 2 – Distribution of types of accidents involving PMDs of different capacities [6]
 b) distribution of accidents by type with participation of higher power PMDs
 (more than 0.25 kW and less than 4 kW)

В свою очередь СИМ большей мощности, способные развивать более высокие скорости для движения, в большинстве случаев используют для движения проезжую часть, предназначенную для движения автомобилей, чем и объясняется высокий процент такого вида происшествий как «столкновение» (рисунок 2, б).

Помимо представленных данных, в результате обработки статистических показателей определено процентное распределение ДТП с участием СИМ в зависимости от объекта улично-дорожной сети, на котором было зарегистрировано происшествие (рисунок 3).

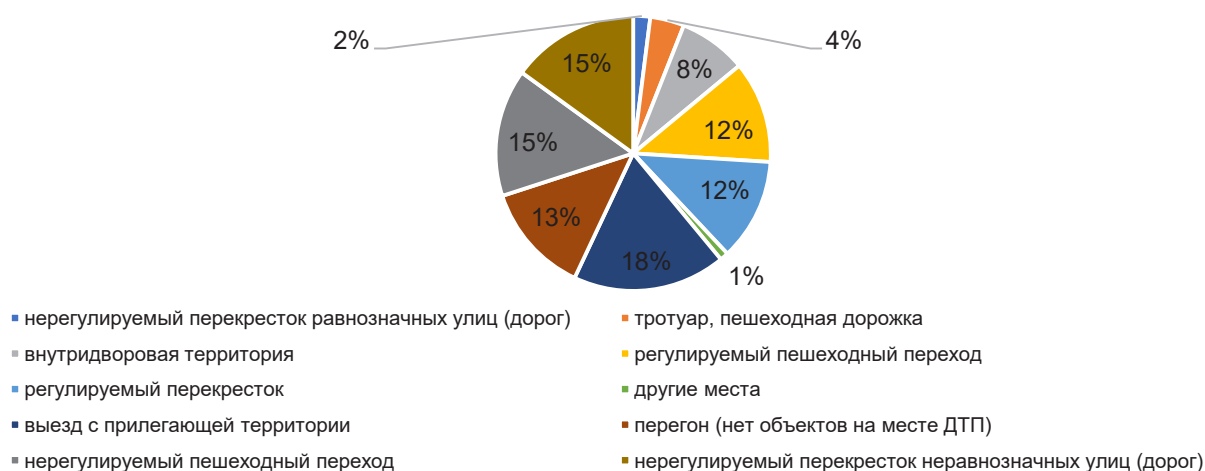


Рисунок 3 – Круговая диаграмма распределения ДТП с участием СИМ по условиям возникновения в зависимости от объекта улично-дорожной сети [6]

Figure 3 – Circle diagram of the distribution of accidents involving PMDs according to the conditions of occurrence, depending on the object of the street and road network [6]

Данные по распределению происшествий с участием СИМ свидетельствуют о необходимости ограничения скорости движения рассматриваемых устройств, с учетом безопасности городской инфраструктуры, предназначенной для движения пешеходов и автомобилей [13, 14, 15, 16]. По аналогии, как ранее разрабатывалась транспортная инфраструктура и пешеходная [17, 18, 19, 20], необходимо создание отдельной, предназначенной для передвижения средств индивидуальной мобильности. Согласно данным, представленным на рисунке 3, можно отметить, что более 10% происшествий происходит на проезжей части, тем не менее на тротуарах и пешеходных дорожках также возникают ДТП. Для водителя СИМ наибольшую опасность будет представлять движение по проезжей части ввиду высокой вероятности возникновения происшествия типа «столкновения». Высокий процент происшествий типа «наезд на пешехода» с учетом движения СИМ малой мощности свидетельствует о том, что в таком случае наибольшая вероятность возникновения происшествий и травмирования будет для пешеходов с учетом разницы скоростей в движении.

Говоря о снижении скорости движения СИМ, при условии движения их на тротуарах и на проезжей части следует осуществить исследование по условиям безопасности самой инфраструктуры. Так, в соответствии с нормативными документами как на тротуарах, так и на проезжей части возможно наличие определенных выступов, связанных в первую очередь с элементами улично-дорожной сети, такими как люки, бордюры, искусственные неровности и пр. Возвышенность данных элементов при наезде рассматриваемых устройств может привести к опрокидыванию, в таком случае необходимо выполнить анализ основных геометрических параметров данных элементов и осуществить расчет скорости движения СИМ с учетом его технических показателей. В связи с этим основная цель исследования заключается в изучении основных элементов городской инфраструктуры для расчета скоростных показателей движения СИМ. Основные задачи

исследования: 1. Анализ основных элементов городской инфраструктуры и их параметров в соответствии с требованиями нормативной документации. 2. Определение основных технических параметров СИМ с учетом анализа рынка продаж. 3. Расчет скоростных показателей движения СИМ при взаимодействии (наезде) на определенные элементы (препятствия).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование улично-дорожной сети г. Москвы и анализ основных нормативных документов позволили определить основные типы препятствий, встречающихся на городских дорогах и городских улицах:

1. Бордюр типа БР 100.20.8 – для отделения пешеходных дорожек и тротуаров от газонов – 200 мм².

2. Искусственная неровность – высота 7 см³.

3. Бордюр типа БЛ 300.32.68 – для отделения проезжей части улиц, дорог от тротуаров и газонов и устройства полос безопасности – 320 мм⁴.

4. Колея проезжей части. Согласно нормативному документу ⁵ на проезжей части возможно образовании колеи, устранение которой при глубине более 5 см осуществляется при капитальном ремонте дорог и улиц.

Для единообразия рассмотренных элементов, а также возможных дефектов, установлены их основные геометрические параметры в размерной единице – метр и сведены в обобщенную таблицу 1.

Для выполнения математического расчета и определения основных скоростных характеристик движения СИМ при наезде (взаимодействии) с установленными элементами (см. таблицу 1) необходимо знать основные технические характеристики мобильных устройств. В связи с этим в рамках исследования выполнен анализ рынка продаж рассматриваемых устройств и существующих исследований в данной области [21, 22], которые позволили установить, что наиболее распространенной моделью СИМ является электросамокат Mi Electric Scooter, технические характеристики которого представлены в таблице 2.

² ГОСТ 52875–2018 Указатели тактильные наземные для инвалидов по зрению. Технические требования. М.: Стандартинформ. 28 с.

³ ГОСТ 6665–91 Камни бетонные и железобетонные бортовые. Технические условия. М.: Стандартинформ. 39 с.

⁴ ГОСТ Р 52605–2006 Технические средства организации дорожного движения. Искусственные неровности. Общие технические требования. Правила применения. М.: Стандартинформ. 16 с.

⁵ ГОСТ Р 50597–2017 Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Методы контроля. М.: Стандартинформ. 28 с.

Таблица 1
Высота основных элементов городских дорог и городских улиц,
представляющих определенную опасность для движения средств индивидуальной мобильности
Источник: составлено авторами.

Table 1
The height of the main elements of urban roads and city streets that pose a certain risk
to the movement of personal mobility devices
Source: compiled by the authors.

№ п/п	Наименование элемента	Допустимая максимальная возвышенность элемента над уровнем проезжей части или тротуара, h_{max} , м
1	Бордюр для отделения пешеходных дорожек	0,2 м
2	Искусственная неровность	0,07 м
3	Бордюр для отделения проезжей части	0,32 м
4	Колея проезжей части	0,05 м

Таблица 2
Электросамокат Mi Electric Scooter
Источник: составлено авторами.

Table 2
Mi Electric Scooter
Source: compiled by the authors.

Техническая характеристика	Показатель
Длина самоката	113 см
Высота рулевой стойки	118 см
Максимальная нагрузка	100 кг
Максимальная скорость	25 км/ч
Количество колес	2
Диаметр колеса	216 мм
Масса	14,2 кг
Размер деки (ширина платформы)	43 см
Ширина покрышки колеса	50–156 мм, в большинстве случаев 60 мм

Для обозначения основных параметров при наезде колеса электросамоката на препятствие была использована программная

среда Tinkercad, которая позволяет графически визуализировать рассматриваемый процесс (рисунок 4).

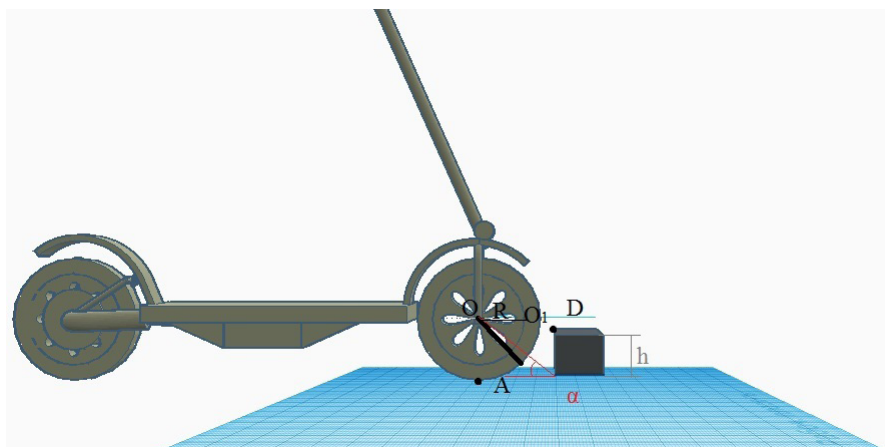


Рисунок 4 – Визуализация процесса наезда колеса самоката на препятствие в программной среде Tinkercad
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Visualization of the process of scooter wheel collision on the obstacle in the Tinkercad software environment
Source: compiled by the authors.

Движение самоката осуществляется равномерно с постоянной скоростью – v , радиус колеса самоката – R , с учетом высоты препятствия определена величина ε , которую возможно вычислить с использованием формулы

$$\varepsilon = h/R. \quad (1)$$

В результате анализа процесса наезда колеса на препятствие было установлено, что в момент столкновения колесо самоката опирается на дорогу в т. А и в дальнейшем будет соприкасаться с вершиной препятствия в т. D, высота препятствия h , тогда $\sin$ и $\cos$ возможно вычислить с использованием формул:

$$\sin \alpha = 1 - \varepsilon, \quad (2)$$

$$\cos \alpha = \sqrt{\varepsilon(2 - \varepsilon)}. \quad (3)$$

При взаимодействии с препятствием – ударе, колесо самоката получает обратный горизонтальный импульс, который определяется модулем отраженной скорости $|v|$, зависящим от коэффициента упругости – k , определяемого по формуле

$$|v| = kv, \quad (4)$$

где k находится в пределе от 0 до 1.

В результате соударения угловую скорость вращения колеса возможно определить с использованием формулы

$$\omega = [v + |v| \sin \alpha]/R. \quad (5)$$

Выполненный расчет угловой скорости позволяет определить период вращения колеса, который в данном случае будет определен с использованием формулы

$$T = 2\pi/\omega. \quad (6)$$

Для того чтобы колесо самоката преодолело препятствие, не отрываясь от него, ему надо повернуться вокруг т. D на угол φ , который находится по формуле

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \arcsin \alpha. \quad (7)$$

Это произойдет в течение времени t_0 , которое возможно рассчитать с использованием формулы

$$t_0 = \frac{\varphi T}{2\pi} = \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \alpha\right) R^2}{[v + |v| \sin \alpha]}. \quad (8)$$

Также необходимо учесть, что ось колеса получает дополнительные перемещения по вертикали вверх и по горизонтали назад, тогда относительно т. О – точки центра оси колеса, скорость, направленная вертикально вверх, будет определена с использованием формулы

$$w_0 = |v| \sin \alpha \cos \alpha. \quad (9)$$

Горизонтальная, встречная скорость движения самоката, будет рассчитана с использованием формулы

$$u_0 = |v| \cos^2 \alpha. \quad (10)$$

Тогда за промежуток времени t_1 ось колеса поднимется на высоту $h_{\max}$ определяемых с использованием формул:

$$t_1 = \frac{w_0}{g}, \quad (11)$$

$$h_{\max} = \left[|v| / 2g \right] \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha, \quad (12)$$

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

Тогда ось колеса сместится в т. O_1 – точка смещения центра оси колеса и окажется на высоте h_1 , которое возможно определить с использованием формулы

$$h_1 = h + R + h_{\max}. \quad (13)$$

Таким образом, расстояние до т. O_1 по горизонтали – x_1 будет определено с использованием формулы

$$x_1 = R \sqrt{\varepsilon(2 - \varepsilon)} + [v - |v| \cos^2 \alpha] t_1. \quad (14)$$

В случае если $x_1 > R$ – колесо достигнет вертикали O_1D и не упадет на препятствие, в противном случае ($x_1 < R$) колесо не достигнет вертикали O_1D и упадет на препятствие.

Математическое описание рассматриваемого процесса – наезда колеса самоката на препятствие с использованием формул (1) – (14) позволяет выполнить расчет наезда на определенные элементы и возможные дефекты (см. таблицу 1) при различных скоростях движения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С учетом определенных элементов и дефектов в городской инфраструктуре, которые имеют определенную высоту и представляют своего рода препятствие для движения СИМ, выполнен расчет для каждого вида препятствия. В соответствии с таблицей 1 и с учетом характеристик определенного вида СИМ (см. таблицу 2) для диапазона скоростей движения от 5 до 25 км/ч с шагом в 1 км/ч были установлены случаи, при которых возможно опрокидывание рассматриваемого устройства.

Расчет, выполненный для первого элемента (см. таблицу 1), – бордюр для отделения пе-

шеходных дорожек (рисунок 5) позволил установить, что при движении СИМ в выбранном диапазоне скорости от 5 до 30 км/ч произойдет опрокидывание устройства, что с большой долей вероятности приведет к травмированию водителя.

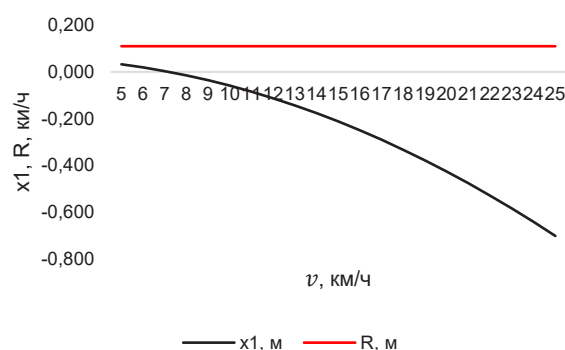


Рисунок 5 – График расчета движения СИМ с учетом наезда на бордюр для отделения пешеходных дорожек
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Diagram of calculation of PMD traffic taking into account collision with curb for the separation of pedestrian paths
Source: compiled by the authors.

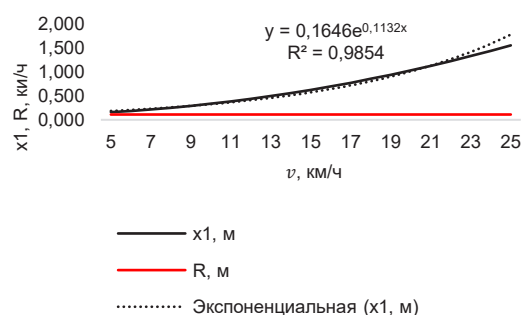


Рисунок 6 – График расчета движения СИМ с учетом наезда на искусственную неровность
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Diagram of calculation of the motion of the PMD, taking into account the collision with the artificial bump
Source: compiled by the authors.

Следующим элементом, который довольно часто встречается на проезжей части, вблизи муниципальных объектов – школы, детские сады, больницы и пр. являются искусственные неровности. Выполненный расчет позволил установить, что при движении со скоростью в установленном диапазоне опрокидывание рассматриваемого устройства не произойдет (рисунок 6).

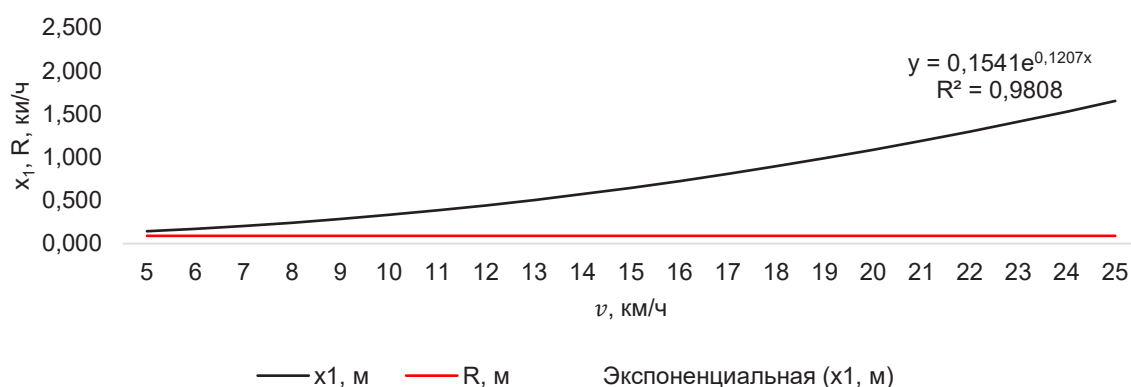


Рисунок 7 – График расчета движения СИМ с учетом дефекта – колея проезжей части
 Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Calculation graph of the PMD movement, taking into account the defect - the rut of the roadway
 Source: compiled by the authors.

При расчете наезда на бордюр для отделения проезжей части высотой 32 см (см. таблицу 1), аналогично как и при расчете первого типа препятствия (см. рисунок 5), произойдет опрокидывание СИМ.

При выполнении заключительного расчета следует отметить, что согласно последним поправкам в правила дорожного движения⁶ СИМ разрешено передвигаться по краю проезжей части, используя для движения крайнюю правую полосу. В связи с этим рассматриваемое устройство вполне может передвигаться по колею, но при выезде из нее придется преодолеть определенную высоту, что своего рода станет препятствием для движения. Основываясь на требования нормативного документа, предписывающего устранение данного дефекта при осуществлении капитального ремонта, рассматриваемая ситуация вполне характерна для городских улиц и дорог. Выполненный расчет показал, что при установленном диапазоне скоростей и принятом радиусе колеса СИМ ($R = 0,11$ м) опрокидывание при выезде из колеи не произойдет (рисунок 7).

Следует отметить, что в результате расчета было определено, что условия опрокидывания во многом зависят от конструкции самих устройств, а именно от размеров колеса СИМ, таких его параметров как диаметр (D , м) и радиус (R , м).

С учетом установленных видов препятствий (см. таблицу 1) в результате расчетов

было определено, что опрокидывание произойдет в случае, если радиус колеса будет равен или меньше высоты самого препятствия.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для СИМ необходимо создание отдельной инфраструктуры, что позволит обезопасить движение как с точки зрения возможного наезда рассматриваемых устройств на определенные препятствия, так и возможного столкновения с пешеходами при движении по тротуару и автомобилями при использовании проезжей части [23, 24, 25]. Помимо этого, важным аспектом является разработка требований к безопасности самих устройств, а также созданию безопасных условий для движения с учетом элементов городских улиц и дорог.

ВЫВОДЫ

В результате анализа показателей аварийности с участием СИМ было определено, что большинство из них происходит в населенных пунктах. Распределение по видам происшествий показало, что основным видом происшествий для более мощных СИМ, оборудованных электродвигателем мощностью свыше 0,25 кВт и менее 4 кВт, является столкновение (66%). Для менее мощных СИМ, не оборудованных электродвигателем, является наезд на пешехода (95%). Полученные данные свидетельствуют о том, что СИМ передвигаются как по проезжей части, так и по тротуарам, что приводит к возникновению определенных ви-

⁶ Постановление Правительства РФ от 23.10.1993 N 1090 (ред. от 24.10.2022) «О Правилах дорожного движения» (вместе с «Основными положениями по допуску транспортных средств к эксплуатации и обязанности должностных лиц по обеспечению безопасности дорожного движения») с изм. от 01.03.2023

дов ДТП, связанных в первую очередь со скоростью движения. Несмотря на определенные изменения в правилах дорожного движения и ограничение скорости для движения до 25 км/ч, ДТП с участием СИМ продолжают происходить. Здесь следует отметить, что одним из распространенных видов ДТП является опрокидывание, которое связано с непригодностью городских улиц и городских дорог для движения СИМ. Выполненный расчет показал, что в результате движения СИМ с допустимой скоростью движения многие элементы представляют опасность и в результате наезда происходит опрокидывание и, как следствие, травмирование водителя СИМ с различной степенью тяжести.

В результате выполненного исследования основных элементов городской инфраструктуры были определены их виды и геометрические показатели – высота (номинально допустимая возвышенность над уровнем городских улиц и дорог). Рассмотрение физического процесса наезда позволило получить ряд формул, необходимых для расчета возможности опрокидывания. Для проведения расчетов в рамках исследования была определена самая популярная модель СИМ, на основании характеристик которой был выполнен расчет возможности опрокидывания устройства. Данный расчет показал, что при наезде на бордюры, отделяющие тротуары и проезжую часть, номинальной высотой 20 и 32 см соответственно, при движении с допустимой скоростью без принятия снижения скорости или полного спешивания, произойдет опрокидывание. При взаимодействии с определенными препятствиями номинальной высотой менее 7 см опрокидывание не произойдет. Помимо этого, в результате расчета было определено, что на рассматриваемый процесс – опрокидывание, оказывают влияние геометрические показатели самого устройства, в частности радиус колеса (R), таким образом, разрабатывая требования к безопасному передвижению СИМ необходимо создание специализированной инфраструктуры для движения, а также ограничение скорости движения с учетом геометрических показателей устройств и геометрических показателей элементов городских дорог и улиц.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мишина Ю. В. К вопросу об участии в дорожном движении пользователей средств индивидуальной мобильности // Правопорядок: история, теория, практика. 2020. № 1 (24). С. 44–46.
2. Волков П. А., Кеменяш Ю. В. Средства индивидуальной мобильности: вопросы теории и практики использования // Вестник Белгородского юридического института МВД России имени И. Д. Путилина. 2021. № 1. С. 51–55.
3. Смирнова Ж. В., Самарский И. Р. Анализ средств индивидуальной мобильности как нового городского транспорта // Вестник науки. 2022. Т. 5, № 1(46). С. 173–181.
4. Юнг А. А., Шевцова А. Г. Оценка аварийности средств индивидуальной мобильности в различных условиях движения // Современная наука. 2021. № 2. С. 31–36.
5. Ляхов П. В., Лопарев Е. А. Аварийность с участием средств индивидуальной мобильности, оснащенных электродвигателем // Безопасность дорожного движения. 2022. № 1. С. 35–41.
6. Сагинова О.В. Международный опыт развития мобильности в мегаполисе // ЭТАП: экономическая теория, анализ, практика. 2019. № 1. С. 70–81.
7. Shevtsova A. Development of an approach to determination of coupling qualities of road covering using weather-climate factor / Shevtsova A., Novikov A. // Journal of Applied Engineering Science. 2021. Т. 19. № 1. С. 30–36.
8. Новиков И. А. Повышение экологичности городских агломераций путем внедрения велосипедного движения / И. А. Новиков, В. В. Васильева, А. Г. Шевцова // Мир транспорта и технологических машин. 2019. № 4 (67). С. 95–103.
9. Шевцова А. Г. Динамика реализации программы Vision Zero в мировых странах // Мир транспорта и технологических машин. 2021. № 3 (74). С. 35–42.
10. Шевцова А. Г. Математический анализ определенных показателей безопасности дорожного движения в Российской Федерации // Вестник СибАДИ. 2021;18(6):700–711. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-700-711>
11. Кравченко П. А., Олещенко Е. М. Системный подход в управлении безопасностью дорожного движения в Российской Федерации // Транспорт Российской Федерации. 2018. № 2 (75). С. 14–18.
12. Кравченко П. А. О проблеме «нулевой смертности» на дорогах и внедрении системных и цифровых технологий в практику предупреждения причин возникновения тяжких ДТП // Наука и техника в дорожной отрасли. 2018. № 4 (86). С. 1–2.
13. Донченко В. В., Купавцев В. А. Анализ основных классификационных систем средств индивидуальной мобильности // Вестник СибАДИ. 2021; 18 (3): 252–263. <https://doi.org/10.26518/2071-72962021-18-3-252-263>
14. Nocerino R. E-bikes and E-scooters for smart logistics: environmental and economic sustainability in pro-E-bike Italian pilots / Nocerino, R., Colorni, A.; Lia, F.; Luè, A. // Transp. Res. Procedia 2016, 14, 2362–2371.
15. Degele, J. Identifying E-scooter sharing customer segments using clustering / Degele, J.; Gorr, A.; Haas, K.; Kormann, D.; Krauss, S.; Lipinski, P.; Tenbih, M.; Koppenhoefer, C.; Fauser, J.; Hertweck, D. // In Proceedings of the 2018 IEEE International

Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), Stuttgart, Germany, 17–20 June 2018; pp. 1–8.

16. Zagorskas J. Challenges Caused by Increased Use of E-Powered Personal Mobility Vehicles in European / Zagorskas J., Burinskiene M. // *Cities Sustainability* 2020, 12, 273

17. Кадыров Э. Т. Влияние элементов автомобильных дорог на режимы и безопасность движения транспортных средств / Э. Т. Кадыров, А. И. Бекбосынов // *Знание*. 2016. № 5-1 (34). С. 65-70.

18. Сильянов В. В. Влияние на безопасность движения ограничения скорости в зоне пересечения автомобильных дорог / В. В. Сильянов, Д. В. Оськин // *Транспорт: наука, техника, управление*. Научный информационный сборник. 2007. № 5. С. 59-61.

19. Shevtsova A., Novikov A. Development of an approach to determination of coupling qualities of road covering using weather-climate factor // *Journal of Applied Engineering Science*. 2021. Vol. 19, No. 1. P. 30-36. DOI 10.5937/jaes0-26642.

20. Novikov A., Shevtsova A., Burlutskaya A., Shekhovtsova S. Development of cycling infrastructure based on the example of urban agglomeration of Belgorod // *Transport Problems*. 2021. Vol. 16, No. 3. P. 213-222. DOI 10.21307/TP-2021-054.

21. Юнг А. А. Оценка влияния СИМ на показатели транспортного потока при совместном движении / А. А. Юнг, А. Г. Шевцова, В. В. Васильева // *Мир транспорта и технологических машин*. 2023. № 1-2 (80). С. 43-49. DOI 10.33979/2073-7432-2023-2(80)-1-43-49.

22. Юнг А. А. Моделирование процесса движения средств индивидуальной мобильности в городской среде / А. А. Юнг, А. Г. Шевцова // *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. 2022. № 1(31).

23. Жанказиев С. В., Вражнова М. Н., Пашкова А. А. Концепция методики повышения безопасности дорожного движения за счет предоставления безопасного маршрута пользователям средств индивидуальной мобильности // *Мир транспорта и технологических машин*. 2023. № 1-1 (80). С. 43–49. DOI 10.33979/2073-7432-2023-1(80)-1-43-49.

24. Zhankaziev S., Zamytskih A., Vorobyev A., Gavriluk M., Pletnev M. Predicting traffic accidents using the conflict coefficient // *Intelligent technologies and electronic devices in vehicle and road transport complex (TIRVED)*. 2022. P. 1-6.

25. Агуреев И. Е., Ахромешин А. В. К вопросу разработки модели транспортной системы индивидуальных перемещений // *Мир транспорта и технологических машин*. 2022. №4-2 (79). С. 49–57.

REFERENCES

1. Mishina Ju. V. K voprosu ob uchastii v dorozhnom dvizhenii pol'zovatelej sredstv individual'noj mobil'nosti [On the participation of users of means of individual mobility in road traffic]. *Pravoporyadok: istoriya, teoriya, praktika*. 2020; 1 (24): 44-46. (in Russ.)

2. Volkov P. A., Kemenjash Ju. V. Sredstva individual'noj mobil'nosti: voprosy teorii i praktiki ispol'zovaniya [Means of individual mobility: issues of theory and practice of use]. *Vestnik Belgorodskogo juridicheskogo instituta MVD Rossii imeni I.D. Putilina*. 2021; 1: 51-55. (in Russ.)

3. Smirnova Zh. V., Samarskij I. R. Analiz sredstv individual'noj mobil'nosti kak novogo gorodskogo transporta [Analysis of individual mobility as a new urban transport]. *Vestnik nauki*. 2022; T. 5, № 1 (46): 173-181. (in Russ.)

4. Jung A. A., Shevcova A. G. Ocenka avarijnosti sredstv individual'noj mobil'nosti v razlichnykh usloviyakh dvizheniya [Assessment of accident rate of individual mobility means in different traffic conditions]. *Sovremennaya nauka*. 2021; 2: 31-36. (in Russ.)

5. Ljahov P. V., Loparev E. A. Avarijnost' s uchastiem sredstv individual'noj mobil'nosti, osnashhennykh jelektrodvigatелеm [Accidents involving personal mobility devices equipped with an electric motor]. *Bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya*. 2022; 1: 35-41. (in Russ.)

6. Saginova O.V. International experience in the development of mobility in a metropolis [International experience in the development of mobility in the metropolis]. *ETAP: economic theory, analysis, practice*. 2019; No. 1: 70-81. (in Russ.)

7. Shevtsova A., Novikov A. Development of an approach to determination of coupling qualities of road covering using weather-climate factor. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021; T. 19. no 1: 30-36.

8. Novikov, I. A., Vasil'eva V. V., Shevcova A. G. Povyshenie jekologichnosti gorodskih aglomeracij putem vnedreniya velosipednogo dvizheniya [Improving the sustainability of urban agglomerations by introducing cycling]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. 2019; 4 (67): 95-103. (in Russ.)

9. Shevcova A. G. Dinamika realizacii programmy Vision Zero v mirovyh stranah [Dynamics of Vision Zero program implementation in the world countries]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. 2021; 3 (74): 35 – 42. (In Russ)

10. Shevtsova A.G. Mathematical analysis of certain road safety indicators in the Russian Federation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;18 (6): 700-711. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-700-711>

11. Kravchenko P. A., Oleshchenko E. M. Sistemnyj podhod v upravlenii bezopasnost'ju dorozhnogo dvizheniya v Rossijskoj Federacii [System approach in the management of road safety in the Russian Federation]. *Transport Rossijskoj Federacii*. 2018; 2 (75): 14-18. (In Russ.)

12. Kravchenko P. A. O probleme "nulevoj smertnosti" na dorogah i vnedrenii sistemnykh i cifrovych tehnologij v praktiku preduprezhdeniya prichin vozniknoveniya tjazhkih DTP [On the problem of "zero mortality" on the roads and the introduction of system and digital technologies in the practice of preventing causes of serious accidents]. *Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasli*. 2018; 4 (86): 1-2. (In Russ.)

13. Donchenko V.V., Kupavtsev V.A. Main classification systems of personal mobility equipment anal-

ysis. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (3): 252-263. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-72962021-18-3-525-263>

14. Nocerino R. Colorni A., Lia F., Luè A. E-bikes and E-scooters for smart logistics: environmental and economic sustainability in pro-E-bike Italian pilots. *Transp. Res. Procedia* 2016, 14, 2362-2371.

15. Degele J. Identifying E-scooter sharing customer segments using clustering / Degele, J.; Gorr, A.; Haas, K.; Kormann, D.; Krauss, S.; Lipinski, P.; Tenbih, M.; Koppenhoefer, C.; Fauser, J.; Hertweck, D. *In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, Stuttgart, Germany, 17-20 June 2018; pp. 1-8.

