

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

ВЕСТНИК СИБАДИ

THE RUSSIAN AUTOMOBILE AND HIGHWAY INDUSTRY JOURNAL

DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-5

ТОМ 20, № 5. 2023

VOL. 20, No. 5. 2023

Сквозной номер выпуска – 93

Continuous issue – 93



Учредитель и издатель:

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

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ

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

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

Founder and Publisher:

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

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

EDITORIAL POSTAL ADDRESS

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

Published since 2004
by 6 issues per year

Subscription index is 66000
in the Ural-Press catalog

www.vestnik.sibadi.org
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 серьезно занимаются научными исследованиями по тематике журнала.

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

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

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), регистрационный номер СМИ ПИ № ФС 77-73591 от 31.08.2018 г. Входит в перечень ведущих периодических изданий, рекомендованных ВАК решением президиума ВАК от 25.02.2011 г.; в соответствии с распоряжением Минобрнауки России от 28 декабря 2018 г. № 90 – р включен в новый перечень. С 2017 г. всем номерам и статьям журнала присваиваются идентификаторы цифровых объектов (DOI). Редакция осуществляет рецензирование (двухстороннее «слепое») всех поступающих в редакцию материалов с целью взыскательной экспертной оценки, а также проверку статей на плагиат.

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

Журнал индексируется и архивируется:

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

Журнал является членом:

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), CrossRef

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Подписано в печать 24.10.2023. Дата выхода в свет 14.11.2023. Формат 60×84 1/8 Гарнитура Arial. Печать оперативная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 27,25 Тираж 500 экз. Заказ 500 экз. Свободная цена. Отпечатано в типографии Издательско-полиграфического комплекса ФГБОУ ВО «СибАДИ», Россия, г. Омск, проспект Мира, д. 5.

Контент доступен под лицензией CC BY.

Поступившие в редакцию материалы не возвращаются.

Гонорары не выплачиваются.

Все статьи публикуются бесплатно.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

The journal is the periodical scientific edition registered as mass media. Certificate of registration media is PI NUMBER FS – 77-73591 dated on 31.08.2018 and is issued by the Federal Service of Supervision in the sphere of information technologies and mass communications (Roskomnadzor). The peer-reviewed scientific The Russian Automobile and Highway Industry Journal is included in the list of leading periodicals and recommended by the Higher Attestation Commission by a decision of the Presidium of the Higher Attestation Commission on 25.02.2011. In accordance with the order of The Ministry of Education and Science of Russia dated by December 28, 2018, No. 90 is included in the new list. Since 2017, all issues and articles of the journal have been assigned by Digital Object Identifiers (DOIs), the data of which are available in electronic version on the vestnik.sibadi.org 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 24.10.2023. Publication date is 14.11.2023. Format is 60 × 84 ½.

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

Content is available under license CC BY.

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

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Транспортное, горное и строительное машиностроение

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

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

Транспорт

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

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

Строительство и архитектура

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

Винников Юрий Леонидович, д-р техн. наук, проф., Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка, г. Полтава, Украина
Scopus Author ID 6603741286, **Researcher ID** P-7880-2015, **ORCID ID** 0000-0003-2164-9936

Горынин Глеб Леонидович, д-р физ.-мат. наук, проф., ФГБОУ ВО «СурГУХМАО-ЮГРБ», г. Сургут, Россия
Scopus Author ID 10040194400, **Researcher ID** AAM-4262-2021, **ORCID ID** 0000-0001-7843-7278

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

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

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

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

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

Кондаков Сергей Владимирович, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Колесные и гусеничные машины». Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия.
Scopus Author ID 56556574700, **Researcher ID** M-5466-2018, **ORCID** 0000-0001-6818-1694

Копаница Наталья Олеговна, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Строительные материалы и технологии». Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия.
Scopus Author ID 6506597418, **Researcher ID** A-8158-2016, **ORCID ID** 0000-0002-0991-8550

Корнеев Сергей Васильевич, д-р техн. наук, проф., Омский государственный технический университет (ОмГТУ), г. Омск, Россия
Scopus Author ID 7006776195, **Researcher ID** V-8864-2018

Коротаев Дмитрий Николаевич, д-р техн. наук, доц., проф. Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия.
Scopus Author ID 6506823308, **Researcher ID** T-5750-2017, **ORCID ID** 0000-0002-5957-4135