16. Zagorskas J., Burinskiene M. Challenges Caused by Increased Use of E-Powered Personal Mobility Vehicles in Europe. *Cities Sustainability*. 2020; 12: 273

17. Kadyrov, Je. T., Bekbosynov, A. I. Vliyanie jelementov avtomobil'nyh dorog na rezhimy i bezopasnost' dvizheniya transportnyh sredstv [Influence of elements of highways on the modes and traffic safety of vehicles]. *Znanie*. 2016; 5-1 (34): 65-7. (in Russ.)

18. Sil'janov, V. V., Os'kin D. V. Vliyanie na bezopasnost' dvizheniya ogranicheniya skorosti v zone peresechenij avtomobil'nyh dorog [Influence on traffic safety of speed limits in the zone of intersections of highways]. *Transport: nauka, tehnika, upravlenie. Nauchnyj informacionnyj sbornik*. 2007; 5: 59-61. (in Russ.)

19. Shevtsova A., Novikov A. Development of an approach to determination of coupling qualities of road covering using weather-climate factor // *Journal of Applied Engineering Science*. 2021; Vol. 19, No. 1: 30-36. DOI 10.5937/jaes0-26642.

20. Novikov A., Shevtsova A., Burlutskaya A., Shekhovtsova S. Development of cycling infrastructure based on the example of urban agglomeration of Belgorod // *Transport Problems*. 2021; Vol. 16, No. 3: 213-222. DOI 10.21307/TP-2021-054.

21. Jung A. A., Shevcova A. G., Vasil'eva V. V. Ocenka vlijaniya SIM na pokazateli transportnogo potoka pri sovmestnom dvizhenii [Evaluation of the influence of SIM on traffic flow indicators in joint traffic]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. 2023; 1-2 (80): 43-49. DOI 10.33979/2073-7432-2023-2(80)-1-43-49. (in Russ.)

22. Jung A. A., Shevcova A. G. Modelirovanie processa dvizheniya sredstv individual'noj mobil'nosti v

gorodskoj srede [Modeling the process of movement of means of individual mobility in the urban environment]. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2022; 1 (31). (in Russ.)

23. Zhankaziev S. V., Vrazhnova M. N., Pashkova A. A. Konceptiya metodiki povysheniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya za schet predostavleniya bezopasnogo marshruta pol'zovateljam sredstv individual'noj mobil'nosti [The concept of a methodology for improving road safety by providing a safe route to users of individual mobility devices]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. 2023; 1-1 (80): 43-49. DOI 10.33979/2073-7432-2023-1(80)-1-43-49.

24. Zhankaziev S., Zamytskih A., Vorobyev A., Gavriyuk M., Pletnev M. Predicting traffic accidents using the conflict coefficient. *Intelligent technologies and electronic devices in vehicle and road transport complex (TIRVED)*. 2022. P. 1-6.

25. Agureev I. E., Ahromeshin A. V. K voprosu razrabotki modeli transportnoj sistemy individual'nyh peremeshhenij [On the issue of developing a model of the transport system of individual movements]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. 2022; 4-2 (79): 49-57. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Донченко Вадим Валерианович – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, научный руководитель, SPIN-код: 4610-4399.

Купавцев Владимир Анатольевич – аспирант.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vadim V. Donchenko (Moscow, Russia) – Cand. of Sci., Senior researcher, Scientific director, SPIN-код: 4610-4399.

Vladimir A. Kupavtsev – Postgraduate student.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Донченко В.В. Постановка цели и задачи исследования.

Купавцев В.А. Выполнение статистического анализа и математических расчетов.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Vadim V. Donchenko. The goal and objectives of the study statement.

Vladimir A. Kupavtsev. Statistical analysis and mathematical calculations performing.

Научная статья
УДК 656.13+504.054
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-350-361>
EDN: DDEUBI



АКТУАЛИЗИРОВАННЫЙ ПРОГНОЗ ЧИСЛЕННОСТИ, СТРУКТУРЫ АВТОМОБИЛЬНОГО ПАРКА РОССИИ ПО ТИПУ ЭНЕРГОУСТАНОВОК И ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ДО 2050 ГОДА

Ю. В. Трофименко, В. И. Комков*

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

ywtrofimenko@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3650-5022>

v.komkov@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-8712-4553>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Приведены результаты прогнозной оценки численности, структуры автомобильного парка России по типу энергоустановок и выбросов парниковых газов (ПГ) до 2050 г. с учетом актуализации исходных данных, используемых при проведении расчетов и принятии допущения, что будет принято решение прекратить производство легковых АТС с ДВС, начиная с 2045 г.

Материалы и методы. Прогноз уровня автомобилизации, численности автопарка по типу энергоустановок и виду топлива, экологическому классу оценивались с учетом обновления парка, баланса поставок и выбытия АТС. Эти данные приводятся в формах государственной статистической отчетности, долгосрочных стратегиях развития транспортной отрасли, отчасти генерируются исследователями самостоятельно. Для расчета выбросов парниковых газов также использовалась методика Sorpt 5.

Результаты. По сравнению с ранее составленными прогнозами значение суммарных выбросов ПГ автомобильным парком в 2050 г. по актуальному прогнозу будет примерно таким же, как в 2045 г., то есть будет отставать на 5 лет.

Обсуждение и заключение. В ближайшей перспективе темпы декарбонизации автомобильного транспорта в России могут существенно замедлиться. В автомобильном парке к 2050 г. будут по-прежнему преобладать автомобили с ДВС на углеводородном топливе (жидком, газообразном).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автомобильный парк, численность, структура парка, вид топлива, тип энергоустановок, декарбонизация, выбросы парниковых газов, актуализированный прогноз

Статья поступила в редакцию 18.04.2023; одобрена после рецензирования 25.05.2023; принята к публикации 26.06.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Трофименко Ю. В., Комков В. И. Актуализированный прогноз численности, структуры автомобильного парка России по типу энергоустановок и выбросов парниковых газов до 2050 года // Вестник СибАДИ. 2023. Т.20, № 3 (91). С. 350-361. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-350-361>

© Трофименко Ю. В., Комков В. И., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-350-361>
EDN: DDEUBI

UPDATED NUMBER FORECAST, RUSSIAN CAR FLEET STRUCTURES BY TYPE OF POWER PLANTS AND GREENHOUSE GAS EMISSIONS UNTIL 2050

IUrii V. Trofimenko, Vladimir I. Komkov

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

ywtrofimenko@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3650-5022>

v.komkov@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-8712-4553>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The results of forecast estimation of the number, structure of the Russian motor vehicle fleet by type of power units and greenhouse gas (GHG) emissions up to 2050 are presented, taking into account the update of the initial data used in the calculations and the assumption that it will be decided to stop production of passenger cars with internal combustion engines starting from 2045.

Materials and methods. The forecast of the level of motorization, the number of vehicle fleet by type of power plant and fuel type, environmental class were estimated taking into account the renewal of the fleet, the balance of supply and disposal of ATVs. These data are given in the forms of state statistical reporting, long-term strategies of transport industry development, partly generated by researchers themselves. The Copert 5 methodology was also used to calculate greenhouse gas emissions.

Results. Compared to earlier projections, the value of total GHG emissions of the vehicle fleet in 2050 according to the current projection will be about the same as in 2045, i.e. will be 5 years behind.

Discussion and conclusions. In the near term, the rate of decarbonization of road transport in Russia may slow down significantly. Vehicles with internal combustion engines using hydrocarbon fuels (liquid, gaseous) will still dominate the vehicle fleet by 2050.

KEYWORDS: vehicle fleet, population, fleet structure, fuel type, type of power plants, decarbonization, greenhouse gas emissions, updated forecast

The article was submitted 18.04.2023; approved after reviewing 25.05.2023; accepted for publication 26.06.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Trofimenko J. V., Komkov V. I. Updated number forecast, Russian car fleet structures by type of power plants and greenhouse gas emissions until 2050. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (3): 350-361. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-350-361>

© Trofimenko I. V., Komkov V. I., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время произошла корректировка трендов «зеленой энергетики»: наблюдается усиление роли невозобновляемых ресурсов в мире, расконсервация угольных ТЭС в отдельных странах и др. Несмотря на это, тренд на сокращение выбросов парниковых газов (ПГ) и снижение углеродного следа в жизненном цикле транспортных средств и технологий в среднесрочной и долгосрочной перспективе остается одним из ключевых факторов устойчивого экономического развития, сохранения здоровья и повышения качества жизни населения в разных странах, в том числе и в России.

Наличие новых глобальных угроз и рисков, связанных с нарушением сложившихся цепей поставок, потребовало корректировки Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации¹, уточнения показателей и трендов развития транспортного комплекса^{2,3}.

Как указано в Стратегии развития автопрома, основными проблемами развития отрасли являются недостаточные темпы обновления парка АТС (моральное и физическое старение) и необходимость развития инфраструктуры для массового использования электротранспорта, автономных и подключенных автомобилей, газомоторной техники. Исследования в данном направлении приобретают особую актуальность из-за развития конструкций автотранспортных средств^{4,5} и моделирования экологических характеристик транспортных потоков [1, 2, 3, 4, 5].

В ближайшее время ожидается постановка на производство линейки автономных автомобилей, электрических и гибридных автомоби-

лей (включая АТС на водородных топливных элементах (ТЭ)) с высокой локализацией и значительным трендом роста продаж (до 70% в год), создание новых производств компонентов и материалов для такого транспорта (тяговые батареи, топливные ячейки, катодные и анодные материалы и др.). Разработана «дорожная карта» по развитию рынка сжиженного и компримированного природного газа на автомобильном транспорте.

Указанные обстоятельства послужили основой для корректировки ранее выполненных прогнозов численности⁶, структуры автомобильного парка по типу энергоустановок [6], валовых выбросов парниковых газов автомобильным транспортом на период до 2050 г. [7, 8, 9, 10].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Прогноз численности автомобильного парка может быть определен разными способами, в том числе на основании составления прогнозов уровня автомобилизации в стране или отдельном регионе и динамики поставок автомобилей, использующих разные виды топлива (энергии), в автомобильный парк и выбытия их из парка.

Как и в предыдущих вариантах прогнозов численности парка АТС Российской Федерации в разработанном варианте прогноза динамика уровня автомобилизации на рисунке 1 и численности парка АТС предполагает достижение максимума в середине 2030-х годов как уровня автомобилизации (до 420 легковых АТС на 1000 жителей), так и общей численности парка АТС (68 млн ед.) (рисунок 2) и затем уменьшение значений этих показателей к 2050 г. до 260 легковых АТС/1000 жителей и до 50 млн ед. соответственно.

¹ Стратегия развития автомобильной промышленности Российской Федерации на период до 2035 года [Электрон. ресурс]: Утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2022 года N 4261-п. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405963861/>

² Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года [Электрон. ресурс]: Утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-п. URL: <https://mintrans.gov.ru/file/473193>

³ Доклад о реализации транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года [Электрон. ресурс]: Отчетный период: 2021 год. URL: <https://mintrans.gov.ru/file/479860>

⁴ Шелмаков С.В. Экотранспорт: учеб. пособие / С.В. Шелмаков. М.: МАДИ, 2018. 160 с.

⁵ Шелмаков С.В. Улучшение энерго-экологических характеристик автомобилей: учеб. пособие / С.В. Шелмаков. М.: МАДИ, 2018. 232 с.

⁶ Трофименко Ю.В., Комков В.И., Григорьева Т.Ю. Прогноз численности и структуры автомобильного парка Российской Федерации по экологическому классу, типу энергоустановок и виду топлива на период до 2030 года // Сборник трудов шестого международного экологического конгресса (восьмой международной научно-технической конференции) «Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов» ELPIT 2017, 20–24 сентября 2017 г., г. Самара – Тольятти, Россия. Издательство ELPIT. 2017. Т. 5. С. 196–212.

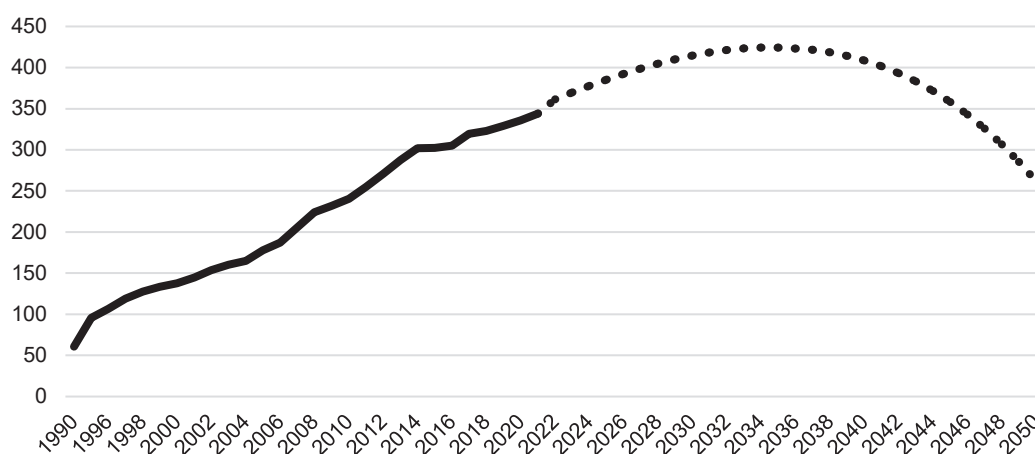


Рисунок 1 – Прогноз уровня автомобилизации в РФ, тыс. легковых АТС/1000 жителей
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Forecast of the level of motorization in the Russian Federation, thousand cars/1000 inhabitants
Source: composed by the authors.

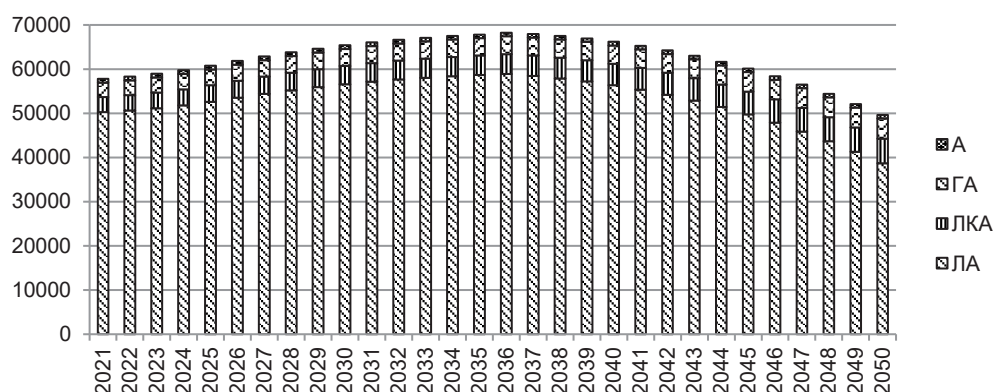


Рисунок 2 – Прогноз численности парка АТС в России до 2050 года, тыс. ед.:
ЛА – легковые; ЛКА – легкие коммерческие; ГА – грузовые, А – автобусы
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Forecast of the number of transport fleet in Russia until 2050, thousand units:
PC - passenger cars; LCV - light commercial vehicles; HDT - trucks, B - buses
Source: composed by the authors.

Это вызвано изменением начальных условий – замедлением роста численности парка в 2019–2022 гг. При этом в среднесрочной перспективе сохраняются и усилятся тренды, приводящие к обновлению парка АТС, отказу населения от приобретения автомобилей, замещению их средствами индивидуальной мобильности [6, 7].

При прогнозировании валовых выбросов ПГ автомобильным транспортом (уровень 1, 2 по классификации МГЭИК), кроме изменения прогнозной численности парка АТС, был актуализирован прогноз структуры автомобильного парка по типу используемых типов

энергоустановок с использованием данных по планируемому объему продаж, приведенных в актуализированной стратегии развития автомобильной промышленности до 2035 г.

При прогнозировании структуры парка АТС с разными типами энергоустановок (ЭУ) после 2035 г. было принято допущение о линейных трендах структуры продаж (поставок в парк) легковых, легких коммерческих, грузовых АТС и автобусов на бензине и дизтопливе, с тяговым электроприводом и на природном газе, которые формируются на базе динамики поставок данных типов АТС в 2020–2035 гг. (рисунок 3).

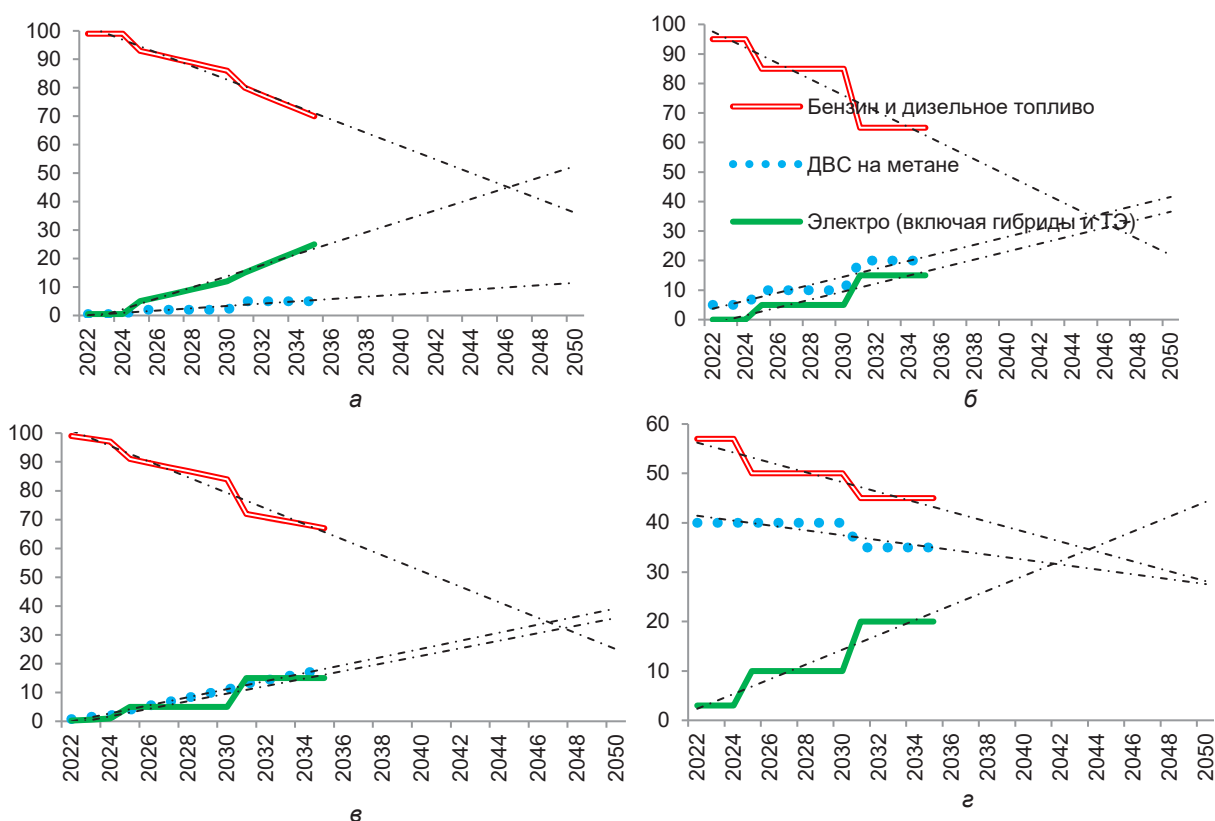


Рисунок 3 – Доля поставок (объем продаж согласно стратегии до 2035 г.) АТС разных типов с различными энергоустановками: а – ЛА; б – ЛКА; в – ГА; г – А, %
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Share of deliveries (sales volume according to the strategy until 2035) of vehicles with different power units (a – PC, b – LCV, c – HDT, d – B), %
Source: composed by the authors.

Из рисунка 3 следует, что автомобили с ДВС на период до 2035 г. будут занимать доминирующую долю рынка продаж легковых, легких коммерческих, грузовых автомобилей и автобусов. При этом ожидается постепенное замещение в парке АТС с ДВС на жидком топливе электрическими и гибридными автомобилями. Наиболее существенным такое замещение ожидается в сегменте легковых АТС.

Для этих автомобилей разработан подвариант А прогноза структуры и численности по типу ЭУ, предусматривающий отказ от производства к 2045 г. АТС с ДВС на жидком топливе в пользу электрического транспорта. На рисунке 4 приведена прогнозная оценка доли продаж легковых АТС с различными типами энергоустановок по подварианту А.

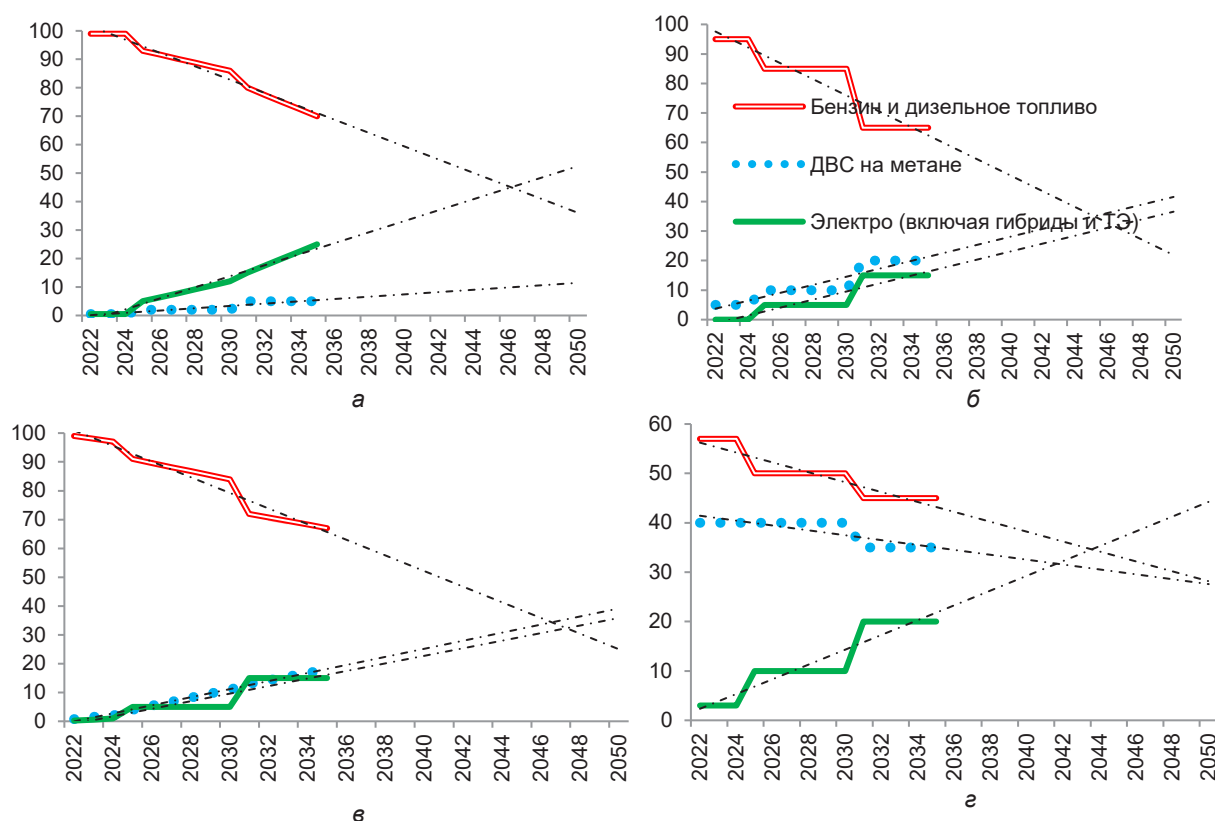


Рисунок 4 – Доля продаж легковых АТС (подвариант А), %
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Share of sales of passenger cars (variant A), %
Source: composed by the authors.

Как следует из рисунка 4, при реализации подварианта А можно ожидать, что после 2044-2045 г. доля продаж легковых, легких коммерческих электромобилей и гибридов превысит долю продаж этих типов АТС с ДВС.

Переход от прогноза продаж АТС с разными типами ЭУ к прогнозу структуры и численности парка АТС по виду топлива и типу энергоустановок в данной работе выполнен на основании прогнозной оценки динамического баланса спроса на автомобили (численности поставляемых новых и поддержанных автомобилей) и выбытия АТС из парка по разным причинам в каждый конкретный год [11].

Объем спроса на автомобили (доля поставок в парк) определяется прогнозом объема продаж и использования в качестве транспортного средства, а также эстетическими соображениями, престижем, наличием места для парковки и хранения, надежностью, техно-

логичностью, экологическими характеристиками АТС и т.д.

Доля выбытия автомобилей из парка зависит от остаточной цены АТС, цены топлива, топливной экономичности новых автомобилей, стимулов обновления автопарка на национальном и региональном уровнях, развития системы авторециклинга, других факторов [8, 12].

Ожидается, что *доля выбытия* АТС из парка будет расти, достигнув в 2050 г. значений в 5% численности парка грузовых АТС и автобусов и 10% численности парка легковых автомобилей. Такой прогноз динамики выбытия предусматривает реализацию мер по стимулированию обновления автомобильного парка. С учетом изложенного на рисунке 5 приведены результаты обновленного прогноза структуры автомобильного парка РФ по типу ЭУ и виду топлива на период до 2050 г.

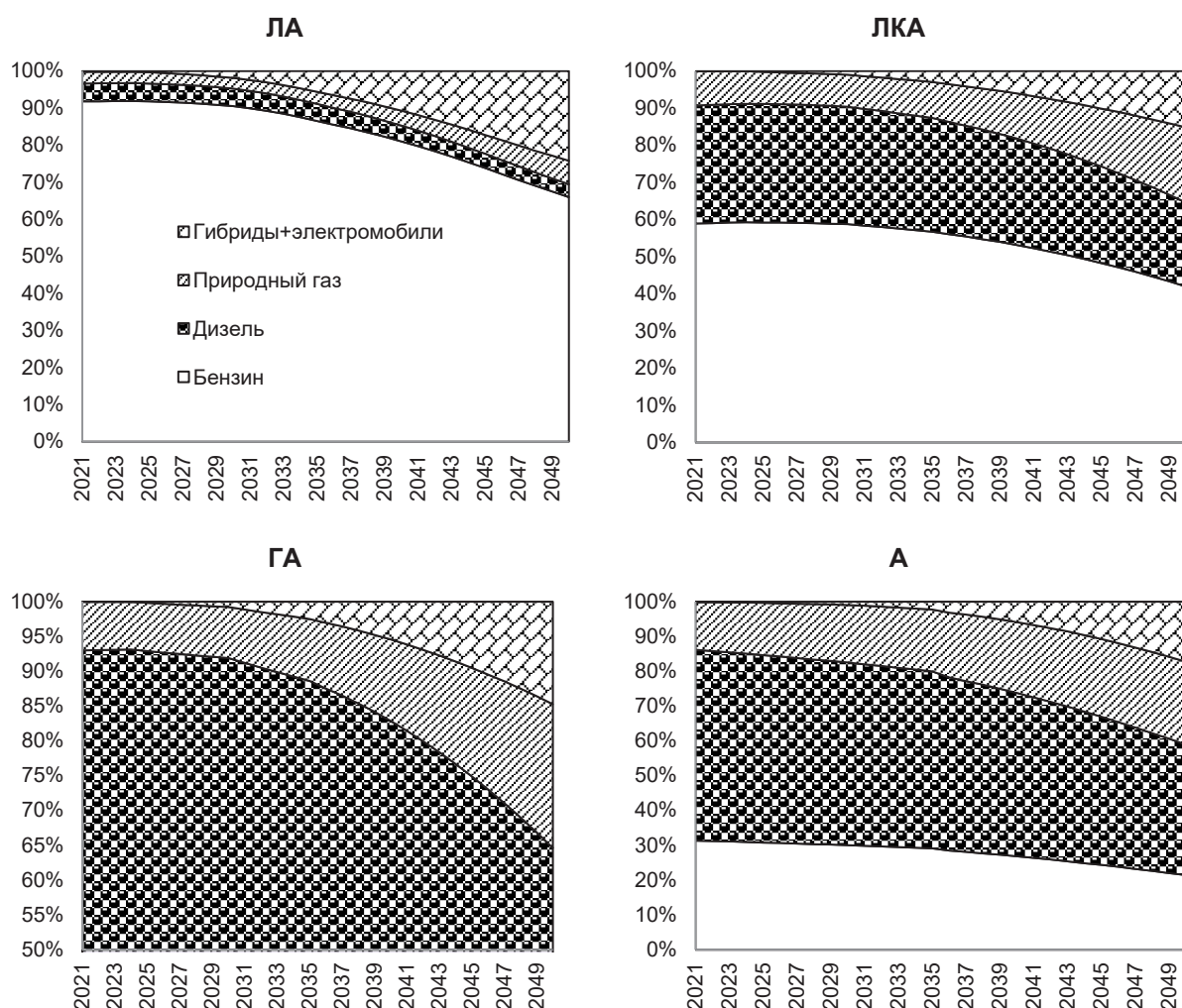


Рисунок 5 – Прогноз структуры парка АТС по типу ЭУ на период до 2050 г., %
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Forecast of the car fleet structure by engine type for the period up to 2050, %
Source: composed by the authors.

По сравнению с ранее выполненными прогнозными оценками [6, 7] доля легковых электромобилей и гибридов к 2050 г. составит 24% численности парка, легких коммерческих – 12%, грузовых электромобилей и электробусов – 15%.

При реализации подварианта А сценария численность электромобилей может составлять 48,5% от общей численности парка легковых АТС в расчетном году (рисунок 6).

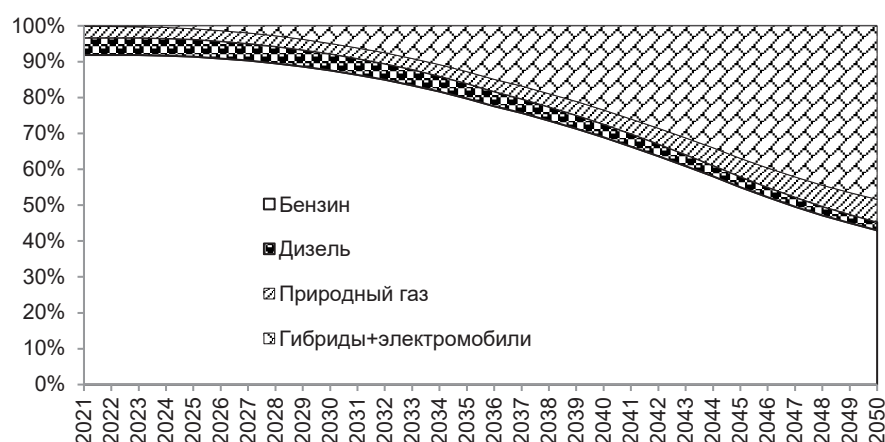


Рисунок 6 – Прогноз структуры парка легковых АТС по типу ЭУ (подвариант А сценария), %
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Forecast of passenger car fleet structure by type of engine (Scenario variant A), %
Source: composed by the authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ отечественных [13, 14] и зарубежных методик расчета выбросов парниковых газотранспортными потоками, баз данных и компьютерных программ их реализации^{7,8,9,10,11}, показал, что наиболее детально разработанной является методика, реализованная в программном комплексе Corpert 5. Для базового года с учетом баланса расхода топлива [8] были определены расчеты выбросов ПГ по этой методике. Но при выполнении прогноза валовых выбросов CO₂ учитывались не только объёмы потребления различных видов топлива, но и косвенные выбросы от производства электроэнергии для автопарка России. Эмиссия ПГ определялась по упрощенной методике, исходя из численности легковых, грузовых автомобилей и автобусов с различными типами силовых установок, их удельного расхода топлива и коэффициентов эмиссии, среднегодового пробега, а для прогнозного периода –

учитывался тренд повышения топливной экономичности АТС [8, 9].