Корягин Марк Евгеньевич, д-р техн. наук, доц., ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», г. Новосибирск, Россия
Scopus Author ID 12794946600, **Researcher ID** M-1500-2013, **ORCID ID** 0000-0002-1976-7418

Курганов Валерий Максимович, д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», г. Тверь, Россия
ORCID 0000-0001-8494-2852, **Scopus Author ID** 6506823308, **Researcher ID** T-5750-2017

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

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

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

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

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

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

Мещеряков Виталий Александрович, д-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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL TEAM

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

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

Transport, mining and mechanical engineering

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

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

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

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

Transport

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

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

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

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

Construction and architecture

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Scopus Author ID 56487473100

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

В. Г. Зедгенизов, С. Х. Файзов

**ТИПОРАЗМЕРНЫЙ РЯД РЕЗОНАНСНОГО ВИБРАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ
И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЕГО ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ 540**

В. А. Николаев

**РАСЧЁТ НЕОБХОДИМОЙ МОЩНОСТИ НА ПРИВОД НАКОНЕЧНИКА МАЛОГО
РОТОРА 548**

С. В. Козелетов, С. В. Савельев

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО ЛОПАСТНОГО
ГИДРАВЛИЧЕСКОГО АМОРТИЗАТОРА 560**

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

Н. К. Горяев, С. П. Любецкий

**СБОР, ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ОТКРЫТЫХ ДАННЫХ
ПО ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫМ ПРОИСШЕСТВИЯМ 574**

С. В. Дорохин, А. Ю. Артемов

**СПОСОБ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КООРДИНИРОВАННОГО ТИПА
УПРАВЛЕНИЯ НА МАГИСТРАЛЬНОЙ УЛИЦЕ 586**

Н. М. Каримов, А. Ю. Михайлов

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ
МНОГОПОЛОСНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ПЕРЕСЕЧЕНИЙ
С ПРИОРИТЕТОМ ДВИЖЕНИЯ НА КОЛЬЦЕ 600**

А. И. Недобитков, В. С. Яковлев

**О ВОЗМОЖНОСТИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ БЕНЗИНА
НА ПОВЕРХНОСТИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО НЕЙТРАЛИЗАТОРА АВТОМОБИЛЯ
КАТЕГОРИЙ M_1 , M_1G 618**

А. И. Фадеев, А. М. Ильянков

**УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫМ ПРЕДЛОЖЕНИЕМ
НА РЕГУЛЯРНЫХ МЕЖДУГОРОДНЫХ АВТОБУСНЫХ ЛИНИЯХ 632**

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

А. С. Александров, Т. В. Семенова, Д. Ю. Раскошный

**КЛАССИФИКАЦИЯ УЧАСТКОВ ДОРОГ ПО СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ
К ОБРАЗОВАНИЮ КОЛЕИ ИЗНОСА 650**

Аль-Мсари Ахмед Абдул Руда Ауда, А. А. Руденко

**ФАКТОРЫ РИСКА РЕСУРСОСНАБЖЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА
ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЕГО ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
НАДЁЖНОСТИ 670**

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Viktor G. Zedgenizov, Sorbon Kh. Faizov

**TYPE SERIES OF RESONANT VIBRATION EQUIPMENT
FOR CONCRETE MIXTURES COMPACTION
AND OF ITS MAIN PARAMETERS CALCULATION METHOD..... 541**

Vladimir A. Nikolaiev

REQUIRED POWER CALCULATION TO SMALL ROTOR TIP DRIVE..... 549

Sergei V. Kozeletov, Sergei V. Savelyev

**MATHEMATICAL MODEL OF CONTROLLED VANE HYDRAULIC SHOCK
ABSORBER..... 561**

PART II. TRANSPORT

Nikolai K. Goryaev, Sergei P. Lubetskii

**PEN DATA ON ROAD TRAFFIC ACCIDENTS ACCUMULATION,
PROCESSING AND ANALYSIS 575**

Sergei V. Dorokhin, Aleksandr Yu. Artemov

**EFFICIENCY EVALUATING METHOD FOR COORDINATED CONTROL TYPE
ON MAIN STREET 587**

Navruz M. Karimov, Aleksandr Yu. Mikhailov

DEVELOPING A METHOD OF MULTI-LANE ROUNDABOUTS CAPACITY 601

Aleksander I. Nedobitkov, Vladimir S. Yakovlev

**ON POSSIBLE PETROL IGNITION ON OF M_1 , M_1 G CAR CATALYST CONVERTERS
SURFACE 619**

Aleksandr I. Fadeyev, Aleksei M. Ilyankov

TRANSPORT SUPPLY MANAGEMENT ON REGULAR INTERCITY BUS LINES ... 633

PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Anatoly S. Aleksandrov, Tatiana V. Semenova, Denis Y. Raskoshny

**CLASSIFICATION OF ROAD SECTIONS ACCORDING TO THE DEGREE
OF DANGERTO THE FORMATION OF A WEAR TRACK 651**

Al-Msari Ahmed Abdul Ruda Awda, Aleksandr A. Rudenko

**ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL RELIABILITY
OF CONSTRUCTION IN IRAQ 671**



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



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

Научная статья
УДК 621.01
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-540-547>
EDN: CHGYRA



ТИПОРАЗМЕРНЫЙ РЯД РЕЗОНАНСНОГО ВИБРАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЕГО ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

В. Г. Зедгенизов*, С. Х. Файзов

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

vzedgenizov@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5141-0876>

sorbon2018@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4428-9999>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Повышение энергоэффективности вибрационной техники ставит перед ее разработчиками ряд задач. Перспективным направлением снижения энергозатрат на привод вибрационных машин является использование явления резонанса. За счет динамических свойств колебательной системы удается существенно снизить потребляемую мощность резонансного вибрационного оборудования, а в ряде случаев повысить качество выпускаемой продукции.

Цель данной статьи – разработка типоразмерного ряда резонансного вибрационного оборудования для уплотнения бетонных смесей и методики расчета его основных параметров. Объектом исследований является колебательная система вибромашины, состоящая из двух масс, связанных между собой упругим и диссипативным элементами. Кроме того, первая масса через упругий и диссипативный элементы соединена с неподвижным основанием.

Материалы и методы. В исследованиях использованы основные положения теоретической механики, математического моделирования и статистической обработки результатов.

Результаты. По результатам исследований установлено, что с увеличением соотношения масс колебательной системы коэффициент динамичности уменьшается, а ширина резонансной зоны увеличивается. Приведены регрессионные уравнения. Установлено, что с увеличением жесткости рабочего органа снижается коэффициент динамичности, а горизонтальный участок на амплитудно-частотной характеристике, ширина которого существенно не меняется, сдвигается в область более высоких частот. С увеличением коэффициента демпфирования снижается коэффициент динамичности, а ширина резонансной зоны и частотный диапазон практически не меняется. Широкий спектр номенклатуры и масс сборного железобетона оправдывает разработку типоразмерного ряда резонансного вибрационного оборудования. Разработан типоразмерный ряд легкого (до 2 т), среднего (2–6 т) и тяжелого (6–10 т) типа. На основе анализа и обобщения результатов исследований разработана методика расчета резонансного вибрационного оборудования для уплотнения бетонных смесей, позволяющая повысить его энергоэффективность.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вибрационная техника, энергоэффективность, явление резонанса, типоразмерный ряд, методика расчета

Статья поступила в редакцию 28.09.2023; одобрена после рецензирования 02.10.2023; принята к публикации 24.10.2023.

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: Зедгенизов В. Г., Файзов С. Х. Типоразмерный ряд резонансного вибрационного оборудования для уплотнения бетонных смесей и методика расчета его основных параметров // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 5 (93). С. 540–547. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-540-547>

© Зедгенизов В. Г., Файзов С. Х., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-540-547>

EDN: CHGYRA

TYPE SERIES OF RESONANT VIBRATION EQUIPMENT FOR CONCRETE MIXTURES COMPACTION AND OF ITS MAIN PARAMETERS CALCULATION METHOD

Viktor G. Zedgenizov*, Sorbon Kh. Faizov

Irkutsk National Research Technical University,

Irkutsk, Russia

vzedgenizov@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5141-0876>

sorbon2018@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4428-9999>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Increasing the energy efficiency of vibration technology poses a number of challenges for its developers. A promising direction for reducing energy costs for driving vibration machines is the use of the resonance phenomenon. Due to the dynamic properties of the oscillatory system, it is possible to significantly reduce the power consumption of resonant vibration equipment, and in some cases, improve the quality of the products.

The purpose of this article is to develop a standard range of resonant vibration equipment for compacting concrete mixtures and a methodology for calculating its main parameters. The object of research is the oscillatory system of a vibrating machine, consisting of two masses connected by the elastic and dissipative elements. In addition, the first mass is connected to a fixed base through elastic and dissipative elements.