В основе расчета прогнозных оценок валовых выбросов парниковых газов разных типов АТС с использованием программы Corpert 5 лежит прямое и полное окисление углерода, содержащегося в топливе, в процессе сжигания или непосредственно после него (для всех видов топлива и типов транспортных средств), независимо от того, выбрасывается ли ПГ в виде углекислого газа или в виде CH₄, CO, летучих органических соединений (ЛОС) или в виде твердых частиц (уровень 1 МГЭИК).

Результаты прогнозных оценок суммарных (прямых и косвенных) валовых выбросов парниковых газов автомобильным парком России с учетом приведенных выше данных по типу, численности и структуре парка по виду используемого топлива (энергии) представлены на рисунке 7.

⁷ EMEP/CORINAIR Atmospheric emission inventory guidebook - First edition 1996. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-corinair-atmospheric-emission-inventory>.

⁸ GEF Transportation Emissions Evaluation Model for Projects. URL: <http://www.thegef.org/gef/node/4638>

⁹ For Future Inland Transport Systems (ForFITS). URL: <http://www.unece.org/?id=19273>

¹⁰ VISUM. Available online: <http://ptv-vision.ru/produkty/visum>

¹¹ Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA). URL: <http://www.hbefa.net/e/index.html>

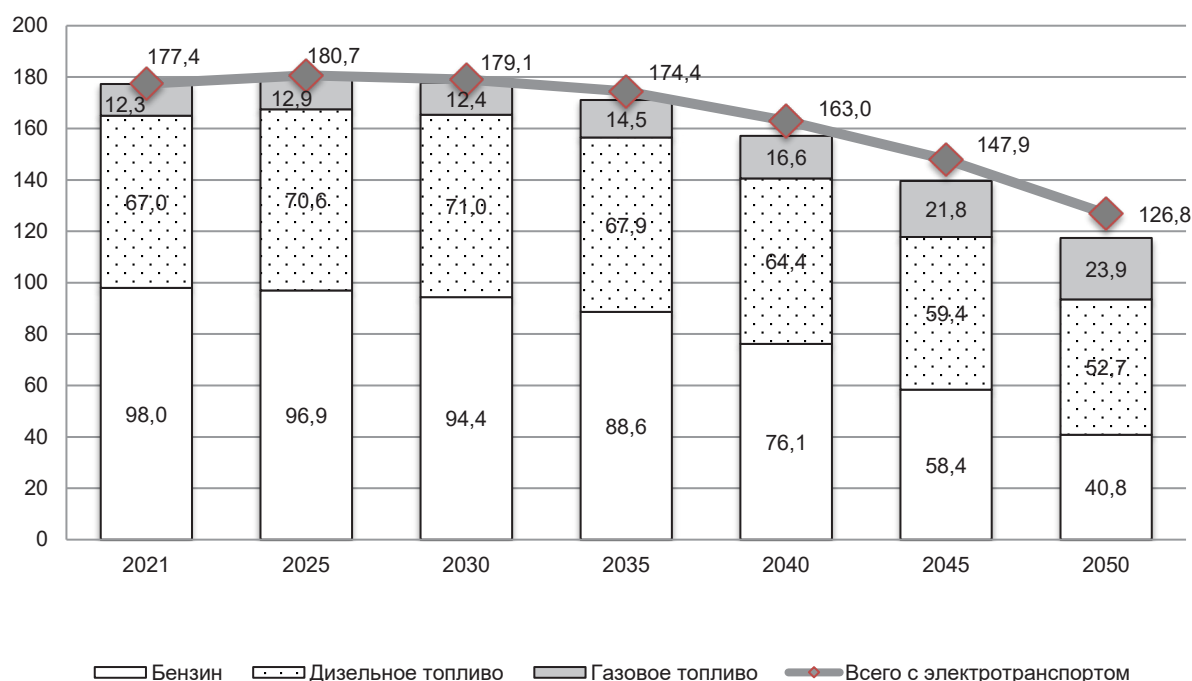


Рисунок 7 – Прогноз прямых (от сжигания углеродсодержащего топлива в ДВС АТС) и косвенных выбросов парниковых газов, млн т CO₂-экв
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Forecast of direct (from combustion of carbon-containing fuel) and indirect greenhouse gas emissions, million tons CO₂-eq
Source: composed by the authors.

Следует отметить, что суммарные валовые выбросы ПГ автомобильным парком России в 2050 г. могут составить порядка 126,8 млн т CO₂-экв.¹² что на 28,5% меньше, чем в 2021 г. При этом численность автомобильного парка может сократиться с 59,8 до 51,7 млн ед.

По сравнению с ранее выполненными оценками в 2021 г. [9] суммарные валовые выбросы ПГ автомобильным парком в 2050 г. при реализации инновационного сценария будут на 23,29 млн т CO₂-экв. больше. И только в 2045 г. они будут сопоставимыми (при реализации инновационного сценария – 133,42 млн т CO₂-экв.). Это означает, что с учетом обновленных значений исходных данных по уровню автомобилизации, доле использования АТС на тяговом электроприводе

и топливных элементах значение суммарного валового выброса ПГ автомобильным парком по сравнению с ранее разработанными сценарными прогнозами может быть достигнуто на 5 лет позже, т.е. не к 2045, а к 2050 г.

В приведенных на рисунке 8 прогнозных оценках суммарных валовых выбросов ПГ доля косвенных выбросов ПГ (при производстве электроэнергии в ТЭК, использованной для выполнения транспортной работы электромобилями всех типов) определена с использованием значений расхода электроэнергии на тягу современных электромобилей в ездовых циклах (кВт·ч/км)¹², а также представленных в публичном пространстве производителями АТС и полученных из других источников информации.

¹² Трофименко Ю.В., Деянов Д.А. Инженерная методика оценки расхода топлива (энергии) автотранспортными средствами // Автотракторостроение и автомобильный транспорт. Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. В 2-х томах. Минск. 2022. С. 42–46.

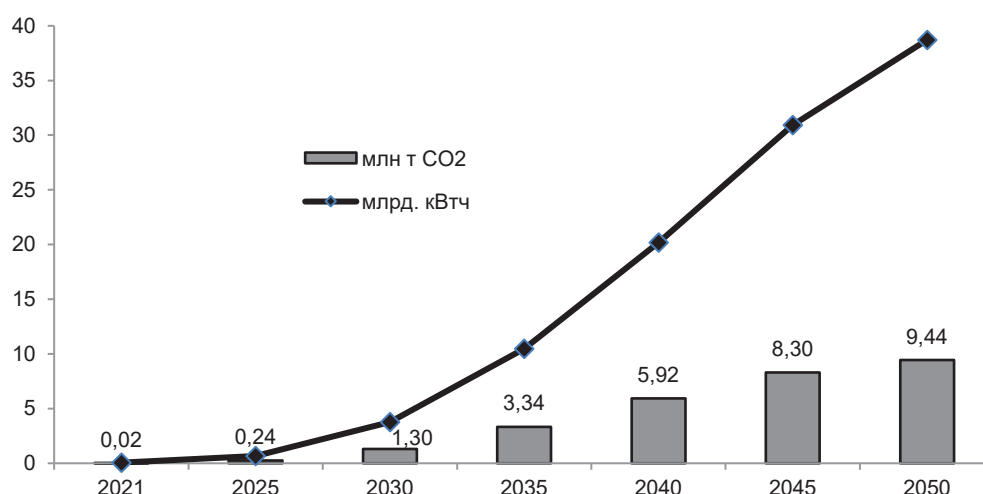


Рисунок 8 – Прогноз косвенных выбросов парниковых газов (млн т CO₂) и требуемое количество дополнительных энергетических мощностей в ТЭК (млрд кВт·ч) для АТС на тяговом электроприводе
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Forecast of indirect greenhouse gas emissions (million tons of CO₂) and the required amount of additional energy capacity in the fuel and energy complex (billion kWh) for electric vehicles
Source: composed by the authors.

Следует отметить, что в 2050 г. косвенные выбросы ПГ за счет выработки электроэнергии в ТЭК на привод электромобилей могут составить порядка 9,44 млн т. CO₂, т.е. около 7,4% суммарных выбросов ПГ автомобильным парком. При этом общий объем выработки электроэнергии в ТЭК на привод электромобилей в парке в 2050 г. может составить 38,71 млрд кВт·ч. Данное значение примерно в 1,3 раза меньше, чем получено в ранее выполненном прогнозе потребления электроэнергии для электромобилей на 2050 г. при реализации инновационного сценария развития автомобильного транспорта [9].

При таком уровне развития электромобилизации эффект по снижению выбросов ПГ в транспортном секторе будет лишь в незначительной части зависеть от интенсивности ввода новых генерируемых мощностей и объемов использования в ТЭК атомной энергетики и возобновляемых источников энергии (ВИЭ), электроэнергия от которых будет потребляться транспортными средствами.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основании разработанного прогноза с учетом целевых показателей, заложенных в актуализированной стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации на период до 2035 г.,

уточнения численности и структуры парка АТС в последние годы было установлено, что в обозримой перспективе темпы декарбонизации автомобильного транспорта могут замедлиться. По сравнению с ранее составленными прогнозами значение суммарных выбросов ПГ автомобильным парком в 2050 г. по актуальному прогнозу будет примерно таким же, как при реализации инновационного прогноза развития автомобильного транспорта в 2045 г., то есть будет отставать примерно на 5 лет.

При этом в автомобильном парке в 2050 г. преобладать будут АТС с ДВС на углеводородном топливе (жидком, газообразном). Только после 2044–2045 гг. доля продаж легковых, легких коммерческих и грузовых электромобилей и электробусов может превысить долю продаж этих типов АТС с ДВС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tyson, K.S. Biodiesel – the Clean, Green Fuel for Diesel Engines. U.S. Department of Energy National Renewable Energy Laboratory, 2000. URL: <https://p2infohouse.org/ref/38/37713.pdf> (дата обращения: 20.04.2023).
2. Ji, M.; Wei, Z. Review of Water Management in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. *Energies*, 2009. Available online: <http://www.mdpi.com/1996-1073/2/4/1057/htm> (дата обращения: 20.04.2023).
3. Russ, J. New Frontiers in Solar Cell Conversion Efficiency. Spectrolab, Inc., 2009.

4. Ehsani, M.; Gao, Y. Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles Fundamentals Theory and Design. Second edition. A. Emadi, CRC Press, 2010, 558 p.
5. Kalghatgi, G. Development of Fuel/Engine Systems - The Way Forward to Sustainable. *Transport Engineering*. 2019. Vol. 5. pp. 510-518. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.009>.
6. Trofimenko Y., Komkov V. and Trofimenko K. Forecast of energy consumption and greenhouse gas emissions by road transport in Russia up to 2050. *Transportation Research Procedia*, 14th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities, 2020. pp. 698-707.
7. Trofimenko Y., Komkov V. and Donchenko V. Problems and prospects of sustainable low carbon development of transport in Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 177 (2018), 012014.
8. Trofimenko Yu. V., Komkov V. I., Donchenko V. V. and Potapchenko T. D. Model for the assessment greenhouse gas emissions from road transport. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2019. Vol. 7. No. 1. pp. 465-473.
9. Trofimenko Yu. V., Komkov V. I. Forecast of decarbonization of road transport in Russia until 2050 in the context of digitalization and expansion of the use of unmanned vehicles. 2021 *Intelligent technologies and electronic devices in vehicle and road transport complex (TIRVED)*, 2021, DOI: 10.1109/TIRVED53476.2021.9639206.
10. Трофименко Ю. В., Гинзбург В. А., Комков В. И., Лытов В. М. Влияние структуры парка автотранспортных средств по виду топлива и экологическому классу на выбросы парниковых газов // Вестник СибАДИ. 2018. Т. 15, № 6. С. 898–910. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-6-898-910>
11. Трофименко Ю. В., Ефремов А. В., Фурсов С. Б. Упрощенная методика прогнозирования численности парка автотранспортных средств // Совершенствование автомобильных и тракторных двигателей: сборник научных трудов. М.: МАДИ. 1992. С. 27–32.
12. Трофименко Ю. В., Воронцов Ю. М., Трофименко К. Ю. Утилизация автомобилей: научная монография под ред. Ю. В. Трофименко. Москва: АКПРЕСС. 2011. 332 с.
13. Донченко В. В., Кунин Ю. И., Рузский А. В., Виженский В. А. Методы расчёта выбросов от автотранспорта и результаты их применения // Журнал автомобильных инженеров. № 86. 2014. С. 44–51.
14. Чижова В. С., Пыжова Е. А. Обзор методик расчета выбросов взвешенных частиц PM10 и PM2,5 в атмосферный воздух дорожно-транспортным комплексом на территориях крупных городов // Научный вестник автомобильного транспорта. 2021. № 3. С. 18–25.
15. Tyson, K.S. Biodiesel – the Clean, Green Fuel for Diesel Engines. U.S. Department of Energy National Renewable Energy Laboratory, 2000, available at: <https://p2infohouse.org/ref/38/37713.pdf>.
16. Ji, M.; Wei, Z. Review of Water Management in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. *Energies*, 2009, available at: <http://www.mdpi.com/1996-1073/2/4/1057/htm>.
17. Russ, J. New Frontiers in Solar Cell Conversion Efficiency. Spectrolab, Inc., 2009.
18. Ehsani, M.; Gao, Y. Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles Fundamentals Theory and Design. Second edition. A. Emadi, CRC Press, 2010. 558 p.
19. Kalghatgi, G. Development of Fuel/Engine Systems - The Way Forward to Sustainable. *Transport Engineering*. 2019; Vol. 5: 510-518. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.009>.
20. Trofimenko Y., Komkov V. and Trofimenko K. Forecast of energy consumption and greenhouse gas emissions by road transport in Russia up to 2050. *Transportation Research Procedia*, 14th International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities. 2020: 698-707.
21. Trofimenko Y., Komkov V. and Donchenko V. Problems and prospects of sustainable low carbon development of transport in Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 177 (2018), 012014.
22. Trofimenko Yu. V., Komkov V. I., Donchenko V. V. and Potapchenko T. D. Model for the assessment greenhouse gas emissions from road transport. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2019; Vol. 7, No. 1: 465-473.
23. Trofimenko Yu. V., Komkov V. I. Forecast of decarbonization of road transport in Russia until 2050 in the context of digitalization and expansion of the use of unmanned vehicles. 2021 *Intelligent technologies and electronic devices in vehicle and road transport complex (TIRVED)*, 2021. DOI: 10.1109/TIRVED53476.2021.9639206
24. Trofimenko J. V., Ginzburg V. A., Komkov V. I., Lytov V. M. Influence of the motor vehicle parking structure by fuel type and ecological class on greenhouse gas emissions. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018;15 (6): 898-910. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-6-898-910>
25. Trofimenko Ju. V., Efremov A. V., Fursov S. B. *Uproshhennaja metodika prognozirovaniya chislennosti parka avtotransportnyh sredstv* [A simplified method of forecasting the number of motor vehicle fleet]. Improvement of automobile and tractor engines: a collection of scientific papers, Moscow, MADI. 1992: 27-32. (In Russ.)
26. Trofimenko Ju. V., Voroncov Ju. M., Trofimenko K. Ju. *Utilizacija avtomobilej: nauchnaja monografiya* [Car Disposal: Scientific Monograph]. Moscow, AK-PRESS. 2011: 332. (In Russ.)
27. Donchenko V. V.; Kunin A. V.; Ruzsky, V.; Vizhensky, Yu. I. Metody raschjota vybrosov ot avtotransporta i rezul'taty ih primenenija [Methods for calculating emissions from motor vehicles and the results of their application]. *Zhurnal avtomobil'nyh inzhenerov*. 2014; 3 (86): 44-51. (In Russ.)
28. Chizhova, V. S. Pyzhova, E. A. Obzor metodik rascheta vybrosov vzveshennyh chastic RM10 i

REFERENCES

RM2,5 v atmosfernyj vozduh dorozhno-transportnym kompleksom na territorijah krupnyh gorodov [Review of methods for calculating emissions of suspended particles PM10 and PM2.5 into the atmospheric air by road transport complex in the territories of large cities]. *Nauchnyj vestnik avtomobil'nogo transporta*. 2021; 3: 18-25. (In Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Трофименко Ю. В. Существенный вклад в разработку общей концепции научной работы и получение исходной информации по структуризации парка автомобилей.

Комков В. И. Вклад в содействие подбора аналитических данных, их обработка и проведение расчетов (работа с программой Copert), а также редактирование элементов данной статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

IUrii V. Trofimenko made a significant contribution to the development of the general concept of scientific work and obtaining initial information on the structurization of the car fleet.

Vladimir I. Komkov contributed to the selection of analytical data, their processing and calculations (work with the Copert program), as well as editing elements of this article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Трофименко Юрий Васильевич – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой техносферной безопасности, SPIN-код: 6706-7760.

Комков Владимир Иванович – канд. техн. наук, доц. кафедры техносферной безопасности, SPIN-код: 5444-3081.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

IUrii V. Trofimenko – Dr. of Sci., Professor, the Head of the Technosphere Safety Department, SPIN-код: 6706-7760.

Vladimir I. Komkov – Cand. Of Sci., Associate Professor of the Technosphere Safety Department, SPIN-код: 5444-3081.

Научная статья
УДК 656.02
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-362-386>
EDN: YNNWNU



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ ПО СЕТИ В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕРЕВОЗОК ГОРОДСКИМ ПАССАЖИРСКИМ ТРАНСПОРТОМ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

А. И. Фадеев*, А. М. Ильянков, В. В. Укадеров

Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Россия

9135335784@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6581-7087>

ilyankov3322@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0924-9934>

ukader24rus@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-7224-6619>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Процесс планирования общественного транспорта подразделяется на ряд задач стратегического, тактического и оперативного уровней, к которым относятся разработка системы маршрутов, установление интенсивности движения по маршрутам, проектирование структуры парка подвижного состава, распределение имеющегося парка подвижного состава по маршрутам, определение требуемого объема субсидирования и др.

Материалы и методы. В статье дана многокритериальная математическая модель проектирования перевозок, на основании которой приведенные выше задачи решаются путем распределения (ограниченных или неограниченных) транспортных ресурсов между допустимыми маршрутами транспортной сети в соответствии с множеством критериев эффективности, на которые могут быть наложены данные ограничения.

Формирование допустимых маршрутов на транспортной сети может быть осуществлено посредством алгоритмов, разработанных в рамках решения задач TNDP и TNDPSP. Маршруты также могут быть откорректированы экспертами.

В статье показано, что при решении задач проектирования перевозок транспортный спрос следует описывать матрицей пассажирских корреспонденций, сформированной за все время движения транспорта в будний день, с целью учета всех пассажирских потоков по маршрутной сети, а не только периодов наибольшей интенсивности перевозок.

Расчет параметров транспортного предложения осуществляется по результатам распределения пассажирских корреспонденций по маршрутной сети (РАР), что является сложной нерешенной до настоящего времени проблемой. В статье изложена разработанная методика РАР, основанная на гибкой стратегии пассажира, учитывающей время ожидания транспорта, непрямолинейность маршрута, предпочтения видов транспорта, возможное перераспределение пассажирских потоков между остановочными пунктами сети, расположенными в пределах пешеходной доступности. Непрямолинейность поездок оценивается посредством полученной эмпирической модели деления спроса по длине поездок.

Результаты. Сформулированы задачи проектирования перевозок общественным транспортом, разработана многокритериальная математическая модель их решения.

Изложена методика распределения пассажирских потоков по маршрутной сети, основанная на гибкой стратегии пассажира.

Практическая реализация описанной методики РАР осуществлена посредством специально разработанного программного обеспечения с использованием реляционной системы управления базами данных (СУБД).

Обсуждение и заключение. Эффективность разработанной методики РАР показана на тестовых расчетах, которые осуществлены с использованием пассажирских корреспонденций, среднего буднего дня октября месяца 2019 года, полученных посредством обработки валидаций электронных проездных билетов городского пассажирского транспорта г. Красноярска.

© Фадеев А. И., Ильянков А. М., Укадеров В. В., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: общественный транспорт, планирование общественного транспорта, маршрутная сеть, интервалы движения по маршрутам, парк подвижного состава, матрица пассажирских корреспонденций, транспортный спрос, транспортное предложение, программа перевозок, транспортная сеть, маршрут, поездка

Статья поступила в редакцию 28.04.2023; одобрена после рецензирования 25.05.2023; принята к публикации 26.06.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: 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. Т. 20, № 3 (91). С. 362-386. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-362-386>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-362-386>

EDN: YNNWNU

CORRESPONDENCE DISTRIBUTION OVER A NETWORK IN DESIGNING PUBLIC URBAN PASSENGER TRANSPORTATION TASKS

Aleksandr I. Fadeev*, Altksei M. Iliankov, Vitalii V. Ukaderov

Siberian Federal University,

Krasnoyarsk, Russia

9135335784@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6581-7087>

ilyankov3322@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0924-9934>

ukader24rus@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-7224-6619>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The process of planning public transport is divided into a few number of tasks in strategic, tactical and operational levels, which include the development route system, the establishment of traffic intensity along routes, the design of the structure of road transport vehicles, the distribution of the current road transport vehicles along the routes, determining the required amount of the subsidies, etc.

Materials and methods. The article presents a multi-criteria mathematical model of transportation design, according to which the tasks have been solved by distributing (limited or unlimited) transport resources between the permissible routes of the transport network in accordance with a variety of efficiency criteria, which can be the subject to appropriate restrictions.

The formation acceptable routes on the transport network can be carried out by means of the algorithms developed, for example, in the framework of solving TNDP and TNDFSP tasks. The routes can also be adjusted by experts.

Transport demand is set by a matrix of passenger correspondence generated for the entire period of traffic on a weekday, to ensure that all passenger flows along the route network are taken into account, and not only the periods of the greatest traffic intensity.

The calculation of the parameters of the transport offer in the process of solving the problems of transportation design is carried out based on the results of the passenger correspondence distribution on the route network (PAP), which is a complex problem unsolved today. The article describes the developed PAP methodology based on a flexible passenger strategy that takes into account the waiting time for transport, the proximity of the route through an empirical model of dividing demand by the length of trips, the preferences of transport modes, the possible redistribution of passenger flows between the stopping points of the network located within a walking distance.

Results. The tasks of designing public transport transportation have been formulated, a multi-criteria mathematical model of their solution has been developed.

The method of distribution of passenger flows on the route network based on a flexible passenger strategy has been described.

© Fadeev A. I., Iliankov A. M., Ukaderov V. V., 2023



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

The effectiveness of the developed PAP methodology is shown on test calculations, which were carried out using passenger correspondence, an average weekday in October 2019, obtained by processing validations of e-tickets of urban passenger transport in Krasnoyarsk.

Discussion and conclusion. *The practical implementation of the described methodology for the distribution of passenger flows on the route network using relational database management systems (DBMS) MS SQL Server has been carried out.*

KEYWORDS: *public transport, public transport planning, route network, traffic intervals along the routes, road transport vehicles, passenger correspondence matrix, transport demand, transport supply, transportation program, transport network, route, trip*

The article was submitted 28.04.2023; approved after reviewing 25.05.2023; accepted for publication 26.06.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Fadeyev A. I., Ilyankov 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. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-362-386>

ВВЕДЕНИЕ

Развитие общественного транспорта является важнейшей проблемой в современном обществе. Транспортная система должна обеспечивать требуемое качество обслуживания пассажиров при минимальном объеме затрат.

Согласно [1, 2, 3], процесс планирования общественного транспорта можно разделить на пять задач, которые в зависимости от их временного горизонта могут быть разделены на три уровня планирования:

- стратегический (разработка системы маршрутов);
- тактический (установление интенсивности, разработка расписания движения);
- оперативный (формирование плана выпуска подвижного состава, наряда водителей).

Следует отметить, что задачи разработки маршрутов, установления частот (интервалов движения), составления расписания движения могут решаться как в комплексе, так и по отдельности. Например, для новой маршрутной системы требуется определить интервалы движения и сформировывать расписание. С другой стороны, периодически возникает потребность пересматривать интервалы и расписания движения в соответствии с изменившимися пассажирскими потоками без изменения самих маршрутов. Для практики актуальным является подключение к маршрутной сети новых остановочных пунктов, микрорайонов или элементов улично-дорожной сети (УДС). В таких случаях одним из основных критериев является минимум объема корректировки маршрутной системы при выполнении установленных ограничений (таких, например, как интервалы движения).

Стратегическая задача проектирования системы маршрутов населенного пункта выполняется достаточно редко, зачастую осуществляется совершенствование системы, т.е. развитие маршрутов в соответствии с изменившимися условиями, например, пассажирскими потоками, строительством новых линий метрополитена и т.д.

С точки зрения пассажиров, маршрутная сеть должна охватывать максимально большую зону обслуживания, быть доступной, проложенной по кратчайшему пути, соответствовать имеющемуся транспортному спросу. Критерий функционирования транспортной системы – обеспечение минимальных затрат времени на поездки и сопутствующее пешее перемещение, а также наименьшего числа пересадок [4, 5].

Для транспортного оператора желательно минимизировать общее число маршрутов, что позволяет сократить количество подвижного состава и экипажей, необходимых для формирования транспортного предложения: маршруты не должны быть слишком короткими или длинными [3]. В мировой практике считается, что при проектировании маршрутов не следует планировать более двух пересадок, иначе пассажир может переключиться на другой вид транспорта.

Охват территории обуславливает объем спроса, который может быть обслужен общественным транспортом. Данный параметр зависит от плотности маршрутной сети и пешеходной доступности остановочных пунктов.

Операторы отдают предпочтение сетям определенной формы: радиальным, прямоугольным, треугольным и т.д. [6].

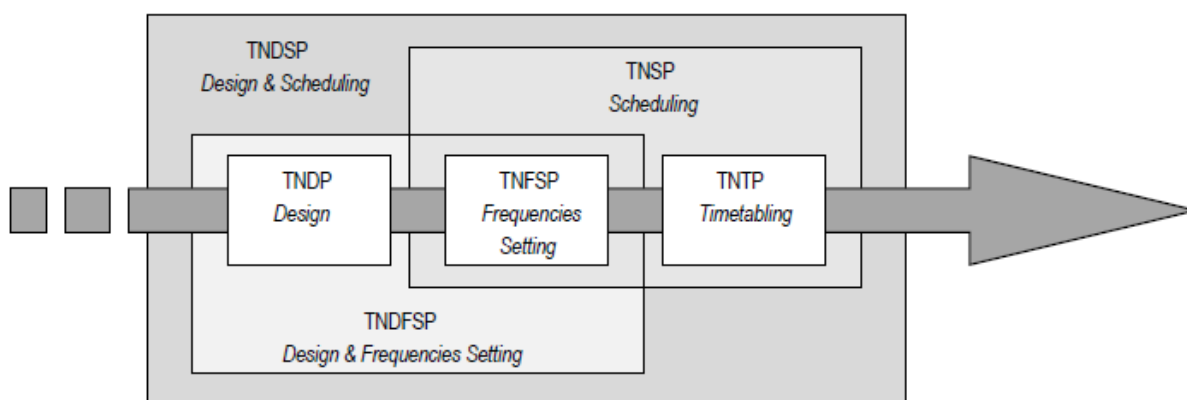


Рисунок 1 – Структура задач проектирования маршрутной сети [3]

Figure 1 – Structure of route network design tasks [3]

Интервалы движения для каждого маршрута устанавливаются дифференцированно по периодам времени: часам дня, дням недели или сезонам, таким образом, чтобы обеспечивать соответствие транспортного предложения и спроса, рентабельную работу операторов. Главной задачей при проектировании перевозок пассажиров транспортом общего пользования по регулярным маршрутам является нахождение компромисса между этими противоречивыми целями.

На рисунке 1 задачи проектирования маршрутной сети классифицированы следующим образом: проектирование (TNDP), настройка частот (TNFSP), составление расписания (TNTP), проектирование и настройка частот в комплексе (TNDFSP = TNSP + TNFSP), планирование (TNSP = TNFSP + TNTP) и, наконец, вся проблема проектирования и планирования (TNDSP) как совокупность трех основных проблем [3]. Кроме перечисленных задач, актуальными являются вопросы совершенствования структуры парка подвижного состава, финансирования функционирования операторов.

Таким образом, проектирование перевозок общественным транспортом осуществляется посредством решения следующих задач формирования транспортного предложения¹:

- разработка системы маршрутов;
- установление интенсивности движения по маршрутам;

– проектирование структуры парка подвижного состава;

– распределение имеющегося парка подвижного состава по маршрутам;

– определение требуемого объема субсидирования при заданных параметрах (критериях) качества транспортного обслуживания (в т.ч. пассажирских тарифах);

– распределение имеющегося объема субсидий между маршрутами и др.

Система маршрутов общественного транспорта (задача TNDP) разрабатывается на основании транспортной сети и матрицы спроса, определенной между остановочными пунктами или транспортными районами (traffic analysis zones, TAZ [7]). Матрица спроса (отправления – прибытия пассажиров OD) содержит количество поездок, которые осуществляются между пунктами транспортной сети за определенный период времени. Точность данных матрицы OD обуславливает адекватность решения поставленной задачи, поэтому методы определения транспортного спроса имеют особое значение. В некоторых случаях в матрицах OD содержится дополнительная информация, например, набор возможных зон пересадки [2].

Маршрут формируется из двух терминалов (начально-конечных остановочных пунктов) и последовательности промежуточных остановочных пунктов. Терминалы имеют инфраструктуру для выполнения начально-конечных

¹ Фадеев А. И. Методология проектирования перевозок и управления наземным пассажирским транспортом общего пользования: диссертация ... доктора технических наук: 05.22.10. Иркутск, 2021.

операций: стоянки, разворотные площадки, бытовое обслуживание экипажей и др. Промежуточные остановочные пункты не могут быть началом или завершением маршрута.

Однозначного определения проблемы формирования маршрутов не существует, обычно рассматривается несколько целей, ограничений и допущений. Из-за сложности задачи применяются допущения и ограничения, которые не всегда отвечают практическим условиям [2].

Настройка частоты заключается в установлении интервалов движения по каждому маршруту [2, 7]. От интервалов движения зависит время ожидания пассажиров и требуемое количество транспортных средств. По причине сложности рассматриваемых задач они традиционно решаются последовательно, сначала проектируется транспортная сеть, затем осуществляется настройка частоты. Только в последнее десятилетие предпринимаются попытки решения задач проектирования маршрутов и настройки частоты (TNDFSP) в комплексе [8]. Было доказано, что TNDFSP является очень сложной проблемой, которая требует определения многих условий. В разных исследованиях применяются неодинаковые допущения, что приводит к невозможности сопоставления полученных результатов и их несоответствию реальным условиям функционирования общественного транспорта [2]. Зачастую при решении задачи используется один критерий, в то время как к маршрутной 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.