Materials and methods. The basic principles of theoretical mechanics, mathematical modelling and statistical processing of results were used in the research.

Results. According to the research results, it was established that with an increase in the mass ratio of the oscillatory system, the dynamic coefficient decreases, and the width of the resonant zone increases. The regression equations are given. It has been established that with increasing rigidity of the working body, the dynamic coefficient decreases, and the horizontal section on the frequency response, the width of which does not change significantly, shifts to the region of higher frequencies. With an increase in the damping coefficient, the dynamic coefficient decreases, and the width of the resonant zone and the frequency range practically do not change. A wide range of nomenclature and masses of precast reinforced concrete justifies the development of a standard-size range of resonant vibration equipment. A standard range of light (up to 2 tons), medium (2-6 tons) and heavy (6-10 tons) types has been developed. Based on the analysis and generalization of research results, a method for calculating resonant vibration equipment for compacting concrete mixtures has been developed, which makes possible to increase its energy efficiency.

KEYWORDS: vibration technology, energy efficiency, resonance phenomenon, standard-size range, calculation method

The article was submitted 28.09.2023; approved after reviewing 02.10.2023; accepted for publication 24.10.2023.

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. Viktor G. Zedgenizov, Sorbon Kh. Faizov Type series of resonant vibration equipment for concrete mixtures compaction and its main parameters calculation method. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2023; 20 (5): 540-547. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-540-547>

© Zedgenizov V. G., Faizov S. Kh., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы энергоэффективности вибрационной техники остро стоят перед ее разработчиками^{1, 2} [1]. Перспективным направлением снижения энергозатрат на привод вибрационных машин является использование явления резонанса³ [2, 3, 4, 5, 7]. За счет динамических

свойств колебательной системы удается существенно снизить потребляемую мощность резонансного вибрационного оборудования, а в ряде случаев повысить качество выпускаемой продукции⁴. Сказанное в полной мере относится к вибрационному оборудованию для уплотнения бетонных смесей⁵.