Распределение пассажирских корреспонденций по маршрутной сети (РАР) является сложной задачей [2]. Для РАР было предложено множество моделей и подходов к решению с различными уровнями детализации и сложности [9, 10]. Поведение пассажиров почти всегда значительно упрощается.

Исследования задачи TNDFSP касаются в основном городских автобусных сетей. При рассмотрении других видов транспорта, таких как поезд или метро, аспекты, связанные с ограничениями инфраструктуры, имеют большее значение, поэтому проблема в этих случаях, как правило, имеет дополнительные специфические ограничения [2].

Исследования в области формирования городских маршрутных систем в России про-

водились с 30-х годов XX в. [11, 12, 13, 14]. На первом этапе был сформирован комплекс требований, которым должна отвечать маршрутная система: соответствовать фактическим перемещениям населения, соединять корреспондирующие пункты сети по кратчайшему пути, обеспечивать перевозки с наименьшими затратами времени. Процедура формирования маршрутных систем была сформулирована на уровне общих положений.

В дальнейшем методы оптимизации маршрутных систем характеризуются использованием математических методов и ЭВМ. Предлагаемые методики основаны на принципе направленного отбора вариантов маршрутов по критерию минимальных затрат времени населения на перемещения с применением определенных ограничений [15, 12, 13, 14], таких как:

- списка существующих маршрутов, не подлежащих изменению;
- минимальной и максимальной длины маршрутов;
- минимального значения интервала движения;
- предельного количества подвижного состава;
- минимального числа пассажиров, требуемого для открытия маршрута.

Чаще всего в качестве критерия оптимальности использовались затраты времени на поездки с учетом пересадок. В некоторых работах, например [16], рассматривается подход к совершенствованию маршрутной системы путем последовательного формирования вариантов экспертами и формальной оценки данных вариантов. Считается, что в этом случае учитываются трудно формализуемые требования, предъявляемые к маршрутной системе.

Имеются работы, в которых задача рассматривается в многокритериальной постановке [17].

В некоторых источниках (например, [18]) описывается локальная маршрутизация общественного транспорта, касающаяся ограниченного числа маршрутов.

Проектирование структуры парка является отдельной задачей, которая заключается в определении вместимости и количества транспортных средств на маршруте. Данная задача, как правило, решается без изменения маршрутов.

В разработанных методиках определение структуры парка подвижного состава осуществляется в основном по условию соответствия транспортного спроса и предложения. Баланс

спроса и предложения формулируется исходя из пассажирооборота за определенный период времени (час, сутки, месяц, год и т.д.) или мощности пассажирских потоков на наиболее загруженном участке сети² [2, 19]. Однако при этом не учитывается эффект перераспределения пассажирских потоков между маршрутами при изменении интенсивности движения по ним.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Постановка задачи проектирования перевозок. Сформулируем задачу проектирования перевозок следующим образом. Имеется транспортная сеть – совокупность взаимосвязанных узлов, расположенных на УДС: $G=(W, E)$, где W – конечное непустое множество вершин $w \in W$; E – множество связей (дуг или ребер) между вершинами $(u, w) \in E$; $u \neq w$. Для каждого ребра $(u, w) \in E$ заданы определенные свойства, например, длина, время и т.д.

В зависимости от решаемых задач применяются различные транспортные модели, в нашем случае вершинами транспортной сети являются остановочные пункты общественного транспорта. В множестве G можно выделить подмножества G^T транспортных сетей различных видов общественного транспорта (автобус, троллейбус, трамвай и т.д.)

Задача дислокации остановочных пунктов общественного транспорта решается исходя из необходимости обеспечения рациональной пешеходной доступности. Эмпирически установлено (например, [20]), что пешеходная доступность в пределах 400–500 м от автобусной остановки приводит к удовлетворению 90% транспортного спроса. С другой стороны, уменьшение расстояния пешеходной доступности обуславливает снижение скорости сообщения общественного транспорта и повышение эксплуатационных затрат.

Таким образом, дислокация остановочных пунктов осуществляется на основе компромисса между пешеходной доступностью, скоростью сообщения и экономической эффективностью транспортного процесса. Задача рационального размещения остановочных

пунктов рассмотрена, например, в [20].

На графе G определено множество допустимых маршрутов M ; $m=\{w_1, \dots, w_i, \dots, w_t\}$; $m \in M$; $|M|=\eta$. Пара соседних вершин w_i, w_{i+1} связана дугой $e_{w_i, w_{i+1}}$ графа G .

Маршруты подразделяются по видам транспорта $M=\{M^T\}$, например, автобус, трамвай, троллейбус. Движение по маршрутам осуществляется в двух направлениях: прямом и обратном. Следовательно, каждый маршрут описывается двумя последовательностями пунктов его траектории в зависимости от направления движения $k=\{a, b\}$ (где a, b – прямое и обратное направление соответственно), $m=\{m^a, m^b\}$. Маршрут можно представить, как $m^k=\{w_1^k, \dots, w_i^k, \dots, w_t^k\}$.

Допустимым является маршрут, удовлетворяющий соответствующим ограничениям, например, по длине, времени движения, потенциальному числу пассажиров и т.д.

Для функционирования маршрутов используется множество транспортных средств Ψ (парк подвижного состава), которые подразделяются на подмножества по видам транспорта (автобус, троллейбус, трамвай), классам вместимости (особо большой, средний, малый и особо малый), стоимости эксплуатации. В зависимости от постановки задачи может быть применена классификация транспортных средств по другим параметрам, например, экологическому классу.

На практике, как правило, маршрут обслуживается подвижным составом одного класса вместимости. В некоторых работах (например, [21]) рассматривается возможность применения транспортных средств неодинаковой вместимости. Однако эффективность данного предложения не доказана, т.к. в этом случае существенно усложняется процесс планирования расписания и управления движением по маршруту.

Задачи проектирования перевозок можно решать путем распределения (ограниченных или неограниченных) транспортных ресурсов между допустимыми маршрутами транспортной сети в соответствии с множеством критериев эффективности, на которые при необходимости накладываются соответствующие

² Ефремов И. С., Кобозев В. М., Юдин В. А. Теория городских пассажирских перевозок: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1980. 535 с.

Пассажирские автомобильные перевозки: учебник для вузов / Гудков В.А., Миротин Л.Б., Вельможин А.В., Ширяев С.А. М.: Горячая линия-Телеком, 2006. 448 с.

ограничения³. Многокритериальная математическая модель проектирования перевозок заключается в оптимизации функции

$$F(X) \rightarrow \min; X = \{\Psi_1, \dots, \Psi_n\};$$

$$\Psi_k \subset \Psi; F = \{f_1, \dots, f_s\}, \quad (1)$$

где X – вектор транспортных ресурсов (транспортных средств), закрепленных за маршрутами;

Ψ_k – множество транспортных средств, закрепленных за k -м маршрутом;

f_i – i -й критерий качества транспортного предложения, на который может быть наложено ограничение: $f_i^{\min} \leq f_i \leq f_i^{\max}$;

Парк подвижного состава может быть ограничен по числу транспортных средств каждого типа.

Некоторые критерии требуется максимизировать, но их можно привести к виду (1).

2. Формирование допустимых маршрутов на транспортной сети может быть осуществлено посредством алгоритмов, разработанных в рамках решения задач TNDP и TNDPSP [2], а также с привлечением экспертов. Например, в работе [23] предложен многоуровневый и многорежимный метод проектирования сети. Сеть состоит из трех уровней: каркасного, артериального и фидерного, которые описывают различные виды общественного транспорта (метро, легкорельсовый транспорт, троллейбус, BRT, обычный автобус и железнодорожный). В [24] маршрутная сеть формируется посредством открытой системы моделирования MATSim.

В работе [25] с использованием эвристического алгоритма генерируется три различных и взаимодополняющих набора рациональных и реалистичных маршрутов. Первая группа маршрутов формируется посредством кратчайших путей пассажирских корреспонденций высокого спроса. Маршруты второй группы соединяют основные транзитные узлы (например, железнодорожные вокзалы) с линиями высокого спроса. Третья группа маршрутов образовывается на существующей сети автобусов.

В стандартном подходе предполагается, что маршруты могут начинаться и заканчи-

ваться на любом узле транспортной сети. Некоторые исследования учитывают, что на практике в качестве терминалов допустимо использовать заданное подмножество соответственно оснащенных узлов [26]: начальные и конечные узлы маршрутов предопределены, что значительно сокращает количество возможных вариантов.

Более инновационный подход заключается в том, что на первом этапе проектирования маршрутной системы определяется общая топология сети (в форме звезды, треугольника или колеса со спицами) так, что маршруты могут следовать только по заранее определенным коридорам [27].

В этом направлении разработаны рекомендации по дизайну маршрутной сети, например, [28]:

- в крупных мегаполисах применяется концепция высокой плотности линий, что позволяет обслуживать пассажиров не более чем с одной пересадкой;

- в городах с населением 100–200 тыс. жителей спрос удовлетворяется одной двумя кольцевыми линиями, проложенными минуя центральную часть;

- в городах с населением до 100 тыс. человек все поездки выполняются по радиальным маршрутам через центр;

- в небольших населенных пунктах спрос на транспортное обслуживание осуществляется путем координации междугородных и пригородных линий;

- в более мелких населенных пунктах транспортное обслуживание осуществляется региональными линиями ближайшего крупного города и (или) магистрального транспорта (в таких случаях необходима координация расписаний перевозок).

Аналогичные принципы изложены в других источниках по проектированию маршрутных сетей.⁴

3. Определение транспортного спроса

Транспортный спрос задается матрицей пассажирских корреспонденций (OD) $D = \|d_{ij}\|$, где d_{ij} – количество пассажиров, которые должны быть перевезены из узла i в узел j транспортной сети. Матрица OD формируется как некая усредненная модель

³ Фадеев А. И. Методология проектирования перевозок и управления наземным пассажирским транспортом общего пользования: диссертация ... доктора технических наук: 05.22.10. Иркутск, 2021.

⁴ Методические рекомендации по разработке Документа планирования регулярных перевозок пассажиров и багажа по муниципальным и межмуниципальным маршрутам автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом (утв. Минтранс России 30.06.2020).

потребности населения в передвижениях по транспортной сети.

В ранее проведенных исследованиях для матрицы корреспонденций предлагается использовать период наибольшей мощности пассажиропотоков. Данному условию отвечает утренний или вечерний пиковый период.⁵ Эту рекомендацию нельзя признать приемлемой, так как, во-первых, периоды наибольшей мощности пассажирских потоков на разных маршрутах неодинаковы и, во-вторых, пассажирские корреспонденции разных периодов движения транспорта существенно отличаются.

Для задач проектирования перевозок следует применять матрицы корреспонденций, в которых учтены все пассажирские потоки по маршрутной сети. Данному условию соответствует весь период движения общественного транспорта за рабочий день. Матрица выходных дней может быть использована для оценки эффективности маршрутной системы в эти дни и расчета оптимальной интенсивности движения подвижного состава по маршрутам.

Матрица OD сама по себе является сложной проблемой, она оказывает существенное влияние на результат решения задачи и оценку работоспособности алгоритмов.

В большинстве работ, посвященных TNDP, используется несколько эталонных примеров для сравнения результатов [2]. Наиболее часто применяемый эталон предложил Mandl (1979). Сеть состоит из 15 узлов и симметричной матрицы OD со 142 корреспонденциями. Очевидно, что данный эталон имеет чисто теоретическое значение с недоказанной ценностью для требований практики к результатам решения рассматриваемой задачи. Упрощения, сделанные в теории, усложняют практическое применение предложенных методов решения [2].

Существующие методы определения пассажирских потоков вследствие их трудоемкости и ограниченной эффективности не позволяют осуществлять на должном уровне мониторинг транспортного спроса. В настоящее время особую перспективу представляют методы изучения подвижности населения, основанные на сборе, интеграции и анализе больших и разнородных данных, генерируемых различными источниками в пространствах жизнедеятельности человека: мобильными телефо-

нами, транспортными средствами, камерами видеонаблюдения и т.д. (Urban computing, Big data, Internet of things, IoT).

В рамках данного подхода в работах [29, 30] приведена методика определения корреспонденций пассажиров общественным транспортом из операций валидаций электронных проездных билетов (Electronic Travel Tickets): смарт-карт (smartcard), транспортных карт, магнитных карт, мобильных телефонов или других электронных устройств (Electronic Gadgets), реквизиты которых фиксируются в автоматизированной системе оплаты проезда Automated Fare Collection (AFC) при выполнении операции валидации.

Апробация методики расчета пассажирских корреспонденций из операций валидации электронных проездных билетов осуществлена по данным системы общественного транспорта г. Красноярска за октябрь 2016 г. и апрель 2019 г., предоставленных МКУ «Красноярсгортранс». Доказано в [29, 30], что пассажирские корреспонденции, рассчитанные посредством разработанной методики, статистически соответствуют генеральному множеству поездок общественным транспортом в пределах допустимых погрешностей, в результате обеспечивается оценка характеристик спроса общественного транспорта.

В данной работе использована матрица OD, сформированная за период движения буднего (рабочего) дня.

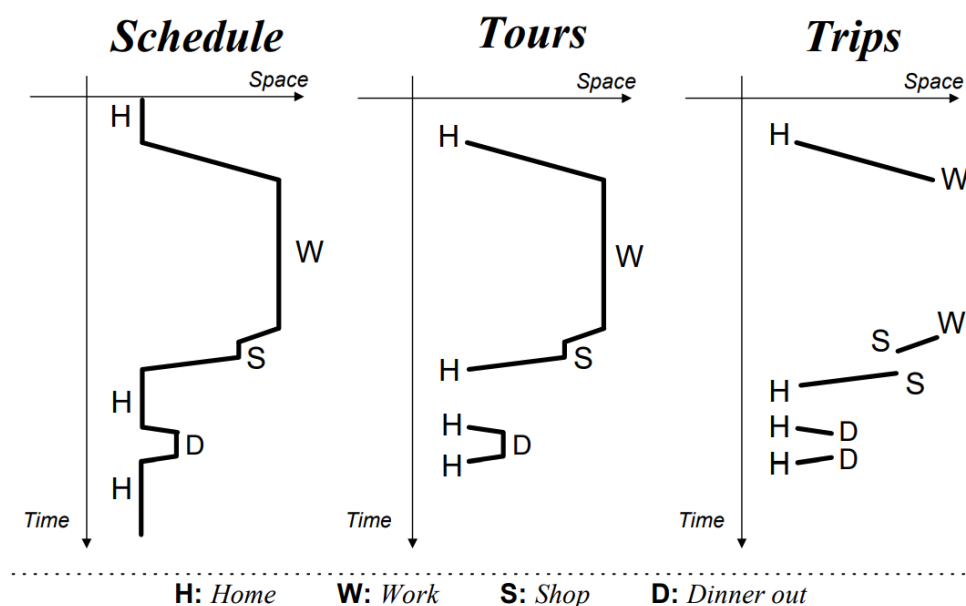
4. Задача распределения корреспонденций по сети. Для расчета транспортной работы требуется осуществить:

- разделение корреспонденций по видам транспорта (modesplit, mode-share);
- распределение корреспонденций по сети (traffic assignment, route assignment, route choice).

При решении задачи разделения корреспонденций по видам транспорта рассматривается выбор пользователем способа поездки⁶. Наиболее простые модели основаны на эмпирических моделях, обеспечивающих разделение спроса по наиболее представительному фактору, например, времени поездки. Также используются модели, основанные на вероятностном дискретном выборе: критерий выбора – максимум полезности или минимум затрат пассажира.

⁵ Ефремов И. С., Кобозев В. М., Юдин В. А. Теория городских пассажирских перевозок: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1980. 535 с.

⁶ Горев А. Э. Основы теории транспортных систем: учеб. пособие. СПбГАСУ. СПб., 2010. 214 с.

Рисунок 2 – Иллюстрация активности (транспортного поведения жителя)⁷Figure 2 – Representing Activity/Travel Behavior⁷

Следует учитывать наличие мультимодальных поездок, которые формируются по маршрутам нескольких видов транспорта.

Для описания транспортной мобильности будем использовать следующие понятия [31] (рисунок 2):

- деятельность (activity) – занятие, которое осуществляется в определенном месте и на которое, как правило, требуется определенное время (например, работа, учеба, покупки, прием у врача и т.д.);

- этап (stage), сегмент, звено поездки – движение с использованием одного вида транспорта, точнее, одного транспортного средства;

- поездка (trip) – перемещение между смежными видами деятельности, осуществленное посредством одного или нескольких этапов (сегментов), если поездка выполняется с пересадками (сменой транспортного средства);

- тур (tour) – последовательность (цепочка) поездок, начинающихся и заканчивающихся в одном и том же месте, в отличие от цепочки поездок (tripchain), которая может не заканчиваться в одном и том же месте;

- цель поездки (trippurpose) определяется

деятельностью, осуществляемой в конце поездки.

При распределении корреспонденций по сети (passenger assignment problem, PAP) в задачах проектирования перевозок моделируется поведение пассажиров при выборе поездок. Проблема состоит в определении маршрута (или маршрутов с пересадками) для обслуживания пассажирской корреспонденции. PAP считается подзадачей TNDP и TNDPSP [2].

PAP общественного транспорта отличается от аналогичной задачи распределения легкового транспорта по УДС. Сеть общественного транспорта отличается от автомобильной УДС. Она включает в себя несвязанные остановочными пунктами участки (рисунок 3). Например, движение прямого и обратного направлений осуществляется через остановки, расположенные на разных сторонах проезжей части.

Зачастую пассажир может выбирать начало и завершение поездки из нескольких остановочных пунктов, находящихся в пределах пешеходной доступности, т.е. для пассажирской корреспонденции поездки могут начинаться не только в пункте и заканчиваться необязательно в пункте (рисунок 4).

⁷ Transportation systems analysis: demand and economics. Режим доступа: https://ocw.mit.edu/courses/1-201j-transportation-systems-analysis-demand-and-economics-fall-2008/resources/mit1_201jf08_lec05/ (дата обращения: 11.05.2023).

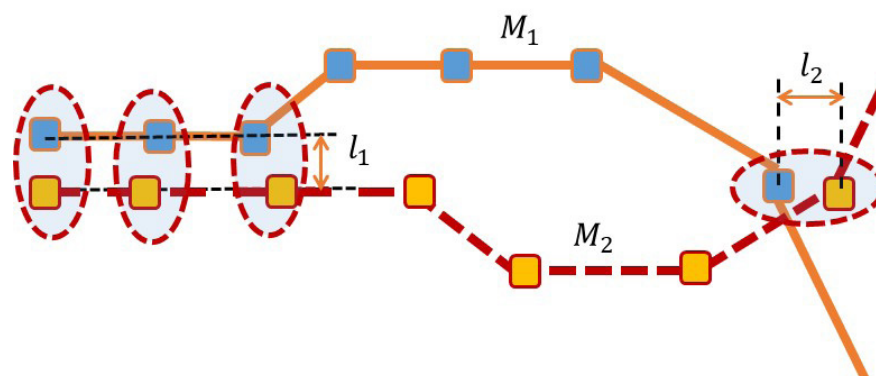


Рисунок 3 – Участок сети с остановочными пунктами маршрутов M_1 и M_2 в пределах пешеходной доступности, $l_1 \leq l_p$, $l_2 \leq l_p$, где l_p – расстояние пешеходной доступности
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – A section of the network with stopping points of M_1 and M_2 routes within a walking distance, $l_1 \leq l_p$, $l_2 \leq l_p$, where l_p – a walking distance
Source: compiled by the authors.

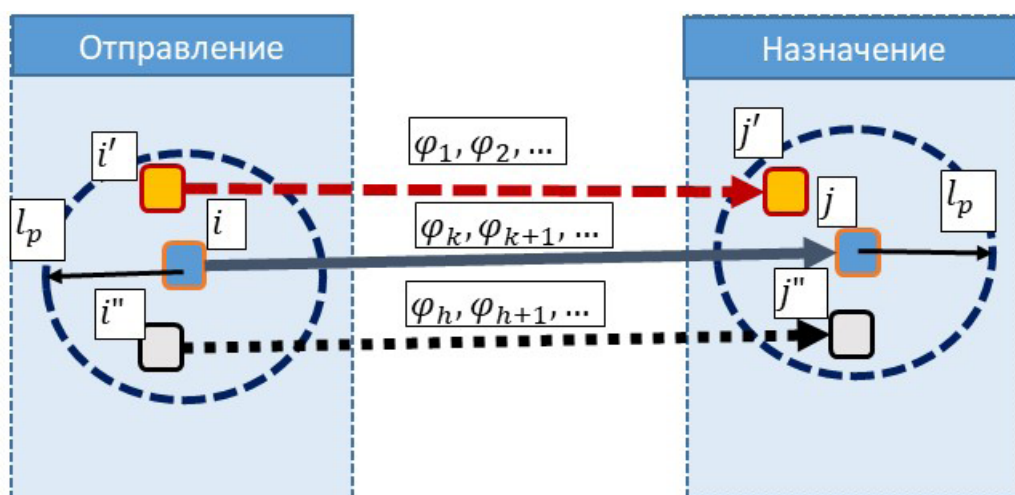


Рисунок 4 – Схема формирования прямых поездок для корреспонденции d_{ij} :
 l_p – расстояние пешеходной доступности;
 i, i', i'' – остановочные пункты начала поездок;
 j, j', j'' – остановочные пункты завершения поездок;
 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k, \dots$ – поездки.
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Direct trips formation scheme for correspondence d_{ij} :
 l_p – walking distance;
 i, i', i'' – stopping points for starting trips;
 j, j', j'' – stopping points for completing trips;
 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k, \dots$ – trips.
Source: compiled by the authors.

При формировании поездок необходимо рассматривать пешеходные и пересадочные процессы между различными видами общественного транспорта (автобус, железная дорога) или объектами общественного и частного транспорта. Доступ к остановкам может моделироваться центроидными соединителя-

ми в простых моделях и одной или несколькими вспомогательными сетями в более реалистичных проектах [31].

Для обеспечения пересадок остановочные пункты объединяются в комплексы, что существенно усложняет процесс формирования модели транспортной сети.

При описании мультимодальных сетей, в которых пассажиры могут выбирать между видами транспорта, применяются различные подходы [32]. В самых простых версиях нет взаимодействия между потоками пассажиров разных видов транспорта. В таких работах, как правило, на первом этапе осуществляется распределение спроса между видами транспорта, а затем для каждого из них решается задача РАР.

В более сложных подходах учитывается возможность того, что пассажиры совершают пересадки. В этих случаях выбор вида транспорта осуществляется в процессе формирования допустимых вариантов поездок пассажира.

Особую проблему составляет описание модели транспортной сети. При кодировании сети возможно множество потенциальных ошибок: пропуск ссылок и узлов, неправильное кодирование расстояний, использование неправильных направлений и др. [31]. В настоящее время в задачах проектирования перевозок имеется возможность использовать модель маршрутной сети из систем диспетчерского управления общественным транспортом, что существенно упрощает подготовку исходных данных.

На выбор поездки пассажиром определенное влияние оказывает тарифная система, например, тариф, предусматривающий пересадки без дополнительной оплаты, может стимулировать поездки с пересадками.

Пропускная способность зависит от вместимости и частоты движения подвижного состава. Рассмотрим влияние интенсивности движения. При относительно небольшом интервале между транспортными средствами (порядка 10 мин на городских маршрутах, 15–20 мин междугородных) пассажиры приходят на остановочный пункт случайным образом без учета расписания (даже если оно существует). В таких случаях при стабильных интервалах среднее время ожидания пассажира примерно равно половине интервала движения. При значительных интервалах пассажиры приходят ближе ко времени отправления, т.е. время ожидания определяется более сложным образом. На мультимодальных перевозках могут организовываться скоординированные поездки. Например, расписание получасового автобусного сообщения с железнодорожной станцией может быть скоординировано так, чтобы автобус прибывал на станцию за 5 мин до отправления поезда.

Методы назначения поездок в работе [31] подразделяются на:

- наивные «все или ничего», которые приемлемы в основном только для сетей с большими интервалами движения (как правило, на большие расстояния);
- учитывающие несколько возможных вариантов поездок, например, распределение пропорционально интенсивностям движения;
- основанные на равновесии со стохастическим элементом или без него, учитывающие возможную перегруженность общественного транспорта.

Наивный алгоритм «все или ничего» назначает всех пассажиров к поездке с минимальным временем (с учетом времени ожидания). Выбор этого единственного минимального пути был в течение многих лет традиционным подходом к решению рассматриваемой задачи.

Более реалистичным подходом является распределение на основе вероятности посадки пропорционально интенсивности движения.

В случаях нескольких вариантов поездок перспективным является подход, основанный на гибкой стратегии пассажира, которая заключается в следующем:

- определяются возможные варианты сегментов поездок;
- пассажиры распределяются между поездками на основе вероятности выбора сегмента поездки, которая пропорциональна интенсивности движения транспортных средств.

Очевидно, что, формируя поездку, пассажир до начала поездки оценивает возможное время ожидания транспорта на каждом из сегментов.

Перегруженность сегмента поездки обусловливается двумя факторами: во-первых, ограниченной вместимостью транспортных средств (автобусов, поездов) и, во-вторых, взаимодействием между общественным транспортом и частными автомобилями, использующими одну и ту же дорожную сеть – увеличение трафика одного вида транспорта влияет на время в пути другого.

Для распределения пассажирских корреспонденций по маршрутам наиболее часто используются подходы, основанные на следующих допущениях стратегии поведения пассажира при выборе поездок [33]:

- минимальное число пересадок;
- поездки по кратчайшему пути;
- посадка в первое подходящее транспортное средство, т.е. поездки между конкурирующими маршрутами распределяются пропорционально интенсивности движения.

Следует отметить, что задача РАР сама по себе является очень сложной проблемой с обширной литературой, в которой описано множество моделей и подходов [2], однако ее до настоящего времени нельзя признать окончательно решенной.

Рассмотрим методику распределения пассажирских корреспонденций на маршрутной сети, в которой, в отличие от ранее разработанных подходов, учитывается:

- перераспределение пассажирских потоков через остановочные пункты, расположенные в пешеходной доступности от пунктов начала и завершения пассажирских корреспонденций соответственно;

- предпочтения пассажиров в зависимости от длины или времени поездки.

Пассажир отдает предпочтение поездкам по кратчайшему пути, который измеряется расстоянием или временем. Однако из нескольких возможных вариантов поездки пассажир не обязательно выберет кратчайший. Очевидно, что пассажир не определит разницу во времени в несколько процентов. К тому же, в зависимости от ситуации на УДС, время поездки может изменяться существенно. При увеличении длины поездки (расстояния или времени) вероятность ее выбора пассажиром снижается. При этом будем рассматривать относительную длину поездки, которую рассчитываем по кратчайшему варианту для рассматриваемой корреспонденции d_{ij} :

$$l'_s = \frac{l_s}{l_{ij}^{min}}, \quad (2)$$

где l'_s – относительная длина s -й поездки;

l_s – фактическая длина s -й поездки;

l_{ij}^{min} – наименьшая длина поездки для корреспонденции d_{ij}

На рисунке 5 дано полученное из практики (по результатам обработки валидаций электронных проездных билетов общественного транспорта г. Красноярска) распределение спроса по длине поездки, которая рассчитана как отношение текущего к наименьшему расстоянию среди имеющихся вариантов для пассажирской корреспонденции. По критерию Пирсона теоретическая аппроксимация соответствует экспериментальным данным с уровнем доверительной вероятности не ниже 0,95.

Экспериментальные данные для рисунка 5 получены следующим образом: во-первых, в результате обработки валидаций электронных проездных билетов [29,30] рассчитывается множество пассажирских корреспонденций с указанием пункта отправления, пункта назначения и маршрута. Во-вторых, для каждой корреспонденции формируются возможные варианты поездок. В-третьих, в полученном множестве выбирается поездка наименьшей длины, что позволяет определить относительную длину пассажирской корреспонденции.

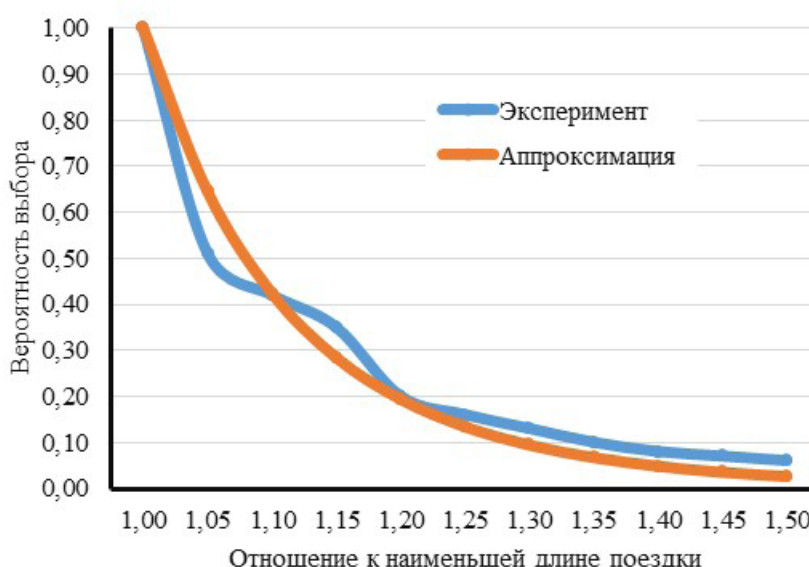


Рисунок 5 – Эмпирическая модель деления спроса по длине поездок
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Empirical model of dividing demand by the length of trips
Source: compiled by the authors.

В результате формируется массив относительных длин фактических пассажирских корреспонденций, представленный на рисунке 5 как эмпирическая модель деления спроса по длине поездок.

Функция распределения вероятности поездки пассажира в зависимости от ее относительной длины имеет следующий вид:

$$\Phi(l') = l'^{-K_l}, \quad (3)$$

где K_l – коэффициент. Для условий общественного транспорта г. Красноярска методом наименьших квадратов получено $K_l=9$.

Вероятность s -й поездки среди имеющихся вариантов для пассажирской корреспонденции d_{ij} определяется следующим образом:

$$p_s^l = \frac{\Phi(l'_s)}{\sum_i \Phi(l'_i)}. \quad (4)$$

Для каждой пассажирской корреспонденции d_{ij} матрицы OD определяются возможные поездки:

$$R_{ij} = \{r_1, r_2, \dots\}. \quad (5)$$

Поездка состоит из одного или нескольких маршрутных сегментов:

$$r_s = \{\varphi_1, \dots, \varphi_n\}, n \geq 1. \quad (6)$$

Пассажирская корреспонденция осуществляется без пересадки, если поездка состоит из одного маршрутного сегмента: $n=1$ в выражении (6). При $n > 1$ пассажир осуществляет $n-1$ пересадку.

Сегмент поездки φ_s описывается посредством кортежа (m, i, j) , где: $\varphi_s.m, \varphi_s.i, \varphi_s.j$ – маршрут, первый и последний остановочный пункт в сегменте соответственно.

Схема возможных вариантов прямых поездок для пассажирской корреспонденции d_{ij} приведена на рисунке 4. В данном примере поездки сформированы между пунктами $i-j$ (начало и завершение корреспонденции), а также пунктами i', i'' (расположенными в пешеходной доступности от начала корреспонденции) и j', j'' (находящимися в пешеходной доступности от ее завершения). Данный подход позволяет учитывать перераспределение пассажиров через остановочные пункты, расположенные в пешеходной доступности, при изменении интенсивности движения по маршрутам.

На рисунке 6 дана схема пассажирских поездок для пассажирской корреспонденции 336 – 1101. На схеме проиллюстрировано 8 поездок, которые начинаются в пунктах 323, 335 и 336, а завершаются в пунктах 290 и 1101.

Поездки с пересадками формируются для пассажирских корреспонденций при отсутствии прямых вариантов. Некоторые пассажиры выполняют поездки с пересадками даже при наличии прямого сообщения.

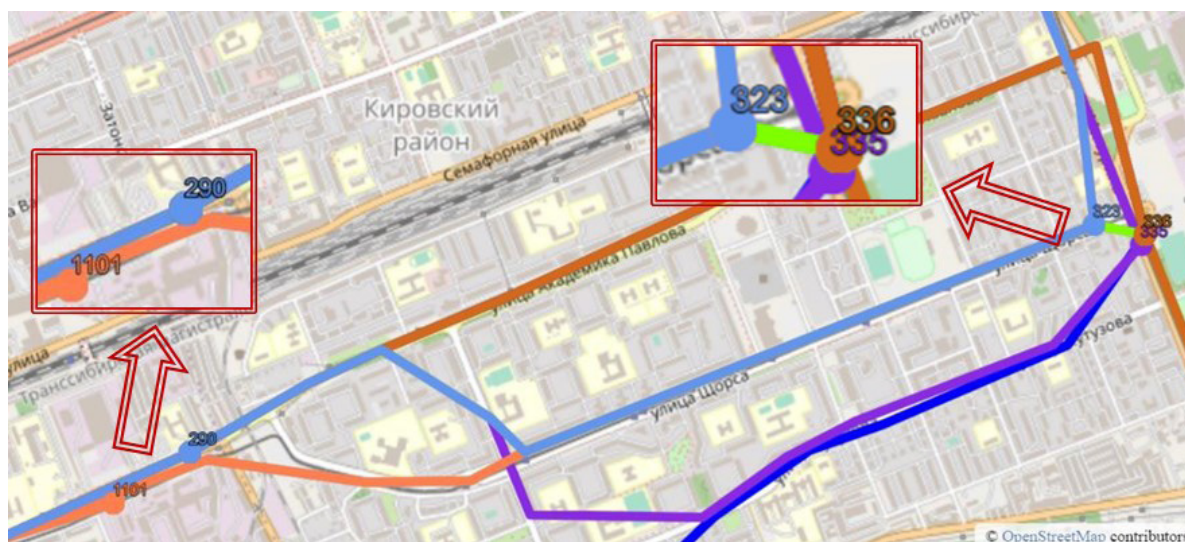


Рисунок 6 – Схема поездок без пересадки, сформированных для корреспонденции между остановочными пунктами 336 – 1101.
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – The scheme of trips without a transfer, formed for correspondence between 336 – 1101 stopping points
Source: compiled by the authors.

По результатам обработки операций валидации электронных билетов. Красноярская удельный вес таких пассажиров составляет 1,2%. При проектировании перевозок данной величиной можно пренебречь, т.е. считаем, что пассажир не пользуется поездками с пересадками при наличии прямого сообщения. В этой же связи будем считать, что при наличии поездок с одной пересадкой пассажир не использует возможные маршруты с двумя пересадками.

Таким образом, будем использовать следующий порядок определения поездок для пассажирских корреспонденций: во-первых, формируются прямые поездки; во-вторых, для неудовлетворенных корреспонденций определяются поездки с одной пересадкой и далее – с двумя пересадками. Как упоминалось выше, более двух пересадок планировать нецелесообразно из-за возможного переключения пассажира на другой вид транспорта (например, легковой автомобиль). Удельный вес необслуженных пассажиров будем использовать в качестве одного из критериев решения задачи.

Рассмотрим процесс определения поездок. Поездка формируется из сегментов маршрутов в соответствии со следующими условиями:

$$l(i, \varphi_1 \cdot i) \leq l_p, \quad (7)$$

$$l(\varphi_n \cdot j, j) \leq l_p, \quad (8)$$

$$l(\varphi_s \cdot j, \varphi_{s+1} \cdot i) \leq l_p, \quad (9)$$

где $l(x, y)$ – евклидово расстояние между остановочными пунктами транспортной сети x, y .

Начальный и конечный пункты поездок находятся на расстоянии пешеходной доступности от начала (7) и завершения (8) пассажирской корреспонденции соответственно. Пункты пересадок (9) расположены в пешеходной доступности друг от друга.

Для пунктов пересадок могут быть установлены дополнительные ограничения, например, в первую очередь поездки с пересадками формируются через транспортно-пересадочные узлы.

В зависимости от пунктов пересадки для каждой комбинации маршрутов будет получено несколько поездок различной длины. В этой связи для каждой комбинации маршрутов выбираются варианты поездок с наименьшим расстоянием с учетом ограничения на возможные пункты пересадок.

На рисунке 7 приведен пример из трех поездок, состоящих из пяти маршрутных сегментов: $r_1 = \{\varphi_1, \varphi_3\}$; $r_2 = \{\varphi_1, \varphi_4\}$; $r_3 = \{\varphi_2, \varphi_5\}$. Из схемы видно, что сегмент может входить в разные поездки для пассажирской корреспонденции.

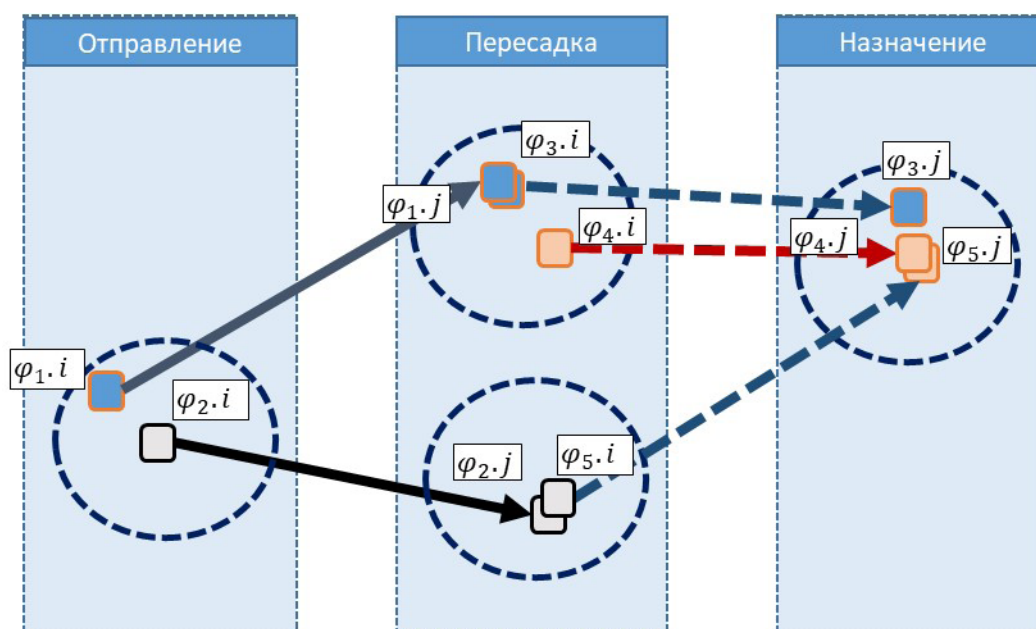


Рисунок 7 – Схема формирования поездок с пересадками для корреспонденции
Источник: составлено авторами.

Figure 7– Formation trips scheme with transfers for correspondence:
Source: compiled by the authors.

Как уже говорилось, пассажир осуществляет посадку в первое подходящее транспортное средство, т.е. вероятность выбора между конкурирующими сегментами поездки пропорциональна интенсивности движения подвижного состава. Очевидно, что, выбирая поездку с пересадкой, пассажир оценивает возможное время ожидания транспорта на каждом из этапов.

Разделим множество сегментов Φ , из которых сформированы все варианты поездок для корреспонденции d_{ij} , на подмножества в соответствии с этапом (звеном) поездки:

$$\Phi = \{\Phi_1, \Phi_2, \dots\}. \quad (10)$$

Вероятность использования x -го сегмента (в соответствии с теоремой Байеса⁸) может быть рассчитана следующим образом:

$$p_x = \frac{\lambda_x p_x^m}{\sum_{\varphi_k \in \Phi_s} \lambda_k p_k^m}, \text{ если } \varphi_x \subset \Phi_s, \quad (11)$$

где λ_x, λ_k – интенсивность движения по маршрутам x -й и k -й поездок соответственно;

$p_x^m \cdot p_k^m$ – вероятность предпочтения пассажиром вида транспорта на x -м и k -м маршрутном сегменте соответственно;

Φ_s – множество сегментов s -го звена (этапа) пассажирской корреспонденции d_{ij} .

Вероятность предпочтения пассажиром вида транспорта можно определить по результатам обследования пассажирских потоков посредством, например, обработки валидаций электронных проездных билетов [29, 30]. Формируется матрица пассажирских корреспонденций, для каждого элемента которой известен вид транспорта перевозок, маршрут и интенсивность движения подвижного состава.

Определим множество пассажирских корреспонденций, начальные и конечные пункты которых находятся в пределах пешеходной доступности от пунктов начала и завершения корреспонденции d_{ij} :

$$H = \{h: l(i, h.i) \leq l_p, l(j, h.j) \leq l_p\}, \quad (12)$$

где: $l(i, h.i), l(j, h.j)$ – евклидово расстояние между начальными и конечными пунктами пассажирских корреспонденций h и d_{ij} .

Множество H подразделим на подмножества по видам транспорта:

$$H = \{H_1, H_2, \dots\}. \quad (13)$$

Вероятность предпочтения пассажиром s -го по отношению к x -му виду транспорта, рассчитанная по пассажирской корреспонденции d_{ij} , равна:

$$p_s^m = \frac{\sum_{h \in H_s} (h.d/h.\lambda)}{\sum_{n=s,x} \sum_{h \in H_n} (h.d/h.\lambda)}, \quad (14)$$

где $h.d$ – количество пассажиров, перевезенных по пассажирской корреспонденции h ;

$h.\lambda$ – интенсивность движения по маршруту пассажирской корреспонденции h .

Таким образом, получаем выборку вероятностей предпочтения пассажирами видов транспорта для всех элементов матрицы D . Из данной выборки можно определить среднюю по сети вероятность предпочтения видов транспорта в альтернативе с другими конкурирующими видами, например, автобус – троллейбус, автобус – трамвай и т.д.

В результате вероятность использования s -й поездки для корреспонденции d_{ij} рассчитывается следующим образом:

$$p_s = \frac{p_s^l \prod_{\varphi_x \in \Phi_s} p_x}{\sum_{\varphi_k \in \Delta} p_k^l \prod_{\varphi_n \in \Phi_k} p_n}, 0 \leq p_s \leq p_x \leq 1, \sum p_x = 1, \quad (15)$$

где вероятность выбора пассажиром s -й поездки с учетом непрямолинейности (см. выражение (4), рисунок 5).

Длина x -го маршрутного сегмента – это расстояние движения по маршруту φ_x между остановочными пунктами $\varphi_x.i$ и $\varphi_x.j$:

$$l_x = l^m(\varphi_x.i, \varphi_x.j, \varphi_x.m). \quad (16)$$

Расстояние между остановочными пунктами $\varphi_x.i$ и $\varphi_x.j$ можно определить как сумму длин перегонов, расположенных в маршруте $\varphi_x.m$ между пунктами $\varphi_x.i$ и $\varphi_x.j$. Время маршрутного сегмента τ_x рассчитывается аналогично как сумма времени прохождения перегонов маршрута между пунктами $\varphi_x.i$ и $\varphi_x.j$.

Распределение пассажиров корреспонденции d_{ij} между поездками рассчитывается:

⁸Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы обработки данных. Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 611 с.

$$Q_s^r = p_s d_{ij}, \quad (17)$$

где Q_s^r – количество пассажиров корреспонденции d_{ij} , отнесенных к поездке r_s .

Число пассажиров сегмента – это сумма пассажиров всех поездок, включающих рассматриваемый сегмент. Таким образом, распределение пассажиров корреспонденции d_{ij} между сегментами

$$Q_x^\varphi = \sum_{\varphi_x \subset r_k} Q_k^r, \quad (18)$$

где Q_x^φ – количество пассажиров корреспонденции d_{ij} , отнесенных к маршрутному сегменту φ_x .

Длина s -й поездки:

$$L_s = \sum_{x=1}^n l_x. \quad (19)$$

Время s -й поездки:

$$T_s = \sum_{x=1}^n \tau_x. \quad (20)$$

Пассажирооборот (транспортная работа) s -й поездки:

$$P_s = Q_s L_s. \quad (21)$$

Расстояние пешего перемещения пассажиров при пересадках в s -й поездке:

$$l'_s = \begin{cases} 0 & \text{для } n = 1 \\ \sum_{x=1}^{n-1} k'_p l(\varphi_x \cdot j, \varphi_{x+1} \cdot i) & \text{для } n > 1, \end{cases} \quad (22)$$

где k'_p – коэффициент непрямолинейности пешеходного движения пассажира;

$l(\varphi_x \cdot j, \varphi_{x+1} \cdot i)$ – евклидово расстояние между пунктом завершения предыдущего маршрутного сегмента и началом следующего.

Рассмотрим вопрос определения времени ожидания транспорта в процессе поездки. Если через остановочный пункт начала сегмента поездки проходит один маршрут, подходящий для корреспонденции d_{ij} , и на маршруте выдерживается постоянный интервал движения, среднее время ожидания пассажира составляет половину интервала между транспортными средствами [31]. Данный интервал является случайной величиной, его

отклонения от среднего значения подчиняются нормальному закону распределения, т.е. среднее время ожидания транспорта:⁹

$$\tau^p = \frac{1 + (\sigma_i \lambda)^2}{2\lambda}, \quad (23)$$

где σ_i – среднеквадратическое отклонение интервала от математического ожидания.

В настоящее время общественный транспорт функционирует под диспетчерским управлением на основе спутниковой системы глобального позиционирования. Одна из задач диспетчерского управления – обеспечение регулярности движения по маршрутам. Таким образом, актуальной задачей является анализ влияния диспетчерского управления на σ_i и выявление факторов, которые обуславливают значения данного параметра.

С другой стороны, наличие нескольких вариантов поездок пассажира с остановочного пункта оказывает соответствующее влияние на среднее время ожидания. При увеличении числа вариантов процесс движения транспортных средств приближается к пуассоновскому, т.е. среднее время ожидания [34]:

$$\bar{\tau}^p = \frac{1}{\lambda^2}, \quad (24)$$

где λ^2 – суммарная интенсивность движения транспортных средств через остановочный пункт.

В большинстве случаев число вариантов сегментов маршрута, подходящих для пассажирской корреспонденции, недостаточно, чтобы считать поток транспортных средств пуассоновским, поэтому в расчетах будем использовать выражение (22), имея в виду, что это наибольшее значение среднего времени ожидания пассажира.

Таким образом, время ожидания транспорта для s -й поездки:

$$\tau_s^p = \sum_{x=1}^n \frac{1 + (\sigma_i \lambda_x)^2}{2\lambda_x}, \quad (25)$$

где λ_x – интенсивность движения транспорта по x -му сегменту, входящему в s -ю поездку.

Время перемещения пассажира от начального до конечного пунктов s -й поездки:

⁹Ефремов И. С., Кобозев В. М., Юдин В. А. Теория городских пассажирских перевозок: учеб. пособие для вузов: Высш. школа, 1980. 535 с.

$$T_s^p = T_s + \tau_s^p + l_s^p / v_p, \quad (26)$$

где v_p – скорость пешего движения пассажира.

Количество перевезенных пассажиров по s -му маршруту рассчитывается как сумма числа пассажиров всех сегментов поездок:

$$Q_s^M = \sum_{M_s=\varphi_{k.M}} Q_k^p. \quad (27)$$

Пассажирооборот определяется аналогично:

$$P_s^M = \sum_{M_s=\varphi_{k.M}} Q_k^p l_k. \quad (28)$$

5. Расчет программы перевозок. Применяя описанный алгоритм ко всем элементам матрицы пассажирских корреспонденций, получаем поездки для каждого элемента матрицы. В результате обеспечивается расчет абсолютных и относительных показателей транспортного предложения.

Математическая модель программы перевозок, которая описывает параметры транспортного предложения и потребные ресурсы.

$$a_k = \lambda_k / t_k^o, \quad (29)$$

$$L_k = l_k^o \lambda_k \bar{T}_k^m; L = \sum_k L_k, \quad (30)$$

$$Q_k = \sum_{d_{ij}} Q_{kd_{ij}}^M; Q = \sum_k Q_k, \quad (31)$$

$$Q' = \sum_s p_s d_{ij}, \quad (32)$$

$$k_r = Q / Q', \quad (33)$$

$$P_k = \sum_{d_{ij}} P_{kd_{ij}}^M; P = \sum_k P_k, \quad (34)$$

$$\gamma_k = P_k / (L_k q_k^n); \quad \gamma = \sum_k P_k / \sum_k (L_k q_k^n), \quad (35)$$

$$S_k = S_k^{km} L_k; S = \sum_k S_k, \quad (36)$$

где λ_k – интенсивность движения по k -му маршруту;

a_k – число транспортных средств на k -м маршруте;

t_k^o – время оборота по k -му маршруту;

L, L_k – пробег транспортных средств общий и по k -му маршруту соответственно;

$\bar{T}_k^m$ – среднее время работы транспортных средств на k -м маршруте;

Q, Q_k – объем перевозок общий и по k -му маршруту соответственно;

$Q_{kd_{ij}}^M$ – количество пассажиров корреспонденции d_{ij} , перевезенных по k -му маршруту;

p_s – вероятность обслуживания пассажиров корреспонденции d_{ij} s -м маршрутным сегментом;

k_r – коэффициент пересадочности;

P, P_k – транспортная работа общая и по k -му маршруту соответственно;

$P_{kd_{ij}}^M$ – транспортная работа корреспонденции d_{ij} по k -му маршруту;

q_k^n – номинальная вместимость транспортного средства, используемого на k -м маршруте;

γ, γ_k – коэффициент динамического использования вместимости общий и на k -м маршруте соответственно;

S_k^{km} – стоимость одного километра пробега транспортного средства, используемого на k -м маршруте;

S, S_k – стоимость программы перевозок суммарная и k -го маршрута соответственно.

6. Решение задач проектирования перевозок в многокритериальной постановке. Как упоминалось выше, при решении задач проектирования перевозок формируемое транспортное предложение оценивается вектором параметров (критериев оптимальности), определяющих эффективность и качество транспортного обслуживания. В существующих рекомендациях [22] данные показатели подразделяются на группы оценок: оператора перевозок, пассажира, использования подвижного состава.

Оценки оператора перевозок обуславливают экономическую эффективность перевозочного процесса. Эти показатели также имеют косвенное значение для пассажиров, например, объем перевозок указывает на удовлетворенность пассажиров обслуживанием.

Оценки пассажира непосредственно отражают качество транспортных услуг, наиболее значимыми из которых являются доступность, комфорт, удобство и безопасность. Для некоторых оценок в HCM 2000 [22] разработа-

ны нормативы, основанные на установлении уровня обслуживания (level of service, LOS).

В руководстве по разработке комплекса оценок эффективности маршрутных перевозок [35] приведены подробные рекомендации по формированию систем показателей эффективности проектов совершенствования транспорта, включающие как традиционные, так и дополнительные параметры, ориентированные на клиента и общественные интересы.

Для задачи в многокритериальной постановке требуется определить оптимальное по Парето решение, при котором ни один частный критерий нельзя улучшить, не ухудшив другие критерии оптимальности¹⁰. Существуют разные способы выбора решения из множества возможных Парето-оптимальных [36], например, теория арбитражных схем, метод целевого программирования и т.д. Часто решение рассматриваемой задачи осуществляется с участием эксперта (или группы экспертов), когда решения принимаются на основе представленной информации¹¹.

На практике решение задач проектирования перевозок подразделяется на следующие этапы¹²:

- дизайн маршрутной сети (network structure design) заключается в выборе принципа формирования маршрутной сети, определении условий их применения, параметров эффективности и качества транспортного обслуживания;

- анализ и в необходимых случаях корректировка существующих маршрутов, при проектировании маршрутов осуществляется определение маршрутов, которые априорно включаются в маршрутную систему;

- формирование множества допустимых маршрутов, отвечающих критериям качества, эффективности и принципам дизайна;

- расчет оптимальной программы перевозок посредством эвристической процедуры направленного перебора вариантов, которые формируются путем варьирования распределения транспортных ресурсов между маршрутами;

- экспертный анализ полученного на предыдущем этапе решения задачи, разработка и оценка возможных направлений совершенствования проекта перевозок по предложениям экспертов, которые обеспечивают учет трудно формализуемых факторов, таких, например, как расположение социальных объектов.

7. Практическая реализация

Для реализации описанной методики РАР разработано программное обеспечение с применением реляционной СУБД MS SQL Server.

Оценка эффективности данной методики выполнена с использованием пассажирских корреспонденций среднего буднего дня октября месяца 2019 года, полученных в результате обработки валидаций электронных проездных билетов [29, 30]. Фрагмент матрицы пассажирских корреспонденций дан в таблице 1.

Из системы диспетчерского управления общественным транспортом г. Красноярска (МКУ «Красноярскгортранс») в формате СУБД MS SQL Server получена следующая информация:

- список остановочных пунктов (таблица 2);
- описание маршрутной сети (таблица 3);
- список подвижного состава (таблица 4).

На рисунке 8 приведен интерфейс разработанной программы, которая осуществляет:

- варьирование распределения транспортных ресурсов между допустимыми маршрутами на транспортной сети в соответствии с определенным алгоритмом;

- решение задачи РАР (формирование поездов для заданных пассажирских корреспонденций);

- расчет программы перевозок (параметров транспортного предложения).

В левой области интерфейса дано описание имеющихся маршрутов, в правой – результаты расчета. Для каждого маршрута и транспортного предложения в целом определяются показатели (28) – (35).

Полученные результаты представляются в табличном (см. рисунок 8) и графическом (рисунки 9, 10) виде.

¹⁰ Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Дрофа, 2006. 175 с.

¹¹ Jürgen Branke, Kalyanmoy Deb, Kaisa Miettinen та Roman Slowinski. Multiobjective Optimization: Interactive and Evolutionary Approaches (Lecture Notes in Computer Science) (англ.). Springer. ISBN 3-540-88907-8.

¹² Фадеев А. И. Методология проектирования перевозок и управления наземным пассажирским транспортом общего пользования: диссертация ... доктора технических наук: 05.22.10. Иркутск, 2021.

Таблица 1

Матрица пассажирских корреспонденций (фрагмент),
где Id – идентификатор, IdB – пункт начала, IdE – пункт завершения,
NbPs – число пассажиров, PsKm – пассажиро-километры,
Lmid – средняя дальность поездки
Источник: составлено авторами.

Table 1

The matrix of passenger correspondence (fragment),
where: Id – identifier, IdB – starting point, IdE – ending point,
NBPs – number of passengers, PsKm – passenger-kilometers,
Lmid – average distance of the trip
Source: compiled by the authors.

Id	IdB	IdE	NbPs	PsKm	Lmid
218635	119	9	9,02	19,61	2,17
218636	203	1808	0,20	4,29	21,20
218637	359	416	3,14	16,91	5,39
218638	418	922	0,65	13,88	21,41
218639	336	1101	0,88	3,62	4,11
218640	233	742	5,49	57,95	10,56
218641	46	196	3,33	39,86	11,96
218642	441	214	2,53	56,74	22,42
218643	663	605	1,25	4,57	3,67
218644	526	557	1,69	17,28	10,23
218645	930	775	10,64	112,51	10,58
218646	284	22	1,21	6,76	5,59
218647	23	689	0,32	5,11	15,76
218648	258	400	2,86	35,50	12,40
218649	912	782	3,00	10,86	3,62
218650	999	71	8,98	87,89	9,79
218651	956	397	0,95	21,57	22,73

Таблица 2

Фрагмент списка остановочных пунктов,
где RegNum – идентификатор; Title – наименование;
Latitude, Longitude – координаты (широта и долгота)
Источник: составлено авторами.

Table 2

A fragment of the stopping points list,
where RegNum– identifier; Title – name;
Latitude, Longitude – coordinates (latitude and longitude)
Source: compiled by the authors.

RegNum	Title	Latitude	Longitude
2	о. Отдыха	55,996706756426	92,878745656452
3	Агентство Аэрофлота	55,990233384589	92,886525522886
4	Детская поликлиника (ул. Гладкова)	55,988051346560	92,879488525104
5	Детская поликлиника (ул. Гладкова)	55,987765680551	92,878699955653
6	ул. Соколовская	56,113535868224	92,907548557959
7	ул. 2-я Брянская	56,041203799646	92,859010984464
8	ул. Матросова	55,987065695913	92,886848674279
9	ул. Матросова	55,987321296562	92,887320743065
10	Предмостная площадь	55,991779660585	92,887796098675
11	Студенческая (ул. Семафорная)	55,983906787650	92,878906828619

Таблица 3
Описание маршрутной сети (фрагмент),
где Nb – номер маршрута; Dir – направление движения (А – прямое, В – обратное);
NbRec – номер по порядку; Id – идентификатор остановки;
L – длина перегона; Lsum – расстояние от начала маршрута
Источник: составлено авторами.

Table 3
Description of the route network (fragment),
where: Nb – route number; Dir – direction of movement (A – forward, B – reverse);
NbRec– number in order; Id – stop ID;
L – length of the stretch; Lsum–distance from the beginning of the route
Source: compiled by the authors.

Nb	Dir	NbRec	Id	L	Lsum
4тр	A	2	213	0,42	0,42
4тр	A	3	211	0,44	0,86
4тр	A	4	209	0,28	1,14
4тр	A	5	207	0,64	1,79
4тр	A	6	205	0,46	2,24
4тр	A	7	203	0,52	2,76
4тр	A	8	201	0,54	3,30
4тр	A	9	199	0,56	3,86

Таблица 4
Список подвижного состава (фрагмент),
где StateNumb – регистрационный номер; Region – номер региона;
TransportType – тип транспорта; Model – модель; CapacityPerson – вместимость
Источник: составлено авторами.

Table 4
Road transport vehicles (fragment), where: StateNumb – registration number; Region – region nuber;
Transport Type – type of transport; Model – model; Capacity Person – availability
Source: compiled by the authors.

StateNumb	Region	TransportType	Model	Capacity-Person
К 129 ОР	124	Автобус	МАЗ 103	96
В 479 ОН	124	Автобус	НефАЗ	114
К 137 ОР	124	Автобус	МАЗ 206	72
А 822 МР	124	Автобус	МАЗ 103	96
К 412 ОР	124	Автобус	ПАЗ 320435 NEXT	70
К 431 ОР	124	Автобус	ПАЗ 320435 NEXT	70

Расчет оптимальной программы перевозок (лаборатория транспортного моделирования СВУ)

Маршруты										Результаты														
Nb	Vc	CIA	TmRt	a	NmTsp	La	Lb			Nb	AcL	a	NbPs	PsKm	L	PicKm	Kv	Ps_Km	Anb	NbPsTf	PsKmTf	Ltr	Ttr	NbTr
10	18,0	1	10	4	Автобус	22,7	22,8			10	1	4	9049,2	42235,2	793,9	79392,6	0,53	11,40	5,3	0,0	0,0	45,5	3,0	17,44
11	18,0	1	10	4	Автобус	10,3	10,3			11	1	4	5793,1	24953,7	1217,6	121758,7	0,20	4,76	9,7	0,0	0,0	20,7	1,6	58,95
11r	20,0	5	10	4	Троллейбус	0,0	0,0			12	1	4	12991,7	86038,9	946,7	94669,1	0,91	13,72	5,1	0,0	0,0	57,7	3,1	16,41
12	22,0	1	10	4	Автобус	28,8	28,9			13r	5	4	5362,4	18348,6	333,1	37971,8	0,48	16,10	2,8	0,0	0,0	16,9	1,4	19,67
12a	18,0	2	10	4	Автобус	0,0	0,0			14	2	4	7077,2	26916,5	976,5	73240,7	0,37	7,25	6,9	0,0	0,0	32,6	2,3	29,96
13	18,0	1	10	5	Автобус	0,0	0,0			18	1	4	2158,7	7307,9	973,1	97307,0	0,08	2,22	6,9	0,0	0,0	32,9	2,3	29,93
13r	14,4	5	10	4	Троллейбус	16,9	0,0			18c	1	4	3369,5	13345,2	934,3	93426,1	0,14	3,61	6,5	0,0	0,0	35,2	2,5	26,55
14	18,0	2	10	4	Троллейбус	16,5	16,1			19	1	4	15544,1	93369,9	709,2	70922,3	1,32	21,92	4,6	0,7	0,6	53,6	3,5	13,24
										2	1	5	24880,5	166474,6	902,0	90204,8	1,85	27,58	5,9	0,0	0,0	52,3	3,4	17,25
										20	4	4	12582,6	74158,6	728,3	30587,7	2,42	17,28	4,8	0,0	0,0	51,6	3,4	14,11
										22	3	4	1447,7	4278,3	1132,7	56635,5	0,08	1,28	8,6	0,0	0,0	24,5	1,9	46,32
										23	1	4	17913,1	158458,6	639,1	63912,6	2,48	28,03	4,1	0,0	0,0	61,8	3,9	10,34
										26	1	4	6096,2	24874,2	961,7	96166,5	0,26	6,34	6,8	0,0	0,0	33,5	2,4	28,72
										27	3	4	5476,9	33972,5	882,5	44123,4	0,77	6,21	6,0	0,0	0,0	38,6	2,6	22,83
										3	2	5	17145,6	94898,2	877,9	65844,9	1,44	19,53	5,7	0,9	0,7	54,3	3,5	16,16
										31	1	4	3850,5	25265,1	851,5	85151,9	0,30	4,52	5,8	0,0	0,0	40,9	2,8	20,82
										32	1	4	7774,5	33727,0	927,0	92704,3	0,36	8,39	6,5	0,0	0,0	35,7	2,5	26,03
										36	3	4	5929,1	26235,4	1121,8	56088,8	0,47	5,29	8,5	0,0	0,0	25,0	1,9	44,98
										37	1	5	8067,3	41173,4	1164,1	116408,4	0,35	6,93	8,1	0,8	0,6	35,4	2,5	32,96
										38	4	4	13887,2	54844,5	983,6	41310,2	1,33	14,12	7,0	0,0	0,0	32,2	2,3	30,56
										40	1	4	2587,1	8801,1	1186,9	118686,2	0,07	2,18	8,5	0,0	0,0	26,2	1,9	45,26
										40a	1	4	3091,0	11570,2	1078,2	107823,4	0,11	2,87	8,0	0,0	0,0	27,1	2,0	39,80
										40c	1	4	6965,0	26947,4	892,6	89263,7	0,30	7,80	6,1	0,0	0,0	38,0	2,6	23,57
										43	1	4	19600,7	145877,7	749,1	74905,8	1,95	26,17	4,9	0,0	0,0	49,6	3,3	15,11

Nb	Dir	AcL	a	NbPs	PsKm	L	PicKm	Kv	Ps_Km	Anb	Ps_KmA	NbPsTf	PsKmTf	Ltr	Ttr	NbTr
10	A	1	4	4333,4	20362,6	397,4	39742,9	0,51	10,90	2,6	3,50	0,0	0,0	22,7	1,5	8655
10	B	1	4	4715,9	21872,6	396,5	39649,6	0,55	11,89	2,6	3,50	0,0	0,0	22,8	1,5	6584

Рисунок 8 – Интерфейс программы расчета параметров транспортного предложения
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Interface of the program for calculating the parameters of the transport offer
Source: compiled by the authors.

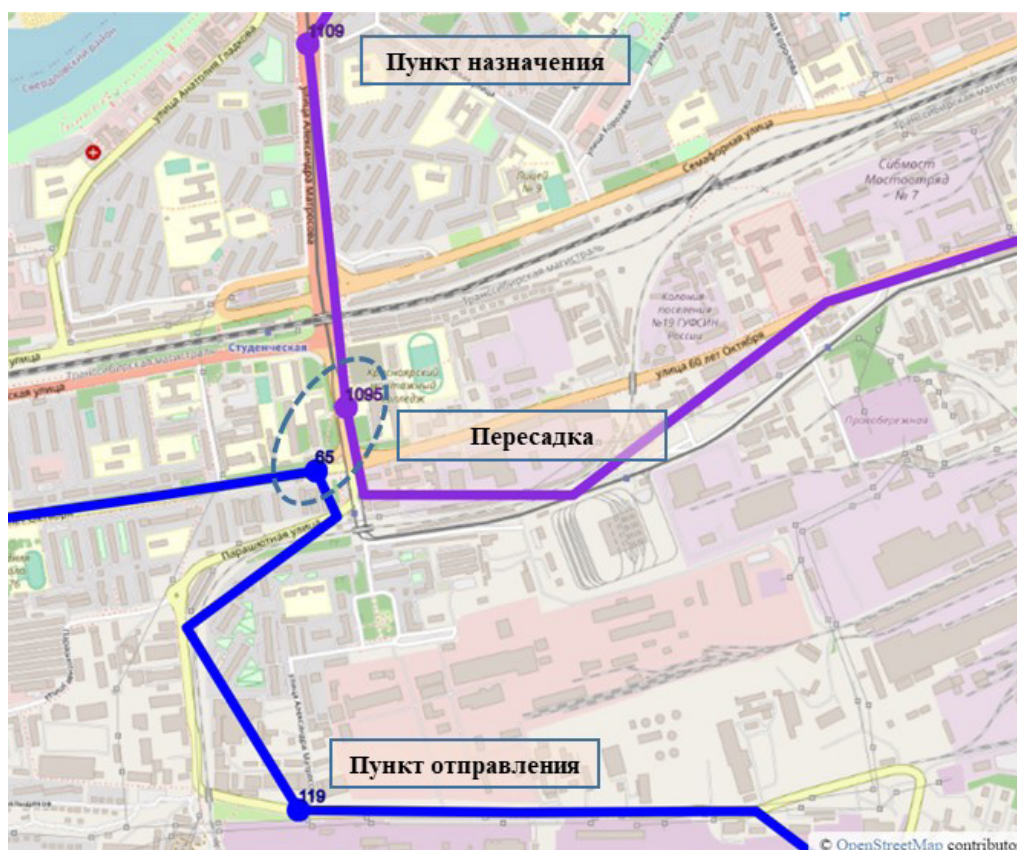


Рисунок 9 – Схема поездки для корреспонденции
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Trip scheme for correspondence
Source: compiled by the authors.

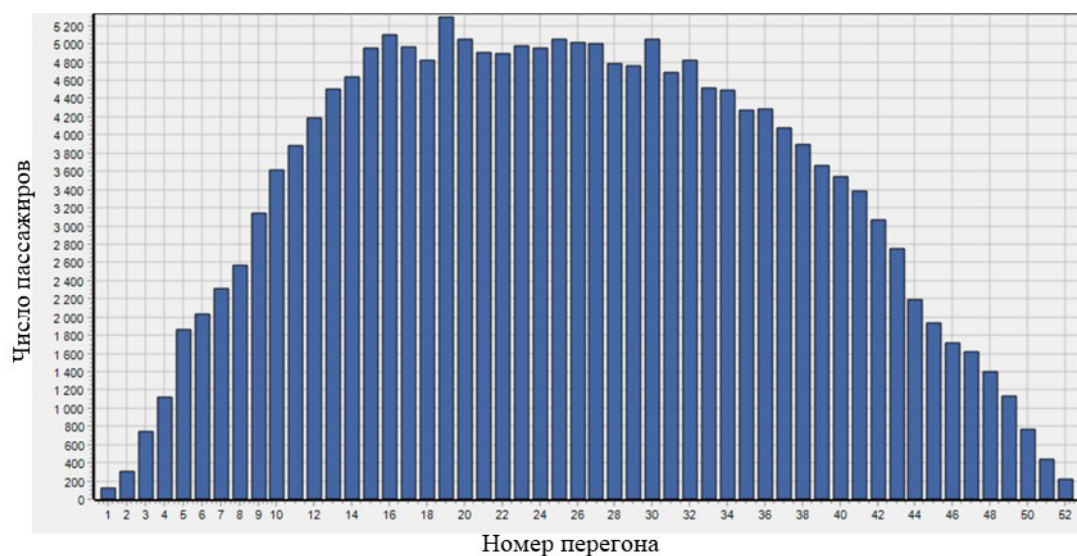


Рисунок 10 – Эпюра расчетных пассажирских потоков по маршруту
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Plot of estimated passenger flows along the route
Source: compiled by the authors.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Процесс планирования общественного транспорта подразделяется на ряд задач стратегического, тактического и оперативного уровней, к которым относятся [1] разработка системы маршрутов, установление интенсивности движения по маршрутам, проектирование структуры парка подвижного состава, распределение имеющегося парка по маршрутам, определение требуемого объема субсидирования и др.

2. На основании разработанной многокритериальной математической модели задачи проектирования перевозок решаются путем распределения ограниченных или неограниченных транспортных ресурсов между допустимыми маршрутами транспортной сети в соответствии с множеством критериев эффективности, на которые могут быть наложены данные ограничения.

3. Формирование допустимых маршрутов на транспортной сети может быть осуществлено посредством алгоритмов, разработанных в рамках решения задач TNDP и TNDPSP [2], а также с привлечением экспертов.

4. Транспортный спрос задается матрицей пассажирских корреспонденций, сформированной за весь период движения транспорта в будний день, в которой учтены все пассажирские потоки по маршрутной сети, а не только периоды наибольшей интенсивности перевозок.

5. Расчет параметров транспортного предложения в процессе решения задач проектирования перевозок осуществляется по результатам распределения пассажирских корреспонденций по маршрутной сети (РАР), что является сложной нерешенной до настоящего времени проблемой [2]. Изложенная в статье методика РАР основана на моделировании стратегии пассажира, учитывающей время ожидания транспорта, непрямолинейность маршрута посредством эмпирической модели деления спроса по длине поездок, предпочтения пассажиров видов транспорта, возможное перераспределение пассажирских потоков между остановочными пунктами сети, расположенными в пределах пешеходной доступности.

6. Разработанная математическая модель программы перевозок описывает параметры эффективности и качества транспортного предложения, а также необходимые материальные и финансовые ресурсы.

7. Практическая реализация описанной методики РАР осуществлена посредством разработанного программного обеспечения с применением реляционной СУБД. Транспортный спрос описан матрицей пассажирских корреспонденций среднего буднего дня октября месяца 2019 года, полученных в результате обработки валидаций электронных проездных билетов городского пассажирского транспорта г. Красноярска. Показана эффективность раз-

работанной методики РАР для решения задач проектирования перевозок общественным транспортом.

8. Направления дальнейших исследований:

- анализ эффективности существующих методов формирования множества допустимых маршрутов при решении задачи проектирования маршрутной сети общественного транспорта;
- анализ факторов выбора пассажирами видов транспорта;
- формальное описание задач проектирования перевозок общественным транспортом (критериев оптимальности и ограничений);
- разработка, оценка эффективности алгоритмов решения данных задач.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ceder A. Bus network design / A. Ceder, N. H. M. Wilson // *Transp. Res. Part B: Methodol.* 1986. Vol. 20, Iss. 4. P. 331 - 344. URL: DOI: 10.1016/0191-2615(86)90047-0.
2. Durán-Micco, J. A survey on the transit network design and frequency setting problem / J. Durán-Micco, P. Vansteenwegen // *Public Transport.* 2022. Vol. 14, Iss. 1. P. 155 - 190. URL: DOI: 10.1007/s12469-021-00284-y.
3. Guihaire V. Transit network design and scheduling: A global review / V. Guihaire, J-K. Hao // *Transp. Res. Part A: Policy Pract.* 2008. Vol. 42, Iss. 10. P. 1251–1273. URL: DOI: 10.1016/j.tra.2008.03.011.
4. Desaulniers G. Public transit / G. Desaulniers, M. Hickman // *Hand-books in Operation Research and Management Science: Transportation.* 2007. Vol. 14. P. 69–120.
5. Transit Capacity and Quality of Service Manual // TCRP Web Document 6 (Project A-15) Contractor's Final Report, 1999. P. 62.
6. Van Nes R. Design of multimodal transport networks, a hierarchical approach / R. Van Nes // TRAIL Thesis Series T2002/5, DUP, Delft University, the Netherlands, 2002.
7. A review of urban transportation network design problems / R. Z. Farahani, E. Miandoabchi, W. Y. Szeto, H. Rashidi // *European Journal of Operational Research.* 2013. Vol. 229, Iss. 2. P. 81- 302. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.01.001>.
8. López-Ramos F. Integrating network design and frequency setting in public transportation networks: a survey / F. López-Ramos // *SORT.* 2014. Vol. 38, Iss. 2. P. 181–214.
9. Liu Y. Transit users' route-choice modelling in transit assignment: a review / Y. Liu, J. Bunker, L. Ferreira // *Transp. Res.* 2010. Vol. 30. P. 753–769. URL: DOI: 10.1080/01441641003744261.
10. Modelling public transport route choice, with multiple access and egress modes / T. Brands, E. de Romph, T. Veitch, J. Cook // *Transport Res Proc.* 2014. Vol. 1. P. 12–23 (моделирование мультимодальной сети).
11. Самойлов Д. С. Принципы построения и координации маршрутов городского пассажирского транспорта. М.: ОНТИ АКХ им. К. Д. Памфилова, 1981. 74 с.
12. Бурлуцкий А. А. Анализ опыта формирования оптимальных маршрутных схем городского пассажирского транспорта // *Вестник ТГАСУ.* 2013. № 2. С. 371–380.
13. Мартынова Ю. А. Анализ опыта проектирования рациональных маршрутных сетей городского пассажирского транспорта // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. № 2 (21). С. 1–10.
14. Мочалин С. М., Колебер Ю. А. Перспективы развития методов оптимизации маршрутных сетей городского пассажирского транспорта // *Вестник СибАДИ.* 2019. Т. 16, № 3. С. 241–255. URL: DOI: 10.26518/2071-7296-2019-3-241-255.
15. Бронштейн Л. А., Ларионов В. С., Нелидов И. А. Организация движения городского пассажирского транспорта // Труды НИИАТ Моссовета. М. Л.: Изд-во НКХ РСФСР, 1940. 252 с.
16. Яворский В. В., Баймульдин М. К., Аксенов С. Ш. Модель анализа обслуживания и проектирования сети маршрутов городского пассажирского транспорта // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* 2015. № 2. Ч. 2. С. 208–213.
17. Jánošíková, L. Design of urban public transport lines as a multiple criteria optimisation problem / L. Jánošíková, M. Blatoň, D. Teichmann // *WIT Transactions on The Built Environment. WITPress,* 2010. Vol. 111. URL: DOI: 10.2495/UT100131.
18. Хрущев М. В. Методы общей и локальной маршрутизации автобусного транспорта в городах: монография. М.: ГУУ, 1999. 168 с.
19. A traffic analysis zone definition: a new methodology and algorithm / L. M. Martinez, J. M. Viegas, E. A. Silva // *Transportation.* 2009. Vol. 36. P. 581–599.
20. Murray A. T. A coverage model for improving public transit system accessibility and expanding access / A. T. Murray // *Annals of Operations Research.* 2003. Vol. 123. P. 143–156.
21. Яценко С. А. Анализ методик расчета потребности автобусов для городских маршрутов // *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2016. № 5. С. 196–202.
22. Highway Capacity Manual 2000. Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D. C., USA, 2000. 1134 p.
23. A multi-objective optimization and hybrid heuristic approach for urban bus route network design / C. Wang, Z. Ye, W. Wang // *IEEE Access.* 2020. Vol. 8. P. 12154 - 12167. URL: DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2966008.
24. Designing a large-scale public transport network using agent-based microsimulation / P. Manser, H. Becker, S. Hörl, K. W. Axhausen // *Transp Res Part A: Policy. Pract.* 2020. 137. P. 1–15. URL: DOI: 10.1016/j.tra.2020.04.011.
25. A particle swarm optimization algorithm for the solution of the transit network design problem / E. Cipriani, G. Fusco, S. M. Patella, M. Petrelli // *Smart Cities.* 2020. Vol. 3, Iss. 2. P. 541–555.

26. Optimising bus routes with fixed terminal nodes: comparing hyper-heuristics with NSGAII on realistic transportation networks / L. Ahmed, P. Heyken-Soares, C. Mumford, Y. Mao // In: Proceedings of the genetic and evolutionary computation conference / Association for computing machinery. Prague, Czech Republic, 2019. P. 1102–1110.

27. Multi-objective rapid transit network design with modal competition: the case of Concepción, Chile / G. Gutiérrez-Jarpa, G. Laporte, V. Marianov, L. Moccia // *Comput Oper Res.* 2017. Vol. 78, Iss. 6. P. 27 - 43. URL: DOI: 10.1016/j.cor.2016.08.009.

28. Nielsen, G. Network design for public transport success—theory and examples / G. Nielsen, T. Lange. Norwegian Ministry of Transport and Communications, Oslo, 2008. 30 p.

29. Фадеев А. И., Алхуссейни С. Методика определения корреспонденций пассажиров общественного транспортом из операций валидации электронных проездных билетов // *Вестник СибАДИ.* 2022. Т. 19, № 3. С. 370–397. URL: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-370-397>.

30. Fadeev A. I. Passenger trips analysis determined by processing validation data of the electronic tickets in public transport / A. I. Fadeev, S. Alhusseini // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1061 012001. 2021. P. 9.

31. Ortuzar, J. D. Modelling transport / J. D. Ortuzar, L. G. Willumsen. — John Wiley & Sons, 2011. 586 p. URL: DOI:10.1002/9781119993308.

32. A review of urban transportation network design problems / R. Z. Farahani, E. Miandoabchi, W. Y. Szeto, H. Rashidi // *Eur. J Oper. Res.* 2013. Vol. 229. P. 281 - 302. URL: DOI: 10.1016/j.ejor.2013.01.001.

33. Spiess, H. Optimal strategies: A new assignment model for transit networks / H. Spiess, M. Florian // *Transp. Res Part B: Methodol.* 1989. Vol. 23, Iss. 2. P. 83 - 102. URL: DOI: 10.1016/0191-2615(89) 90034-9.

34. Корягин М. Е. Равновесные модели системы городского пассажирского транспорта в условиях конфликта интересов. Новосибирск: Наука, 2011. 140 с.

35. TCRP Report 88: A Guidebook for Developing a Transit Performance-Measurement System. Kittelson & Associates, Inc. et al, 2003.

36. Mauttone, A. A multi-objective metaheuristic approach for the transit network design problem / A. Mauttone, M. E. Urquhart // *Public Transp.* 2009. Vol. 1. P. 253 - 273. URL: <https://doi.org/10.1007/s12469-010-0016-7>.

REFERENCES

1. Ceder A. Bus network design / A. Ceder, N. H. M. Wilson. *Transp. Res. Part B: Methodol.* 1986. Vol. 20, Iss. 4. P. 331–344. URL: DOI: 10.1016/0191-2615(86)90047-0.

2. Durán-Micco, J. A survey on the transit network design and frequency setting problem / J. Durán-Micco, P. Vansteenwegen. *Public Transport.* 2022. Vol. 14, Iss. 1. P. 155 - 190. URL: DOI: 10.1007/s12469-021-00284-y.

3. Guihaire V. Transit network design and scheduling: A global review / V. Guihaire, J.-K. Hao. *Transp. Res. Part A: Policy Pract.* 2008. Vol. 42, Iss. 10. P. 1251–1273. URL: DOI: 10.1016/j.tra.2008.03.011.

4. Desaulniers G. Public transit / G. Desaulniers, M. Hickman. *Hand-books in Operation Research and Management Science: Transportation.* 2007. Vol. 14. P. 69 – 120.

5. Transit Capacity and Quality of Service Manual. *TCRP Web Document 6 (Project A-15) Contractor's Final Report*, 1999. P. 62.

6. Van Nes R. Design of multimodal transport networks, a hierarchical approach. *TRAIL Thesis Series T2002/5*, DUP, Delft University, the Netherlands, 2002.

7. 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. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.01.001>.

8. López-Ramos, F. Integrating network design and frequency setting in public transportation networks: a survey. *SORT.* 2014. Vol. 38, Iss. 2. P. 181–214.

9. Liu Y., Bunker J., Ferreira L. Transit users' route-choice modelling in transit assignment: a review. *Transp. Rev.* 2010. Vol. 30. P. 753–769. URL: DOI: 10.1080/014416410037442 61.

10. Modelling public transport route choice, with multiple access and egress modes. T. Brands, E. de Romph, T. Veitch, J. Cook. *Transport Res Proc.* 2014. Vol. 1. P. 12–23 (modeling of a multimodal network).

11. Samojlov D. S. Principy postroeniya i koordinacii marshrutov gorodskogo passazhirskogo transporta [Principles of construction and coordination of routes of urban passenger transport]. Moscow, ONTI AKH im. K. D. Pamfilova, 1981: 74. (In Russ.)

12. Burluckij A. A. Analiz opyta formirovaniya optimal'nyh marshrutnyh shem gorodskogo passazhirskogo transporta [Analysis of the experience of forming optimal route schemes of urban passenger transport]. *Vestnik TGASU.* 2013; 2: 371 – 380. (In Russ.)

13. Martynova Ju. A. Analiz opyta proektirovaniya racional'nyh marshrutnyh setej gorodskogo passazhirskogo transporta [Analysis of the experience of designing rational route networks of urban passenger transport]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie».* 2014; 2 (21): 1 – 10. (In Russ.)

14. Mochalin S.M., Koleber J.A. Urban passenger transport road networks: prospects of methods' optimization. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2019; 16 (3): 241 - 255. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-241-255>

15. Bronshtejn L. A., Larionov V. S., Nelidov I. A. Organizacija dvizheniya gorodskogo passazhirskogo transporta [Organization of urban passenger transport]. *Trudy NIIT Mossovet.* Moscow - L.: Izd-vo NKKH RSFSR, 1940: 252. (In Russ.)

16. Javorskij V. V., Bajmul'din M. K., Aksenov S. Sh. Model' analiza obsluzhivaniya i proektirovaniya seti marshrutov gorodskogo passazhirskogo transporta [Model of service analysis and design of urban passenger transport route network]. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij.* 2015; 2. Ch. 2: 208–213. (In Russ.)

17. Jánošíková, L., Blatoň M., Teichmann D. Design of urban public transport lines as a multiple criteria optimisation problem. *WIT Transactions on The Built Environment.* WIT Press, 2010; Vol. 111. URL: DOI: 10.2495/UT100131.

18. Hrushhev M. V. Metody obshhej i lokal'noj marshrutizacii avtobusnogo transporta v gorodah: mono-grafija [Methods of general and local routing of bus transport in cities: monograph]. Moscow, GUU, 1999:168. (In Russ.)

19. Martinez L. M., Viegas J. M., Silva E. A. A traffic analysis zone definition: a new methodology and algorithm. *Transportation*. 2009; Vol. 36: 581 – 599.

20. Murray A. T. A coverage model for improving public transit system accessibility and expanding access. *Annals of Operations Research*. 2003; Vol. 123: 143 – 156.

21. Jacenko S. A. Analiz metodik rascheta potrebnosti avtobusov dlja gorodskih marshrutov [Analysis of methods for calculating the needs of buses for urban routes]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnickeskogo universiteta*. 2016; 5: 196 – 202. (In Russ.)

22. Highway Capacity Manual 2000. *Transportation Research Board, National Research Council*. Washington, D. C., USA, 2000. 1134 p.

23. A multi-objective optimization and hybrid heuristic approach for urban bus route network design / C. Wang, Z. Ye, W. Wang. *IEEE Access*. 2020; Vol. 8: 12154 – 12167. URL: DOI: 10.1109/ACCESS.2020.29660 08.

24. 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*. 2020; Pract. 137: 1 – 15. URL: DOI: 10.1016/j.tra.2020.04.011.

25. Cipriani E., Fusco G., Patella S. M., Petrelli M. A particle swarm optimization algorithm for the solution of the transit network design problem. *Smart Cities*. 2020; Vol. 3, Iss. 2: 541 – 555.

26. Ahmed L., Heyken-Soares P., Mumford C., Mao Y. Optimising bus routes with fixed terminal nodes: comparing hyper-heuristics with NSGAII on realistic transportation networks. In: Proceedings of the genetic and evolutionary computation conference. *Association for computing machinery*. Prague, Czech Republic, 2019. P. 1102–1110.

27. Gutiérrez-Jarpa G., Laporte G., Marianov V., Moccia L. Multi-objective rapid transit network design with modal competition: the case of Concepción, Chile. *Comput Oper Res*. 2017; Vol. 78, Iss. 6: P. 27–43. URL: DOI: 10.1016/j.cor.2016.08.009.

28. Nielsen G., Lange T. Network design for public transport success—theory and examples. *Norwegian Ministry of Transport and Communications*, Oslo, 2008. 30 p.

29. Fadeev A.I., Alhusseini S. Methodology for determining passengers correspondence by public transport from electronic tickets validation operations. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (3): 370-397. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-370-397>

30. Fadeev A. I., Alhusseini S. Passenger trips analysis determined by processing validation data of the electronic tickets in public transport. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1061 012001. 2021. P. 9.

31. Ortuzar J. D., Willumsen L. G. Modelling transport. John Wiley & Sons, 2011: 586. URL: DOI:10.1002/9781119993308.

32. Farahani R. Z., Miandoabchi E., Szeto W. Y., Rashidi H. A review of urban transportation network

design problems. *Eur. J Oper. Res*. 2013; Vol. 229: 281–302. URL: DOI: 10.1016/j.ejor.2013.01.001.

33. Spiess H., Florian M. Optimal strategies: A new assignment model for transit networks. *Transp. Res Part B: Methodol.* 1989. Vol. 23, Iss. 2. P. 83 – 102. URL: DOI: 10.1016/0191-2615(89) 90034-9.

34. Korjagin M. E. Ravnovesnye modeli sistemy gorodskogo passazhirskogo transporta v uslovijah konflikta interesov [Equilibrium models of the urban passenger transport system in conditions of conflict of interests]. Novosibirsk: Nauka, 2011:140. (In Russ.)

35. TCRP Report 88: A Guidebook for Developing a Transit Performance-Measurement System. Kittelson& Associates, Inc. et al, 2003.

36. Mauttone A., Urquhart M. E. A multi-objective metaheuristic approach for the transit network design problem. *Public Transp*. 2009; Vol. 1: 253–273. URL: <https://doi.org/10.1007/s12469-010-0016-7>.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Фадеев А. И. Постановка задачи, разработка многокритериальной математической модели проектирования перевозок городским общественным транспортом, методики распределения пассажирских корреспонденций по маршрутной сети, математической модели программы перевозок, программного обеспечения, формулирование заключения.

Ильянков А. М. Участие в подготовке исходных данных и расчетах, обзор литературных источников.

Укадеров В. В. Анализ состояния вопроса, обзор литературных источников, участие в подготовке исходных данных и расчетах.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Aleksandr I. Fadeyev . Problem statement, a multi-criteria mathematical model for the design of urban public transport, methods of distribution of passenger correspondence on the route network, a mathematical model of the transportation program, software development, conclusion statement.

Aleksei M. Ilyankov. Initial data and calculations preparation, literary sources review.

Vitalii V. Ukaderov. Issue status analysis, literary sources review, initial data and calculations preparation.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фадеев Александр Иванович – д-р техн. наук, проф. кафедры транспорта, SPIN-код: 1304-7849.

Ильянков Алексей Михайлович – аспирант кафедры транспорта.

Укадеров Виталий Владимирович – аспирант кафедры транспорта.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr I. Fadeev – Dr of Sci., Professor of the Transport Department, SPIN-код: 1304-7849.

Aleksei M. Ilyankov – Postgraduate student of the Transport Department.

Vitaliy V. Ukaderov – Postgraduate student of the Transport Department.

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Научная статья

УДК 69.05

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-388-395>

EDN: SNFQZU



ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА В ИРАКЕ

О. А. Побегайлов^{1*}, Аль-Мсари Ахмед Абдул Руда Ауда²

¹Донской государственный технический университет
г. Ростов-на-Дону, Россия

²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербурга, Россия

orobegaylov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2950-7310>
ahmed4_33@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8354-9661>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Капитальное строительство зданий и сооружений в Ираке – одно из важнейших направлений производственной деятельности, основа развития всех секторов хозяйства страны. Современный строительный комплекс Ирака постоянно развивается и совершенствуется, внедряются современные строительные материалы, технологии, методы организации и управления строительством, дающее возможность реализовывать строительные проекты практически неограниченной сложности. Однако в современных условиях, сформировавшихся в Республике Ирак с конца XX века по настоящее время, особой проблемой стала необходимость полного и своевременного обеспечения строительства всеми видами ресурсов, что, в условиях строительного рынка Ирака, является нерешенной научно-практической задачей, ввиду высокого влияния негативных факторов различного характера, снижая тем самым организационно-технологическую надежность строительства зданий.

Материалы и методы. Для решения этой проблемы мы предложили 7 этапов разработки системы показателей устойчивого развития инфраструктуры ресурсообеспечения, которая позволит повысить организационно-технологическую надежность строительства в Ираке. Кроме того, была разработана модель расчета обобщенных критериев организационно-технологической надежности строительства. Для определения значимости показателей организационно-технологической надежности предлагается использовать метод экспертной оценки.

Результаты. Разработана система показателей устойчивого развития инфраструктуры ресурсообеспечения, состоящая из семи этапов. Выделены показатели организационно-технологической надежности строительства и определена их значимость.

Обсуждение и заключение. Учет влияния исследованных нами факторов предопределяет использование понятия риска как количественной меры реализации негативного сценария хода строительства под воздействием различных факторов, что позволяет проведение дальнейших исследований с привлечением аппарата теории рисков. На основании предлагаемого нами метода исследования может быть произведен расчет эффективности показателей ресурсообеспечения строительства в Ираке.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: капитальное строительство, сейсмическая активность, природно-климатические условия, обеспечение ресурсами, организационно-технологическая надежность

Статья поступила в редакцию 03.05.2023; одобрена после рецензирования 19.06.2023; принята к публикации 26.06.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Побегайлов О. А., Аль-Мсари Ахмед Абдул Руда Ауда Организационно-технологическая надежность строительства в Ираке // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 3 (91). С. 388-395. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-388-395>

© Побегайлов О. А., Аль-Мсари Ахмед Абдул Руда Ауда, 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-388-395>
EDN: SNFQZU

ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL RELIABILITY OF CONSTRUCTION IN IRAQ

Oleg A. Pobegaylov^{1*}, Al-Masri Ahmad Abdul Ruda Auda²

¹Don State Technical University
Rostov-on-Don, Russia

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

opobegaylov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2950-7310>
ahmed4_33@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8354-9661>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Capital construction of buildings and structures in the Republic of Iraq is one of the most important areas of production activity, it is the basis for the development of all sectors in the country's economy. The modern construction complex of Iraq is constantly developing and improving, modern construction materials, technologies, methods of organization and management of construction are being introduced, which makes it possible to implement construction projects of almost unlimited complexity. However, in modern conditions that have been formed in the Republic of Iraq from the end of the 20th century to the present, a special problem has become the need for full and timely provision of construction with all types of resources, which, in the conditions of the Iraqi construction market, is an unsolved scientific and practical task, due to the high influence of negative factors different nature, thereby reducing the organizational and technological reliability of the construction of buildings.

Materials and methods. To solve this problem, 7 stages of developing a system of indicators for the sustainable development of resource infrastructure, which will improve the organizational and technological reliability of construction in Iraq are proposed. In addition, a model for calculating generalized criteria for the organizational and technological reliability of construction was developed. To determine the significance of indicators of organizational and technological reliability, it is proposed to use the method of expert evaluation.

Results. A system of indicators for the sustainable development of resource infrastructure has been developed, consisting of seven stages. The indicators of organizational and technological reliability of construction are singled out and their significance is determined.

Discussion and conclusions. Taking into account the influence of the factors studied by us predetermines the use of the concept of risk as a quantitative measure of the implementation of a negative scenario of the construction progress under the influence of various factors, which allows further research using the apparatus of risk theory. On the basis of the proposed research method, we can calculate the effectiveness of indicators of resource provision for construction in Iraq.

KEYWORDS: capital construction, seismic activity, natural and climatic conditions, resource provision, organizational and technological reliability

The article was submitted 03.05.2023; approved after reviewing 19.06.2023; accepted for publication 26.06.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Pobegaylov Oleg A., Al-Masri Ahmad Abdul Ruda Auda Organizational and technological reliability of construction in Iraq. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (3): 388-395. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-388-395>

© Pobegaylov O. A., Al-Masri Ahmad Abdul Ruda Auda, 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время строительство в Ираке является одним из основных факторов развития экономики. При этом, несмотря на положительную динамику развития и результативность строительства в целом, проблемы обеспечения устранены не в полной мере, что объясняется сложными природно-климатическими особенностями Ирака, проблемами освоения подземного пространства в сложных инженерно-геологических условиях, использованием ранее не применявшихся строительных технологий, проблемами в процессе ресурсообеспечения.

Влияние данных отрицательных факторов сказывается весьма негативно и значительно на таких параметрах строительства, как соблюдение сроков выполнения работ, сохранение неизменным уровня стоимости объекта на протяжении его возведения и обеспечение заданного качества построенного объекта, уменьшая тем самым организационно-технологическую надежность строительства зданий в целом.

В этой связи разработка эффективной системы обеспечения организационно-технологической надежности (ОТН) строительства с учетом рисков ресурсоснабжения представляет собой весьма актуальную научную задачу, от решения которой во многом зависят как эффективность капитальных вложений в проекты, так и технико-экономические показатели уже введенных в эксплуатацию объектов. При этом под организационно-технологической надежностью строительства зданий и сооружений понимается способность производственной системы на основе реализации технологических, организационных, управленческих и других решений в условиях воздействия различных факторов среды функционирования, определяющих рисковые условия, как сложной динамической системе, обеспечить выполнение основных показателей строительства: запланированные сроки, стоимость и проектное качество возведения объекта [1].

Исходя из вышеизложенного, мы поставили целью исследования повышения организационно-технологической надежности строительства в Ираке. Методической основой работы явились общенаучные принципы и методы исследования: эмпирические методы (эксперимент и экспертная оценка), теоретические (анализ и синтез, систематизация). Материалами исследования послужили статистические данные по объектам строительства Республики Ирак и общенаучные данные, собранные из существующей научной литературы.

Проблемы строительного производства в Ираке анализировали Аль-Омари А., Юсиф Ю.З., Сархат М.А., Сарвари Х. и др. [2, 3, 4]. Вопросы организационно-технологической надежности строительства исследовали С. В. Никоноров, К. А. Шрейбер, Л. Б. Зеленцов, В. М. Лебедев, В. В. Сокольников и др. [1, 5, 6, 7, 8]. Однако проблема ОТН строительства в Ираке серьезно исследована еще не была.

ОСОБЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА В РЕСПУБЛИКЕ ИРАК

Рассмотрим факторы, определяющие особенности строительства в Ираке. Большая часть Ирака расположена в пределах Месопотамской низменности. Северная часть которой представляет собой равнину высотой 200–500 м, осложненную отдельными массивами, высотой до 1460 м (горы Синджар), южная часть Месопотамии – заболоченная низменность, высотой не более 100 м. Окраина Аравийской платформы, заходящая в Ирак с юго-запада, расположена в пределах Сирийско-Аравийского плато высотой до 900 м. На севере Ирака расположены хребты Армянского нагорья, переходящие на северо-востоке страны в средневысотные хребты Иранского нагорья с высшей точкой Ирака (3587 м) [2]. Эти горные районы характеризуются повышенной сейсмичностью, а она является одним из ключевых факторов, определяющих особенности строительства в Ираке. В период 2020–2023 гг. здесь произошло порядка 50 землетрясений силой 2–4 балла. В апреле 2021 г. имело место землетрясение магнитудой 5,3 балла. 6 февраля 2023 г. с интервалом в девять часов на юго-востоке Турции произошли два мощных землетрясения. Эпицентр первого, с магнитудой 7, 8 ($\pm 0,1$), находился в районе Шехиткамыш в Газиантепе (Турция), эпицентр второго, с магнитудой 7,5 ($\pm 0,1$), – в районе Экинёзю в Кахраманмараше (Турция), после чего последовала целая цепь землетрясений, последовательно смещающаяся с запада на восток. Так, землетрясение магнитудой 5,1 произошло на границе Ирана и Ирака 16 марта 2023 г. Эпицентр находился в 17 км от иракского города Халабджа с населением более 50 тыс. человек [3].

Вторым фактором, оказывающим важное воздействие на особенности строительства на территории Ирака, является значительный рост температуры. В опубликованном в 2019 г. докладе ООН Ирак был отнесен к пятой наиболее уязвимой стране в мире с точки зрения доступности воды и продовольствия, а также подверженности экстремальным температурам. Температура в стране повышается в семь

раз быстрее, чем в среднем по миру, в то время как ежегодное количество осадков, по прогнозам, к 2050 г. сократится на 9%. Так, за период с 1970 по 2022 г. среднегодовая температура в Ираке повысилась на 2 °С. В свою очередь экстремальные температуры и высокие температурные колебания определяют выбор строительных материалов и технологий.

Доступность воды также оказывает значительное влияние на особенности строительства с позиции стабильного ресурсообеспечения. Нужно отметить, что страны, расположенные в бассейне рек Тигр и Евфрат, активно внедряют различные крупномасштабные проекты управления водными ресурсами, как правило, в одностороннем порядке, без консультаций с другими заинтересованными сторонами. Изменение количества и качества воды в Тигре, Евфрате и реке Шатт-эль-Араб из-за последствий строительства плотин выше по течению значительно сократило приток воды в Ирак, в итоге чего страна в настоящее время сталкивается с угрозой нехватки воды. Ситуация усугубляется рядом проблем, которые включают плохое управление водными ресурсами, внутренние политические конфликты, отсутствие местной политики, изменение климата, законы о международном развитии и нестабильные отношения с соседними странами. В свою очередь отсутствие или нехватка воды существенно затрудняет технологически и удорожает стоимость строительства.

Количество осадков в Ираке ограничено, и большая часть территории страны является засушливой или полузасушливой. За период 1951–2023 гг. наблюдались переменные изменения в годовом количестве осадков как с увеличением (северо-восточный Ирак), так и с уменьшением (юго-восточный и западный Ирак).

Кроме проблем природно-климатического характера, влияние на особенности строительства зданий и сооружений на территории Ирака оказывают и внешние факторы социального и экологического характера. В конце XX и начале XXI в. Ирак пережил глобальное разрушение практически всей инфраструктуры страны, ставшее результатом иностранного вмешательства, систематического террора со стороны различных местных группировок, а также военных операций по возвращению отдельных регионов под контроль правительства. Итогом стал целый комплекс социальных и экологических проблем, ряд которых был сформулирован в 2017 г. в отчете по экспресс-анализу Программы ООН по окружающей среде – ЮНЕП (англ. UNEP, United Nations Environment Programme) [4]. Были выявлены следующие проблемы:

- проблемы загрязнения в результате нефтяных пожаров в Кайяре и поджога серного завода в Мишраке;
- риски, связанные с авариями и терактами на заводах по производству боеприпасов;
- риски, связанные с неконтролируемым сбросом сернистых отходов;
- экологические проблемы, связанные с огромным количеством мусора и отходов;
- большое количество асбеста, присутствующего на различных объектах в Мосуле;
- загрязнение полихлорированным дифенилом (ПХД) в результате нападений на энергетическую инфраструктуру;
- использование в период 2003–2011 гг. оружия с обедненным ураном (DU), радиоактивным и токсичным тяжелым металлом.

Наращение экологических и климатических проблем на фоне разрушения инфраструктуры и слабости управления усиливают уровень социального стресса и оказывают давление на слабое государство. Они усиливают недовольство населения по отношению к правительству, способствуют беспорядкам в обезлюдевших сельских районах, повышают требования к предоставлению услуг в городских районах. Рост числа поденщиков, не способных найти работу в сельском хозяйстве, повышает конкуренцию за работу в таких секторах, как строительство в городских районах. Такая конкуренция вызывает напряженность между перемещенными лицами и принимающими общинами в ряде провинций, включая Кербелу, Салах-эд-Дин и Диялу.

Таким образом, при строительстве в Ираке следует учитывать такие природно-климатические факторы, как экстремально высокие температуры, сейсмическую активность, нехватку водных ресурсов и резкое ухудшение экологической ситуации в стране, последствиям которой стал высокий уровень социальной напряженности и продолжение вооруженного противостояния центрального правительства и отдельных вооруженных группировок в ряде регионов страны. Учет же их влияния предопределяет использование понятия риска как количественной меры реализации негативного сценария в ходе строительства под воздействием указанных факторов.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА

Организация строительства зданий (сооружений) сопряжена с преодолением ряда опасностей (рисков), которые могут быть реализованы в виде последовательности опреде-

ленных событий, реализация которых привела бы к значительному ущербу, т.е. оценивается риском и, соответственно, описывается теорией рисков. Теория рисков, сформировавшаяся к концу 70-х годов XX века, в течение последних сорока лет получила значительное развитие, превратившись в строгую научную дисциплину [6]. Введение же в рассмотрение понятия риска объективно приводит к формированию понятия организационно-технологической надежности (ОТН) строительства.

Значение показателя ОТН во многих методиках представляет собой оценку вероятности выполнения проекта в установленный срок. Практика показывает, что в основу разработки принципов и методов ОТН проектирования должен быть заложен вероятностно-статистический подход, учитывая наличие фактора неопределенности управленческих решений в строительстве. Таким образом, достижение требуемого уровня ОТН базируется на правильном выборе технологии строительства и организационной проработке проекта (что достигается качеством подготовки проектанта), а также на качестве принимаемых перед началом строительства и в ходе него организационных управляющих решений и правильным выбором стратегии поведения (что достигается качеством подготовки управляющего звена строительства) при условии достаточности обеспечения строительства ресурсами. Следовательно, обеспечение ресурсами и их потребление в строительстве, несмотря на их тесную взаимосвязь, это различные процессы, зачастую находящиеся в разных контурах управления. Проблемой научно-прикладного характера является координация этих процессов для достижения эффектов, которые сказываются на себестоимости строительства, а также на сроках.

Многие ученые справедливо считают основой надежности строительного производства использование качественных материалов и других ресурсов строительства [2, 7, 9, 10]. Как правило, целями обеспечения ресурсами являются:

- своевременное обеспечение необходимыми видами ресурсов в необходимом количестве и соответствующего качества [9];
- оптимизация потребления ресурсов [10];
- анализ организационного и технического уровня строительного производства и качества выполнения строительно-монтажных работ [2].

Система показателей устойчивого ресурсообеспечения и минимизации рисков в строительстве должна содержать следующие элементы:

- перспективы ресурсообеспечения – основные прогнозы по строительству объекта, которые отражены в виде стратегических прогнозов (карт);

- стратегические цели ресурсообеспечения, сформулированные в соответствии с направлениями стратегии. Они представляют собой декомпозицию главной цели ресурсообеспечения строительно-инвестиционного проекта;

- показатели, которые представляют собой измеримые показатели целей, т.е. поддающиеся количественной оценке категории, отражающие прогресс в достижении цели. Они подразумевают действия, нужные для достижения цели, и указывают, как стратегия будет реализована на оперативном уровне [7].

Показатели разработаны для того, чтобы привести стратегические цели ресурсообеспечения в более конкретные операционные подструктуры. В то же время такая система позволяет рассматривать ситуацию в стратегической перспективе.

В ходе исследования мы разработали систему показателей устойчивого развития инфраструктуры ресурсообеспечения, которую предлагаем разделить на семь этапов:

Этап 1. На этом этапе необходимо определить основные стратегические прогнозы касательно строительства объекта в регионе.

Этап 2. Определение ключевых факторов успеха и разработка стратегических целей для каждого подпроекта системы показателей стратегического развития ресурсообеспечения строительства. Процесс формирования целей носит циклический характер, и первоначальная система стратегических целей может существенно измениться в результате работы по выявлению причинно-следственных связей. На этом этапе должны быть разработаны критерии постановки целей, которые в дальнейшем позволят установить целевые значения показателей эффективности ресурсообеспечения. При разработке системы определяющим фактором является необходимость, с одной стороны, учитывать все наиболее важные цели и, с другой стороны, предотвращать размывание приоритетов.

Этап 3. Определение связей между стратегическими целями строительства. На этом этапе необходимо показать, что усилия, приложенные для достижения каждого промежуточного элемента, в конечном итоге будут способствовать достижению наиболее приоритетных целей ресурсообеспечения. Причинно-следственные связи в системе показателей стратегического развития связаны с декомпозицией дерева целей, включенного в систему показа-

телей. Связи могут существовать как между целями в рамках одного компонента инфраструктуры, так и между иными компонентами. В то же время размер системы показателей должен быть сведен к минимуму за счет исключения целей, относящихся к одному элементу прогноза и имеющих тесную прямую взаимозависимость, поскольку достижение одной из них будет означать выполнение другой. Поэтому дублирующие цели должны быть исключены на этапе выявления связей.

Этап 4. Согласование краткосрочных и долгосрочных целей ресурсобеспечения в строительстве. Цели имеют временной горизонт, и продолжительность периода достижения, как правило, пропорциональна значимости цели, поскольку конечная цель достигается с помощью промежуточных. Основная задача этого этапа – проверить подчиненность менее важных и краткосрочных целей более значительным и долгосрочным.

Этап 5. Разработка показателей и целевых значений устойчивого ресурсобеспечения строительного объекта. Каждая цель связана с одним или несколькими показателями, достижение которых должно отражать прогресс в достижении цели. Показатель действует как количественное резюме цели. После утверждения перечня показателей необходимо определить их целевые значения. Одновременно необходимо иметь в виду следующее: мировой и национальный уровень, уровень лучших регионов, исторические данные, законодательный стандарт, новый технологический стандарт и возможности государственной поддержки.

Этап 6. Разработка плана ресурсобеспечения. Для того чтобы система показателей организационно-технологической надежности строительства стала эффективным инструментом стратегического управления проектом, необходимо разработать соответствующие программы. Следует провести инвентаризацию реализуемых программ и программ, запланированных в ходе разработки стратегии. Каждая стратегическая инициатива может повлиять на результат по одному или нескольким показателям. Следует также иметь в виду, что не все реализуемые программы должны быть включены в систему показателей.

Этап 7. На этом этапе должна быть составлена итоговая таблица, отражающая разработанную систему показателей организационно-технологической надежности строительства в целом и ресурсобеспечения как одного из ключевых подпунктов. Управление, основанное на модели показателей системы стратегического развития, требует информационного взаимодействия по принципу одного цикла, т.е. инфор-

мация о процессах реализации программы и достижении целевых показателей должна быть получена органами управления. Если условия эксплуатации изменятся, возможно, потребуется скорректировать модель.

В качестве методов формирования комплексной системы показателей развития организационно-технологической надежности строительства в целом и ресурсобеспечения в частности мы предполагаем использование экспертного метода.

Определение удельных весов факторов целесообразно провести на основе экспертного опроса специалистов строительной отрасли в регионе с обоснованием достоверности экспертного опроса путем расчета коэффициента согласованности.

Итоговый балл по каждому критерию определяется по формуле

$$y_i = m \times \sum j = w_j \times c_j, \quad (1)$$

где y_i – суммарный балл по i -му критерию (в баллах);

w_j – вес j -го показателя (общий вес показателей, характеризующих данный критерий, равен 1);

c_j – экспертное мнение по j -му показателю;

m – количество показателей, включенных в i -й критерий [5].

В качестве показателей эффективности модели ресурсоснабжения строительства предлагается использовать параметры, рассмотренные выше. Один из частных случаев такого подхода представляет собой построение обобщенной функции желательности. В её основе лежит идея преобразования натуральных значений факторов в числовой коэффициент.

Численные значения функции желательности, приведенные в таблице 1, получены из методики обобщенной функции желательности Харрингтона [8].

Таблица 1

Шкала функции желательности

Источник: составлено авторами на основе методики, выведенной В.В. Сокольниковым [8]

Table 1

Desirability function scale

Source: compiled by the authors on the basis of the methodology developed by V.V. Sokolnikov [8]

Желательные свойства	Пределы по шкале желательности
очень хорошо	1,00...0,80
хорошо	0,80...0,63
удовлетворительно	0,63...0,37
плохо	0,37...0,20
очень плохо	0,20...0,00

Таблица 2
Матрица соответствия показателей эффективности шкале
Функции желательности Харрингтона
Источник: составлено авторами.

Table 2
Correlation matrix of performance indicators to Harrington's desirability function scale
Source: compiled by the authors.

Показатели эффективности	Пределы по шкале желательности				
	1,00...0,80	0,80...0,63	0,63...0,37	0,37...0,20	0,20...0,00
	очень хорошо	хорошо	средне	плохо	очень плохо
1	Значение каждого показателя эффективности и его разнесение в соответствии со шкалой функции желательности осуществляется на основе метода экспертных оценок				
2					
3					
4					
5					
6					

При наличии нескольких показателей эффективности обобщенный критерий должен быть таким, чтобы он делал неприемлемым решение даже при одном неудовлетворительном показателе, в соответствии с формулой (2).

$$D = \sqrt[n]{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (2)$$

После этого составляется матрица соответствия показателей эффективности шкале функции желательности Харрингтона, типовая форма которой приводится в таблице 2.

Исходя из полученной матрицы соответствия показателей эффективности шкале функции желательности Харрингтона, можно произвести расчет обобщенных критериев системы ресурсоснабжения строительства и ОТН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ресурсное обеспечение строительного проекта сопряжено с большим количеством неотъемлемых рисков из-за участия многих договаривающихся сторон, таких как владельцы, проектировщики, подрядчики, субподрядчики, поставщики (как материалов и конструкций, так и оборудования), инвесторы, банки, страховщики и т. д.

В ходе проведенного исследования мы предложили семь этапов разработки системы показателей устойчивого развития инфраструктуры ресурсобеспечения, которая позволит повысить организационно-технологическую надежность строительства в Ираке. Кроме того, нами была разработана модель расчета обобщенных критериев организационно-технологической надежности строительства. Для определения значимости показателей организационно-технологической надежности мы предложили и

практически использовали метод экспертной оценки (экспертный опрос специалистов соответствующего региона строительства).

Учет влияния исследованных нами факторов предопределяет использование понятия риска как количественной меры реализации негативного сценария хода строительства под воздействием различных факторов, что позволяет проведение дальнейших исследований с привлечением аппарата теории рисков.

На основании предлагаемого метода исследования может быть произведен расчет эффективности показателей ресурсобеспечения строительства в Ираке.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Никоноров С. В., Мельник А. А. Повышение организационно-технологической надежности строительства в современных условиях // Вестник ЮУрГУ. 2019. № 3. С. 19–23. DOI: 10.14529/build190303.
2. Al-Omari A., Khattab S. Characterization of building materials used in the construction of historical Al-Omariya mosque minaret in Mosul's old city, Iraq // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 33. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101645>.
3. Sarvari H., Chan D. W.M., Alaeos A. K. F., Olawumi T. O., Aldaud A. A. Critical success factors for managing construction small and medium-sized enterprises in developing countries of Middle East: Evidence from Iranian construction enterprises // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 43. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103152>.
4. Yousif You. Z., Sarhat M. A., Farsat H. A. Investigating BIM level in Iraqi construction industry // Ain Shams Engineering Journal. 2023. Vol. 14, Issue 3. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101881>.
5. Зеленцов Л. Б., Цапко К. А., Беликова И. Ф., Пирко Д. В. Современные методы оценки организационно-технологической надежности инвестиционно-строительного комплекса. [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2020. № 9. Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/p9y2020/6602> (дата обращения: 28.04.2023).

6. Шрейбер К. А., Шрейбер К. К. Организационно-технологическая подготовка мероприятий по обеспечению надежности зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 3. С. 42–46. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.03.42-46.

7. Лебедев В. М. Организационно-технологическая надежность управляющих систем строительства [Электронный ресурс] // Вестник МГСУ. 2008. № 4. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsionno-tehnologicheskaya-nadezhnost-upravlyayuschih-sistem-stroitelstva-1> (дата обращения: 28.04.2023).

8. Сокольников В. В. Декомпозиция проблемы обеспечения организационно-технологической надежности строительства на основе классификации определений понятийного поля «организация строительства» // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 3 (74). С. 87–93. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-3-87-93.

9. Зеленцов Л. Б. Реализация строительных проектов изменяемого функционального назначения // Строительное производство. 2021. № 2. С. 26–32. DOI: 10.54950/26585340_2021_2_26.

10. Beskopylny A. N., Stel'makh S. A., Shcherban' E. M., Mailyan L. R., Meskhi B. C., El'shaeva D., Varavka V. Developing environmentally sustainable and cost-effective geopolymers concrete with improved characteristics // Sustainability. 2021. № 13. 13607. DOI: 10.3390/su132413607.

REFERENCES

1. Nikonorov S. V., Mel'nik A. A. Povyshenie organizatsionno-tehnologicheskoy nadezhnosti stroitel'stva v sovremennykh usloviyakh [Improvement of organizational and technological reliability of construction in modern conditions]. *Vestnik JuUrGU*. 2019; 3: 19 – 23. DOI: 10.14529/build190303. (in Russ.)

2. Al-Omari A., Khattab S. Characterization of building materials used in the construction of historical Al-Omariya mosque minaret in Mosul's old city, Iraq. *Journal of Building Engineering*. 2021; Vol. 33. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101645>.

3. Sarvari H., Chan D. W.M., Alaeos A. K. F., Olawumi T. O., Aldaud A. A. Critical success factors for managing construction small and medium-sized enterprises in developing countries of Middle East: Evidence from Iranian construction enterprises. *Journal of Building Engineering*. 2021; Vol. 43. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103152>.

4. Yousif You. Z., Sarhat M. A., Farsat H. A. Investigating BIM level in Iraqi construction industry. *Ain Shams Engineering Journal*. 2023; Vol. 14, Issue 3. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101881>.

5. Zelencov L. B., Capko K. A., Belikova I. F., Pirko D. V. Sovremennye metody ocenki organizatsionno-tehnologicheskoy nadezhnosti investitsionno-stroitel'nogo kompleksa. [Modern methods for assessing the organizational and technological reliability of the investment and construction complex]. *Inzheneryj vestnik Dona*. 2020; 9. Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2020/6602> (accessed: 28.04.2023). (in Russ.)

6. Shreyber K. A., Shreyber K. K. Organizatsionno-tehnologicheskaya podgotovka meropriyatiy po obespecheniju nadezhnosti zdaniy [Organizational and

technological preparation of measures to ensure the reliability of buildings]. *Proyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2020; 3: 42–46. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.03.42-46. (in Russ.)

7. Lebedev V. M. Organizatsionno-tehnologicheskaya nadezhnost' upravlyajushhih sistem stroitel'stva [Organizational and technological reliability of construction control systems]. *Vestnik MGSU*. 2008; 4. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsionno-tehnologicheskaya-nadezhnost-upravlyayuschih-sistem-stroitelstva-1> (accessed: 28.04.2023). (in Russ.)

8. Sokol'nikov V. V. Dekompozitsiya problemy obespecheniya organizatsionno-tehnologicheskoy nadezhnosti stroitel'stva na osnove klassifikatsii opredelenij ponjatiynogo polja «organizatsiya stroitel'stva» [Decomposition of the problem of ensuring organizational and technological reliability of construction based on the classification of definitions of the conceptual field "construction organization"]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2019; 3 (74): 87–93. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-3-87-93. (in Russ.)

9. Zelencov L. B. Realizatsiya stroitel'nykh proektov izmenjaemogo funktsional'nogo naznachenija [Implementation of construction projects of a variable functional purpose]. *Stroitel'noe proizvodstvo*. 2021; 2: 26–32. DOI: 10.54950/26585340_2021_2_26. (in Russ.)

10. Beskopylny A. N., Stel'makh S. A., Shcherban' E. M., Mailyan L. R., Meskhi B. C., El'shaeva D., Varavka V. Developing environmentally sustainable and cost-effective geopolymers concrete with improved characteristics. *Sustainability*. 2021; 13. 13607. DOI: 10.3390/su132413607.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Побегайлов О. А. Разработка системы показателей устойчивого развития инфраструктуры ресурсообеспечения, состоящей из семи этапов. Общее редактирование и оформление статьи.

Аль-Мсари Ахмед Абдул Руда Ауда. Подготовка остальных частей статьи.

AUTHOR CONTRIBUTION STATEMENT

Pobegaylov O. A. Development of a system of indicators of sustainable development of the resource supply infrastructure, consisting of seven stages. General editing and design of the article.

Al-Msari Ahmed Abdul Ruda Auda. Preparing the rest of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Побегайлов Олег Анатольевич – доц. кафедры «Организация строительства», канд. экон. наук, доц. SPIN-код: 6802-2206.

Аль-Мсари Ахмед Абдул Руда Ауда – аспирант.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oleg A. Pobegaylov – Associate Professor of the Department "Organization of Construction", Don State Technical University. SPIN-code: 6802-2206.

Al-Msari Ahmed Abdul Ruda Auda – graduate student, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering.

Научная статья
УДК 691.54
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-396-404>
EDN: DWHWJB



ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗИСА НА СВОЙСТВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА

А. В. Явинский

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)

г. Омск, Россия

121qqz@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1717-9302>

АННОТАЦИЯ

Введение. Рост количества складированных отходов ТЭЦ негативно сказывается на экологической и экономической обстановке в России. Содержание золоотвалов приводит к загрязнению близлежащих территорий и росту цен на энергию. Для решения данной проблемы предложено использовать отходы ТЭЦ различного генезиса в качестве компонента мелкозернистого бетона.

Материалы и методы. Перечислено оборудование, на котором выполнялся эксперимент. Для испытания на прочность при сжатии использовался пресс ТП-1-350 «Универсал». Для проведения испытания на прочность при изгибе использовалась машина МИИ-100. Удельная поверхность отходов ТЭЦ определялась на приборе ПСХ-12. Образцы набирали прочность в камере нормального твердения. Химический состав отходов ТЭЦ определялся рентгенофлуоресцентным методом.

Результаты. Приведены экспериментальные данные о прочности образцов с заменой части цемента отходами ТЭЦ различного генезиса. Часть образцов твердела в нормальных условиях, а часть подвергалась тепловлажностной обработке. Рассчитан удельный расход цемента на единицу прочности при сжатии и при изгибе. Прочность при сжатии растворов с заменой 20% цемента на золу-уноса кузнецкой ТЭЦ позволяет получать образцы с прочностью на 8% меньше контрольного образца при нормальных условиях твердения. Использование кислой золы омской ТЭЦ и кузнецкой ТЭЦ при тепловлажностной обработке позволяет получать образцы с прочностью при сжатии выше, чем контрольный образец до 13%. Введение 30% основной золы новосибирской ТЭЦ взамен цемента позволяет получать образцы при нормальных условиях твердения по прочности при сжатии до 46,55 МПа. Расчет удельного расхода цемента на единицу прочности показал, что использование предложенных составов с кислой золой кузнецкой ТЭЦ снижает расход цемента на единицу прочности при тепловлажностной обработке образцов до 30%.

Обсуждение и заключение. Обосновано, что замена до 30% цемента золой гидроудаления новосибирской ТЭЦ позволяет получать мелкозернистые бетоны по прочности не ниже, чем контрольный цементный образец. При нормальных условиях твердения можно получать образцы с прочностью до 46,55 МПа при сжатии и 9,31 МПа при изгибе. Установлено, что использование тепловлажностной обработки для образцов с применением основной золы не дает прироста прочности по сравнению с кислыми золами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цемент, техногенные отходы, зола-унос, зола гидроудаления

Статья поступила в редакцию 07.06.2023; одобрена после рецензирования 21.06.2023; принята к публикации 26.06.2023.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Явинский А. В. Влияние техногенных отходов различного генезиса на свойства мелкозернистого бетона // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 3 (91). С. 396-404. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-396-404>

© Явинский А. В., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-396-404>
EDN: DWHWJB

INFLUENCE OF ANTHROPOGENIC WASTE OF DIFFERENT GENESIS ON PROPERTIES OF FINE-GRAINED CONCRETE

Aleksander V. Iavinskii

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia

121qqz@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1717-9302>

ABSTRACT

Introduction. The growing amount of stored waste from TPPs has a negative impact on the environmental and economic situation in Russia. The content of ash dumps leads to pollution of nearby areas and increase in energy prices. To solve this problem, it is proposed to use TPP waste as a component of solutions.

Materials and methods. The equipment on which the experiment was performed is listed. For the test of compressive strength, the press TP-1-350 Universal was used. For the test of flexural strength, MII-100 machine was used. Specific surface area of TPP waste was determined on PSKh-12 device. The samples gained the strength in the chamber of normal hardening. The chemical composition of TPP waste was determined by the X-ray fluorescent method.

Results. The experimental data on the strength of specimens with the replacement of part of the cement by waste thermal power plants of different genesis are presented. The part of the samples were cured under normal conditions, and part was subjected to heat and humidity treatment. Specific cement consumption per unit of compressive and flexural strength was calculated. Compressive strength of mortars with replacement of 20% of cement by Kuznetsky TPP ash makes it possible to obtain samples with strength by 8% less than the control sample under normal curing conditions. The use of acid ash from Omsk TPP and Kuznetsky TPP under heat and moisture treatment makes it possible to obtain the samples with compressive strength higher than the control sample up to 13%. The introduction of 30 % of the basic ash from Novosibirsk TPP instead of cement allows to obtain samples with compressive strength up to 46,55 MPa. The calculation of specific consumption of cement per unit strength showed that the use of the proposed compositions is more cost-effective than the control ashless sample up to 30%.

Discussion and conclusions. It has been proved that replacement of up to 30% of cement by TPP wastes makes it possible to obtain mortars with strength not lower than that of the control cement sample. Depending on curing conditions and the type of used TPP waste it is possible to receive samples with compressive strength up to 46,55 MPa and bending strength up to 9,31 MPa. It was found that the use of heat and moisture treatment for the samples using basic ash does not give an increase in strength, compared to acidic ash.

KEYWORDS: cement, technogenic waste, fly ash, pond ash

The article was submitted 07.06.2023; approved after reviewing 21.06.2023; accepted for publication 26.06.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Yavinsky Aleksander V. Influence of anthropogenic waste of different genesis on properties of fine-grained concrete. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (3): 396-404. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-396-404>

© Iavinskii A. V., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

Вследствие объема роста строительства дорог в России, который связан с национальным проектом «Безопасные и качественные дороги», растут и потребности регионов в дешевых строительных материалах. За последний год значительно выросла стоимость портландцемента, что является следствием введения антироссийских санкций [1]. Использование техногенных отходов взамен дорогостоящего вяжущего позволит значительно уменьшить стоимость строительства [2, 3, 4].

Проблема переработки отходов тепловых электростанций актуальна уже не первый год [5]. Объемы накопленных отходов ежегодно растут, а доля их утилизации сравнительно небольшая [6]. В России перерабатывается не более 10% от вырабатываемых золошлаковых отходов. Строительная отрасль является одним из наиболее актуальных направлений по переработке ЗШО [7, 8, 9, 10]. Одной из основных проблем переработки золошлаковых отходов является значительное отличие их химического состава в зависимости от вида сжигаемого угля, вследствие чего их влияние на свойства строительных материалов могут значительно различаться.

Многие отечественные и зарубежные авторы проводили исследования по замене компонентов бетонной смеси на отходы тепловых электростанций, однако большинство из них не проводит сравнение между различными по химическому составу отходами, а сравнивает результаты только с бездобавочным образцом. В работах [11, 12, 13, 14] рассматриваются результаты по использованию кислой золы в составе бетонов. Как правило, введение такой золы в количестве выше 20% взамен части цемента приводит к снижению прочности изделий.

В работах [15, 16, 17, 18] использовалась высококальцевая основная зола. Использование высококальцевых отходов приводит к меньшему снижению прочности по сравнению с кислыми отходами.

Для вовлечения в строительство как можно большего количества отходов необходимо использовать основные и кислые золы в рациональных пропорциях, что позволит снизить стоимость строительства и улучшить экологическую обстановку. Этот вопрос будет изучаться в дальнейших работах.

Цель данной работы установить влияние отходов тепловых электростанций различного генезиса на свойства мелкозернистого бетона при замене части цемента.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для изучения были отобраны пробы золы гидроудаления с отвалов омской ТЭЦ-5 (г. Омск) и новосибирской ТЭЦ-3 (г. Новосибирск), а также золы-уноса кузнецкой ТЭЦ (г. Кузнецк). Усредненный химический состав отходов, определенный рентгенофлуоресцентным методом и потери при прокаливании (ППП), представлены в таблице 1. Для испытания использовалась зола-унос кузнецкой ТЭЦ, поскольку по химическому составу она не отличается значительно от золы гидроудаления кузнецкой ТЭЦ, но удобнее в транспортировке.

По химическому составу можно сделать вывод, что зола-унос кузнецкой ТЭЦ и зола гидроудаления омской ТЭЦ-5 являются кислыми и не обладают собственной активностью (модуль основности $M_o < 1$), а зола гидроудаления новосибирской ТЭЦ-3 является основной (модуль основности $M_o > 1$). Также наблюдается значительное отличие внешнего вида у различных отходов ТЭЦ, зола гидроудаления предварительно высушивалась до постоянной массы в сушильном шкафу (рисунок 1).

Удельная поверхность отходов определялась с помощью прибора ПСХ-12 и составляет: для золы гидроудаления омской ТЭЦ-5 $S_{уд} = 220 \text{ м}^2/\text{кг}$; для золы гидроудаления новосибирской ТЭЦ-3 $S_{уд} = 240 \text{ м}^2/\text{кг}$; для золы уноса кузнецкой ТЭЦ $S_{уд} = 290 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Для изготовления мелкозернистого бетона использовался цемент ЦЕМ I 42,5 Н, который был исследован в лаборатории СибАДИ и показал соответствие всем требованиям ГОСТ 31108–2020.

В качестве мелкого заполнителя применялся речной кварцевый песок с модулем крупности 2,5, поставленный АО «Омский речной порт».

Для испытания на прочность при сжатии использовался пресс ТП-1-350 «Универсал». Для проведения испытания на прочность при изгибе использовалась машина МИИ-100.

В качестве пластифицирующей добавки применялся поликарбоксилатный пластификатор SikaViscoCrete 20 Gold, рациональное количество которого было определено в прошлых работах [19] и составляет 0,7% от массы вяжущего.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проведения испытаний изготавливались образцы-балочки размером 4х4х16 см, составы которых представлены в таблице 2.

Таблица 1
Химический состав золы гидроудаления
Источник: составлено авторами.

Table 1
Chemical composition of pond ash
Source: compiled by the authors.

Материал	Содержание оксидов, % по массе										
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	ППП
Омск	56,55	1,01	22,25	9,29	0,14	0,78	1,44	0,29	0,71	0,32	7,22
Новосибирск	17,58	0,59	9,72	6,54	4,85	5,5	45,28	0,36	0,92	0,11	8,55
Кузнецк	59,55	2,25	22,12	8,13	0,8	0,81	1,05	1,47	0,26	0,21	3,35

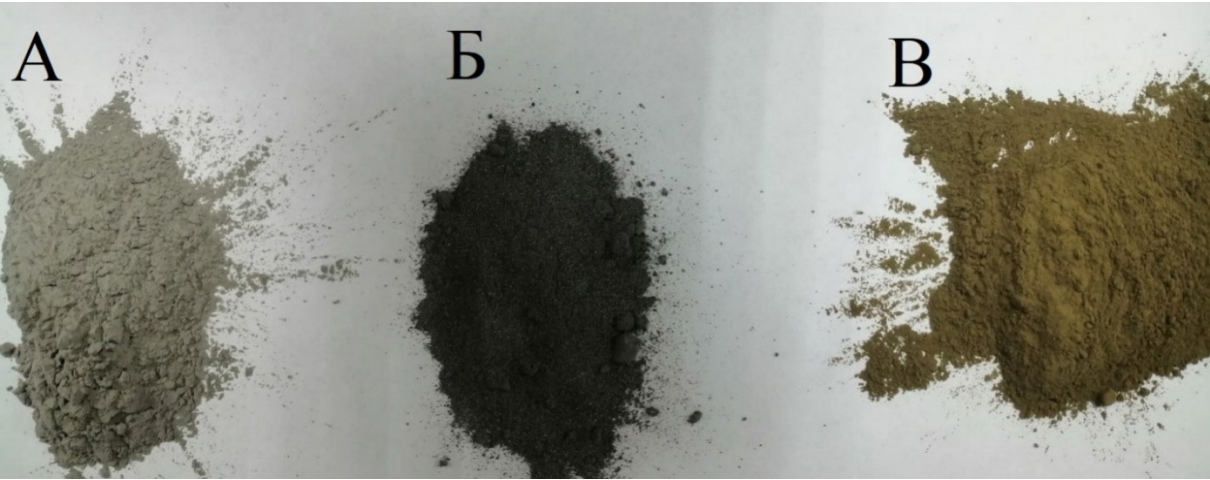


Рисунок 1 – Внешний вид отходов:
а – зола-унос кузнецкой ТЭЦ;
б – зола гидроудаления омской ТЭЦ-5;
в – зола гидроудаления новосибирской ТЭЦ-3
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Appearance of waste:
A – fly ash from Kuznetskaya TPP;
B – pond ash from Omskaia TPP-5;
C – pond ash from Novosibirskaia TPP-3
Source: compiled by the authors.

Часть образцов твердела в нормальных условиях (НУ) в камере нормального твердения, а часть подверглась тепловлажностной обработке (ТВО) по режиму 3 ч предварительной выдержки и 6 ч изотермического прогрева при температуре +70 °С, затем 3 ч плавного остывания.

Образцы, твердевшие в НУ, были испытаны после 28 сут твердения, а образцы, прошедшие ТВО, сразу после остывания. Результаты испытаний мелкозернистых бетонов представлены в таблице 3 и на рисунках 2, 3.

Удельный расход цемента на единицу прочности при сжатии рассчитывался по формуле [20]:

$$\text{Ц}_{\text{сж}}^{\text{уд}} = \frac{\text{Ц}}{R_{\text{сж}}}, \text{ кг/МПа},$$

где Ц – расход цемента, кг/м³; R_{сж} – прочность образца при сжатии, МПа.

Удельный расход цемента на единицу прочности позволяет оценить экономическую эффективность используемых составов. Чем меньше данный показатель, тем меньше расход цемента на единицу прочности.

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы. При НУ у составов с использованием золы-уноса кузнецкой ТЭЦ наблюдается снижение на 6, 8, 20, 37%, соответственно для составов с заменой 10, 20, 30, 40% цемента золой-уноса, по сравнению с контрольным составом № 1.

Таблица 2
Составы мелкозернистых бетонов на м3
Источник: составлено авторами.

Table 2
Compositions of cement-sand mortars per m3
Source: compiled by the authors.

№ состава	Цемент, кг	Песок, кг	Вода, кг	Добавка, кг	Кузнецк, кг	Омск, кг	Новосибирск, кг
1(контрольный)	500	1250	225	3,5	-	-	-
2 (замена 10% цемента)	450	1250	230	3,5	50	-	-
3 (замена 20% цемента)	400	1250	237	3,5	100	-	-
4 (замена 30% цемента)	350	1250	241	3,5	150	-	-
5 (замена 40% цемента)	300	1250	245	3,5	200	-	-
6 (замена 10% цемента)	450	1250	235	3,5	-	50	-
7 (замена 20% цемента)	400	1250	240	3,5	-	100	-
8 (замена 30% цемента)	350	1250	248	3,5	-	150	-
9 (замена 40% цемента)	300	1250	251	3,5	-	200	-
10 (замена 10% цемента)	450	1250	225	3,5	-	-	50
11(замена 20% цемента)	400	1250	229	3,5	-	-	100
12(замена 30% цемента)	350	1250	236	3,5	-	-	150
13(замена 40% цемента)	300	1250	245	3,5	-	-	200

Прочность при изгибе у составов № 2, 3, 4 при НУ выше, чем у контрольного состава до 13%. При введении 40% золы-уноса прочность при изгибе в НУ начинает снижаться. Введение золы повышает отношение $R_{изг}/R_{сж}$ по сравнению с контрольным образцом при НУ, а значит, что составы с золой обладают повышенной однородностью.

При ТВО составов № 2-5 наблюдается повышение прочности при сжатии по сравнению с контрольным образцом до 13%. Состав № 3 показывает прочность при изгибе выше, чем контрольный состав № 1 на 20%.

Стоит отметить, что если при НУ прочность при сжатии и изгибе составов с кузнецкой золой снижалась пропорционально количеству вводимой золы, то при ТВО наблюдается рост прочности при сжатии и изгибе при 20% вводимой золы по сравнению с 10%. При проведении ТВО в составах № 2, 3, 4, 5 наблюдается повышение прочности при сжатии и изгибе по сравнению с твердением в НУ. Повышение прочности при сжатии и изгибе связано с ускорением прохождения пуццоланической реакции золы вследствие её термоактивации [21].

У составов № 6, 7, 8, 9 при НУ с заменой части цемента золой гидроудаления омской ТЭЦ-5 показывают прочность при сжатии ниже, чем

контрольный состав на 3, 20, 46, 54%. Однако прочность при изгибе у составов с заменой 10 и 20% не уступает контрольному образцу. Составы с введением 30 и 40% золы гидроудаления показывают сниженную прочность при изгибе на 20 и 33% соответственно при НУ по сравнению с контрольным образцом. Снижение прочности при введении отходов омской ТЭЦ-5 может быть следствием повышенной водопотребности золы гидроудаления, а также большого количества частиц не сгоревшего топлива (потери при прокаливании составляют 7,22%). Сниженная прочность при сжатии образцов с использованием омской золы гидроудаления при НУ по сравнению с образцами, в которых использовалась зола-уноса кузнецкой ТЭЦ является следствием того, что омская зола обладает пониженной $S_{уд}$ по сравнению с золой уноса.

Тепловлажностная обработка составов с заменой части цемента омской золой гидроудаления позволяет получать образцы, сопоставимые по прочности при сжатии с контрольным беззолым образцом. Состав № 6, в который вводилось 10% омской золы, показывает прочность при сжатии выше, чем контрольный образец на 8%. Состав № 7 показывает прочность при сжатии, равную контрольному составу.

Таблица 3

Результаты испытаний

Источник: составлено авторами.

Table 3

Test results

Source: compiled by the authors.

№ состава	Условия твердения	Прочность при сжатии $R_{сж}$, МПа	Прочность при изгибе $R_{изг}$, МПа	Отношение $R_{изг}/R_{сж}$	Плотность ρ , кг/м ³	Индекс расхода цемента на единицу прочности при сжатии $\Pi_{сж}^{уд}$, кг/МПа	Индекс расхода цемента на единицу прочности при изгибе $\Pi_{изг}^{уд}$, кг/МПа
1	НУ	43,55	7,33	0,17	2235	11,48	68,21
	ТВО	40,14	6,98	0,17	2198	12,46	71,63
2	НУ	41,05	7,5	0,18	2230	10,96	60,00
	ТВО	44,83	7,12	0,16	2241	10,04	63,20
3	НУ	40,34	8,32	0,21	2294	9,92	48,08
	ТВО	45,34	8,4	0,19	2312	8,82	47,62
4	НУ	35,09	7,66	0,22	2211	9,97	45,69
	ТВО	37,35	6,99	0,19	2220	9,37	50,14
5	НУ	27,55	6,87	0,25	2171	10,89	43,67
	ТВО	30,09	6,58	0,22	2175	9,97	45,59
6	НУ	42,35	7,65	0,18	2269	10,63	58,82
	ТВО	43,32	7,12	0,16	2250	10,39	63,20
7	НУ	34,86	7,38	0,21	2192	11,47	54,20
	ТВО	39,90	7,08	0,18	2178	10,03	56,50
8	НУ	23,54	5,88	0,25	2132	14,87	59,52
	ТВО	30,21	5,91	0,20	2122	11,59	59,22
9	НУ	19,18	4,96	0,26	2032	15,64	60,48
	ТВО	24,22	5,08	0,21	1997	12,39	59,06
10	НУ	46,55	8,8	0,19	2251	9,67	51,14
	ТВО	45,01	9,31	0,21	2244	10,00	48,34
11	НУ	45,12	8,25	0,18	2240	8,87	48,48
	ТВО	44,32	8,54	0,19	2211	9,03	46,84
12	НУ	40,74	7,9	0,19	2210	8,59	44,30
	ТВО	40,8	8,32	0,20	2212	8,58	42,07
13	НУ	33,1	7,35	0,22	2168	9,06	40,82
	ТВО	28,84	7,77	0,27	2158	10,40	38,61

ТВО составов № 6, 7, 8, 9 позволяет получить прочность при сжатии больше, чем у образцов, которые твердели в НУ. Введение 10% золы гидроудаления омской ТЭЦ позволяет получать прочность на 8% больше, чем у контрольного образца при ТВО. У составов с 20, 30, 40% прочность ниже, чем у контрольного состава прошедшего ТВО на 6, 25, 40% соответственно. Результаты прочности при изгибе при ТВО незначительно отличаются, от результатов при НУ твердения.

Составы № 10, № 11, твердевшие в НУ, показывают прочность при сжатии, идентичную контрольному составу, а составы № 12, 13 показывают прочность ниже на 7 и 24%

соответственно. Прочность при сжатии у составов с использованием основной золы новосибирской ТЭЦ при НУ выше до 20%, чем у контрольного состава. Вследствие высокого содержания оксида кальция в золе образцы показывают снижение прочности только при замене 30% и более цемента в составе мелкозернистого бетона при НУ.

Тепловлажностная обработка составов № 10-12 с основной золой показывает прочность при сжатии выше, чем контрольный образец до 12%. Состав № 13 с заменой 40% цемента основной золой новосибирской ТЭЦ показал прочность значительно ниже, чем контрольный образец (снижение на 30%) при ТВО.

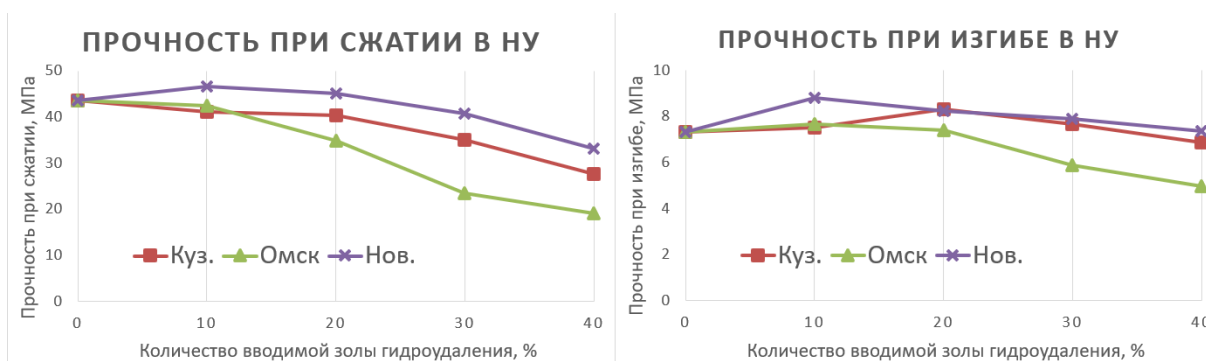


Рисунок 2 – Прочность испытуемых образцов в нормальных условиях твердения
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Strength of test specimens under normal curing conditions
Source: compiled by the authors.

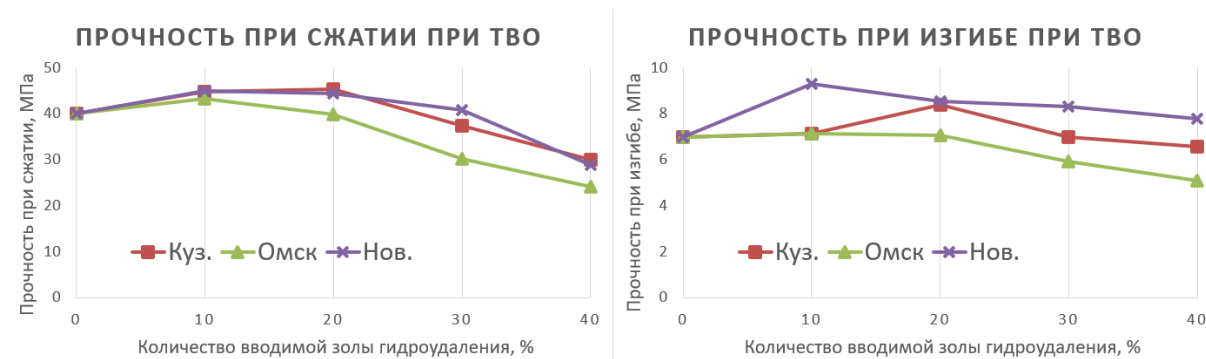


Рисунок 3 – Прочность испытуемых образцов при тепловлажностной обработке
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Strength of test specimens during heat and humidity treatment
Source: compiled by the authors.

Составы с основной золой № 10, № 11, № 12, № 13 не показали повышения прочности после прохождения ТВО по сравнению с НУ. Это связано с тем, что основная зола содержит меньше SiO_2 и Al_2O_3 , которые принимают участие в пуццоланической реакции.

Составы № 2-13 независимо от условий твердения показывают удельный расход цемента на единицу прочности ниже, чем контрольный состав № 1. Из чего можно сделать вывод, что составы с применением отходов ТЭЦ будут экономически более эффективны по сравнению с контрольным беззолым составом.

Для повышения количества вводимых отходов ТЭЦ в состав мелкозернистого бетона необходимо изучить возможность совместного введения кислых и основных зол в рациональных пропорциях, что будет в дальнейшем изучаться.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлено влияние замены части цемента в составе мелкозернистого бетона на золу-уноса кузнецкой ТЭЦ. В НУ твердения прочность образцов с заменой 20% цемента золой-уноса позволяет получать образцы с прочностью меньше всего на 8%. При использовании ТВО прочность образцов с введением до 20% золы-уноса выше, чем у контрольного образца. Замена 30% цемента золой-уноса позволяет получать образцы по прочности ниже всего на 7% по сравнению с контрольным образцом.

2. Выявлено влияние замены части цемента в составе мелкозернистого бетона на золу гидроудаления омской ТЭЦ-5. Установлено, что при НУ твердения замена более 10% цемента золой гидроудаления приводит к значительному снижению прочности. При ТВО возможно получать образцы с прочностью, сопоставимой с контрольным образцом при введении до 20% золы гидроудаления взамен цемента.

3. Установлено, что замена до 20% цемента основной золой новосибирской ТЭЦ-3 при НУ твердения позволяет повысить прочность мелкозернистого бетона до 7%. При замене 30% в НУ твердения получают образцы с прочностью при сжатии на 6% ниже, чем у контрольного беззолного состава. ТВО образцов с применением основной золы не дает прироста прочности по сравнению с кислыми золами.

4. Установлено, что при замене до 20% цемента на кислую золу омской или кузнецкой ТЭЦ возможно получать образцы, не уступающие по прочности при изгибе контрольному беззолному образцу вне зависимости от условий твердения. При использовании основной золы новосибирской ТЭЦ можно получать образцы с прочностью при изгибе до 12% выше, чем контрольный образец.

5. Установлено, что удельный расход цемента у составов с введением до 20% кислой золы кузнецкой ТЭЦ ниже, чем у контрольного беззолного состава вне зависимости от условий твердения. Удельный расход цемента при использовании омской ТЭЦ ниже, чем у контрольного образца, при замене до 20% цемента. Применение основной золы новосибирской ТЭЦ показывает наименьший удельный расход цемента на единицу прочности (снижение до 30%) по сравнению с контрольным образцом, что позволяет значительно снизить стоимость мелкозернистого бетона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Павлова С. А., Павлов И. Е., Амирасланов И. Д. Экономические санкции как предпосылка развития национальной экономики России // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 11 (125). 27 с.
2. Лесовик Р. В., Володченко А. А., Швецов А. В., Поспелов М. А., Минакова А. В., Гладких Е. А. К вопросу использования отходов промышленности для создания строительных композитов // Научные технологии и инновации. 2019. С. 290–294.
3. Ghosh S. K., Kumar V. Circular economy and fly ash management. – Singapore: Springer, 2020. P. 160.
4. Sun, J., Shen, X., Tan, G., Tanner, J. E. Compressive strength and hydration characteristics of high-volume fly ash concrete prepared from fly ash // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2019. Vol. 136. P. 565–580.
5. Sharma A., Sharma A., Singh K. Bearing capacity of sand admixed pond ash reinforced with natural fiber // Journal of Natural Fibers. 2022. Vol. 19. no 9. P. 3394–3407.
6. Калютин А. А., Трещев Д. А., Поздеева Д. Л. Утилизация твердых бытовых отходов на ТЭЦ г. Санкт-Петербурга // Материаловедение. Энергетика. 2019. Т. 25, № 3. С. 59–70.
7. Осокин Н. А., Золотова И. Ю., Никитушкина Ю. В. Снижение антропогенного воздействия дорожного строительства за счет применения золошлаковых отходов // Экономическая наука современной России. 2022. № 1. С. 81–93.
8. Rastogi A., Paul V. K. A critical review of the potential for fly ash utilisation in construction-specific applications in India // Environmental Research, Engineering and Management. 2020. Vol. 76. no 2. P. 65–75.
9. Cruz, N. C., Silva, F. C., Tarelho, L. A., & Rodrigues, S. M. Critical review of key variables affecting potential recycling applications of ash produced at large-scale biomass combustion plants // Resources, Conservation and Recycling. 2019. Vol. 150. P. 104427.
10. Al Biajawi, M. I., Embong, R., Muthusamy, K., Ismail, N., & Obianyo, I. I. Recycled coal bottom ash as sustainable materials for cement replacement in cementitious Composites: A review // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 338. P. 127624.
11. Федюк Р. С. [и др.] Особенности структурообразования композиционных материалов на основе цемента, известняка и кислых зол // Неорганические материалы. 2019. Т. 55, № 10. С. 1141–1148.
12. Лесовик В. С., Федюк Р. С. Повышение эффективности малопроницаемых цементных композитов // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16, № 10. С. 1346–1356.
13. Srikanth A., Nandini K. A., Babu Y. A. Performance of Fine Aggregate Replaced Pond Ash on strength of Concrete // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2021. T. 1112. № 1. С. 012029.
14. Yimam Y. A. et al. Effect of pond ash on properties of C-25 concrete // Materials Today: Proceedings. 2021. T. 46. С. 8296–8302.
15. Wang Y. et al. Physicochemical characterization of unconventional fly ashes // Fuel. 2022. T. 316. С. 123318.
16. Harle S. M. Experimental Investigation on the use of Pond Ash in the Concrete // International Journal of Scientific Research in Network Security and Communication. 2019. T. 7. № 3. P. 12–20.
17. Nwankwo C. O. et al. High volume Portland cement replacement: A review // Construction and Building materials. 2020. T. 260. P. 120445.
18. Alaloul W. S. et al. Utilizing of oil shale ash as a construction material: A systematic review // Construction and Building Materials. 2021. T. 299. P. 123844.
19. Ращупкина М. А., Явинский А. В., Чулкова И. Л. Влияние водоредуцирующих суперпластификаторов и золы гидроудаления на свойства цементного камня // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 3. С. 49–55.
20. Калашников В. И., Хвастунов А. В., Хвастунов В. Л. Физико-механические и гигрометрические свойства порошково-активированных высокопрочных щебеночных бетонов и фибробетонов с низким удельным расходом цемента на единицу прочности // Научно-технический вестник Поволжья. 2011. № 5. С. 161–164.
21. Явинский А. В., Чулкова И. Л. Влияние золы гидроудаления на свойства тяжелого бетона для строительства дорожного покрытия // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2022. № 3. С. 16–24.

REFERENCES

1. Pavlova S. A., Pavlov I. E., Amiraslanov I. D. Jekonomicheskie sankcii kak predposylka razvitiya nacional'noj jekonomiki Rossii [Economic sanctions as a prerequisite for the development of the national economy of Russia]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. 2022;11 (125): 27. (In Russ.)
2. Lesovik R. V., Volodchenko A. A., Shvecov, A. V., Pospelov, M. A., Minakova, A. V., Gladkih, E. A. K voprosu ispol'zovaniya othodov promyshlennosti dlja sozdaniya stroitel'nyh kompozitov [On the issue of using industrial waste to create construction composites]. *Naukoemkie tehnologii i innovacii*. 2019: 290-294. (In Russ.)
3. Ghosh S. K., Kumar V. Circular economy and fly ash management. Singapore: Springer, 2020:160.
4. Sun, J., Shen, X., Tan, G., Tanner, J. E. Compressive strength and hydration characteristics of high-volume fly ash concrete prepared from fly ash. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2019; Vol. 136: 565-580.
5. Sharma A., Sharma A., Singh K. Bearing capacity of sand admixed pond ash reinforced with natural fiber. *Journal of Natural Fibers*. 2022; 19. no 9: 3394-3407.
6. Kaljutik A. A., Treshhev D. A., Pozdeeva D. L. Utilizacija tverdyh bytovykh othodov na TJeC g. Sankt-Peterburga [Municipal solid waste disposal at the CHPP in St. Petersburg]. *Materialovedenie. Jenergetika*. 2019; 25. No. 3: 59-70. (In Russ.)
7. Osokin N. A., Zolotova I. Ju., Nikitushkina Ju. V. Snizhenie antropogennogo vozdejstviya dorozhnogo stroitel'stva za schet primeneniya zoloshlakovykh othodov [Reduction of anthropogenic impact of road construction due to the use of ash and slag waste]. *Jekonomicheskaja nauka sovremennoj Rossii*. 2022; 1: 81-93. (In Russ.)
8. Rastogi A., Paul V. K. A critical review of the potential for fly ash utilisation in construction-specific applications in India. *Environmental Research, Engineering and Management*. 2020; 76. no 2: 65-75.
9. Cruz, N. C., Silva, F. C., Tarelho, L. A., & Rodrigues, S. M. Critical review of key variables affecting potential recycling applications of ash produced at large-scale biomass combustion plants. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019; 150: 104427.
10. Al Biajawi, M. I., Embong, R., Muthusamy, K., Ismail, N., & Obianyo, I. I. Recycled coal bottom ash as sustainable materials for cement replacement in cementitious Composites: A review. *Construction and Building Materials*. 2022; 338: 127624.
11. Fedjuk R. S. i dr. Osobennosti strukturoobrazovaniya kompozicionnykh materialov na osnove cementa, izvestnjaka i kislyh zol [Features of structure formation of composite materials based on cement, limestone and acid ash]. *Neorganicheskie materialy*. 2019; T. 55. no. 10: 1141-1148. (In Russ.)
12. Lesovik V. S., Fedjuk R. S. Povyshenie jefektivnosti malopronicaemykh cementnykh kompozitov [Increased efficiency of low-permeability cement composites]. *Vestnik MGSU*. 2021; T. 16. no. 10:1346-1356.
13. Srikanth A., Nandini K. A., Babu Y. A. Performance of Fine Aggregate Replaced Pond Ash on strength of Concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021; T. 1112. no. 1: 012029.
14. Yimam Y. A. et al. Effect of pond ash on properties of C-25 concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2021; T. 46: 8296-8302.
15. Wang Y. et al. Physicochemical characterization of unconventional fly ashes. *Fuel*. 2022; T. 316: 123318.
16. Harle S. M. Experimental Investigation on the use of Pond Ash in the Concrete. *International Journal of Scientific Research in Network Security and Communication*. 2019. T. 7. №. 3. P. 12-20.
17. Nwankwo C. O. et al. High volume Portland cement replacement: A review. *Construction and Building materials*. 2020. T. 260: 120445.
18. Alaloul W. S. et al. Utilizing of oil shale ash as a construction material: A systematic review. *Construction and Building Materials*. 2021. T. 299: 123844.
19. Rashhupkina M. A., Javinskij A. V., Chulkova I. L. Vlijanie vodoreducirujushhih superplastifikatorov i zoly gidroudalenija na svojstva cementnogo kamnja [The influence of water-reducing superplasticizers and hydraulic removal ash on the properties of cement stone]. *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo*. 2021; 3: 49-55. (In Russ.)
20. Kalashnikov V. I., Hvastunov A. V., Hvastunov V. L. Fiziko-mehanicheskie i gigrometricheskie svojstva poroshkovo-aktivirovannykh vysokoprochnykh shhebenochnykh betonov i fibrobetonov s nizkim udel'nym rashodom cementa na edinicu prochnosti [Physical-mechanical and hygrometric properties of powder-activated high-strength crushed stone concretes and fibrobetons with low specific cement consumption per unit strength]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja*. 2011; 5: 161-164. (In Russ.)
21. Javinskij A. V., Chulkova I. L. Vlijanie zoly gidroudalenija na svojstva tjazhelogo betona dlja stroitel'stva dorozhnogo pokrytija [Influence of hydraulic removal ash on the properties of heavy concrete for the construction of the road surface]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V. G. Shuhova*. 2022; 3: 16-24. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Явинский Александр Викторович – преподаватель кафедры «Техносферная и экологическая безопасность», SPIN-код: 4276-7420.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksander V. Javinskii – Postgraduate student of the Industrial and Civil Engineering Department, teacher of the Technosphere and Environmental Safety Department, SPIN-код: 4276-7420.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются рукописи по направлениям: Транспорт. Транспортные и технологические машины; Строительство. Строительные материалы и изделия; Редакция принимает к рассмотрению **оригинальные научные статьи** объемом 8–10 стр. машинописного текста через 1 интервал, 5–8 рисунков и (или) таблиц, 20–40 ссылок; **обзорные статьи** – (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – от 10 и более страниц, от 5 и более рисунков, до 80 ссылок.

Статья должна быть неопубликованной ранее в других изданиях, написана в контексте современной литературы, обладать новизной и соответствовать профилю журнала. Автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирования и ссылок на официальные документы и другие источники. Редакция принимает на себя обязательство ограничить круг лиц, имеющих доступ к присланной в редакцию рукописи, сотрудниками редакции, членами редколлегии, а также рецензентами данной работы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий статья будет **ретрагирована** (отозвана из печати).

Следует уделить особенное внимание качеству перевода. Недопустимо при переводе пользоваться машинами-переводчиками. Перевод должен быть выполнен профессиональными переводчиками, а лучше – носителем английского языка. Необходимо учесть, что законодательство охраняет права переводчиков авторским правом наравне с правами авторов оригинальных произведений. Перевод текста – творческий процесс, производный объект авторского права, т.е. переводчик – соавтор нового произведения.

1 УДК. На первой странице, слева в верхнем углу без отступа, указываются индекс по универсальной десятичной классификации (УДК) (размер шрифта 10 пт).

2. Заглавие статьи. Заголовок (максимально 10-12 слов) должен быть информативным, лаконичным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы. Приводится на русском и английском языках, по центру полужирным шрифтом размером 12 пт. прописными буквами.

3. Фамилии авторов. Количество авторов не должно превышать четырех. Для англоязычных метаданных важно соблюдать вариант написания сведений об авторе в последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия (Anna V. Ivanova). При латинизации фамилии можно воспользоваться системой 1 BSI – Британский Институт Стандартов (British Standards Institution) транслитерации на сайте <http://translit.ru>, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи обычным шрифтом (размер шрифта 12 пт.).

4. Аннотация. Аннотация включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе научная статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению, объем от 200 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

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, представленных в виде графиков, то приведите только один типичный график, а данные об имеющихся количественных отличиях между ними, представьте в таблице.

Способы представления результатов представлены 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 A4, 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 подрисункной 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 – подрисункные 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.