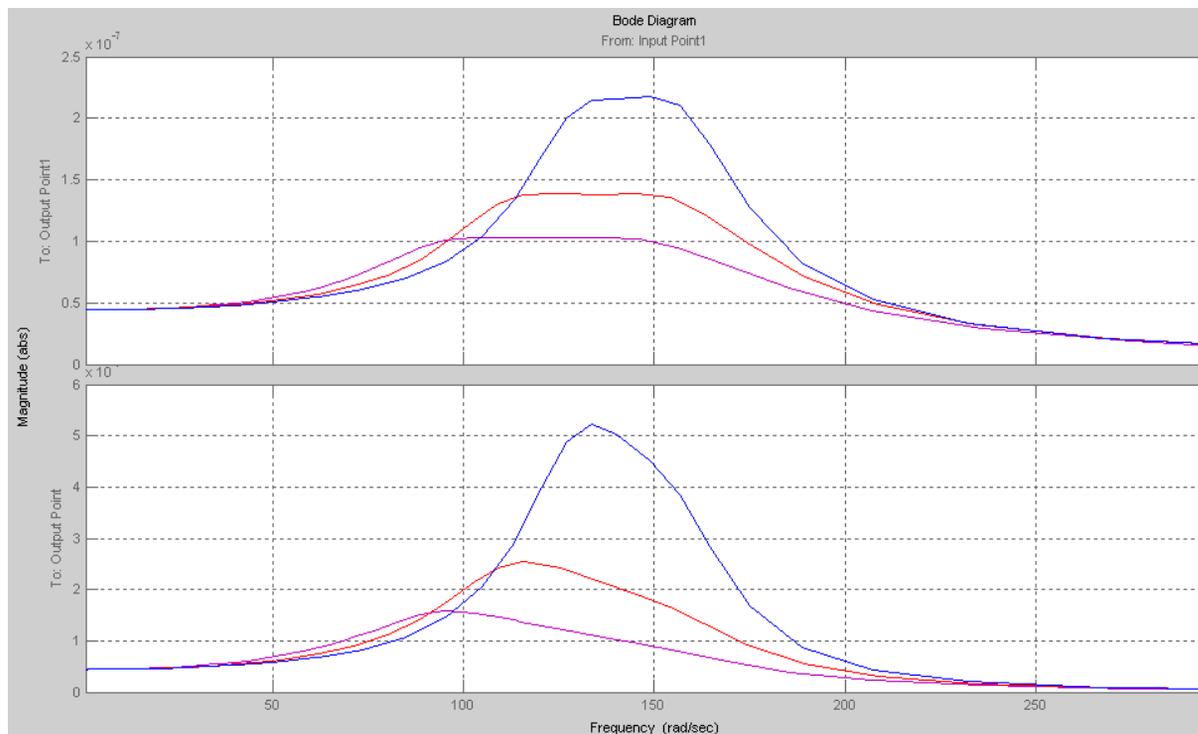


Рисунок 1 – АЧХ двухмассовой колебательной системы при различном соотношении масс:

- 1 – $m_1=1000$ кг; $m_2=100$ кг; $c_1=22600$ кН/м; $c_2=1870$ кН/м; $k_1=80$ Нс/м; $k_2=6520$ Нс/м
 2 – $m_1=1000$ кг; $m_2=250$ кг; $c_1=26600$ кН/м; $c_2=3580$ кН/м; $k_1=80$ Нс/м; $k_2=20300$ Нс/м
 3 – $m_1=1000$ кг; $m_2=500$ кг; $c_1=22600$ кН/м; $c_2=4960$ кН/м; $k_1=80$ Нс/м; $k_2=42300$ Нс/м

Источник: составлено авторами.

Fig. 1 – Frequency response of a two-mass oscillating system at different mass ratio:

- 1 – $m_1 = 1000$ kg; $m_2 = 100$ kg; $c_1 = 22600$ kN/m; $c_2 = 1870$ kN/m; $k_1 = 80$ Ns/m; $k_2 = 6520$ Ns/m
 2 – $m_1 = 1000$ kg; $m_2 = 250$ kg; $c_1 = 26600$ kN/m; $c_2 = 3580$ kN/m; $k_1 = 80$ Ns/m; $k_2 = 20300$ Ns/m
 3 – $m_1 = 1000$ kg; $m_2 = 500$ kg; $c_1 = 22600$ kN/m; $c_2 = 4960$ kN/m; $k_1 = 80$ Ns/m; $k_2 = 42300$ Ns/m

Source: compiled by the authors.

¹ Кошелев А. В. К вопросу энергосбережения вибрационных машин и технологических процессов // Союз машиностроителей России. Национальная научно-техническая конференция. 2022. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-energoberezheniya-vibratsionnyh-mashin-i-tehnologicheskikh-protsessov> (дата обращения: 16.09.2023).

² Лян И. П., Пановко Г. Я., Шохин А. Е. К вопросу об энергопотреблении вибрационных технологических машин // XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения: сб. тр. конф. (Москва, 4–6 декабря 2019 г.). М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2020. С. 334–337

³ Морозов А. А. Сравнение энергоёмкости резонансных и нерезонансных вибрирующих установок. Сб. трудов. Белгород: БелГТАСМ, 1999.

⁴ Гусев Б. В., Зазимко В. Г. Вибрационная технология бетона. К.: Будівельник, 1991. 160 с.

⁵ Гусев Б. В., Добшиц Л. М., Николаева А. А., Троицкий Ю. А., Куртов А. В. Оптимизация процессов виброуплотнения бетонов // Сборник статей 78-й Международной ежегодной научно-методической и научно-исследовательской конференции секции ОНИЛ «ЦЕМЕНТ». Москва, 31 января 2020 г. С. 13–21.

Однако резонансное вибрационное оборудование чувствительно к изменению параметров системы или внешних воздействий. Исследование динамики двухмассовых колебательных систем показало возможность расширения резонансной зоны одной из масс, на амплитудно-частотной характеристике (АЧХ), на которой появляется горизонтальный участок, где амплитуда колебаний не зависит от частоты вынуждающей силы [8, 9, 10].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследованиями на математической модели двухмассовой колебательной системы [8] получены дополнительные данные о влиянии некоторых параметров на ее выходные характеристики.

На рисунке 1 представлена АЧХ двухмассовой системы с различным соотношением масс.

Анализ полученных зависимостей показывает, что с увеличением второй массы (кривая 2 и 3) АЧХ опускается вниз, горизонтальный участок расширяется и сдвигается в область более низких частот. Это объясняется тем, что с увеличением второй массы для сохранения горизонтального участка на АЧХ необходимо

увеличивать коэффициент жесткости c_2 и коэффициент демпфирования k_2 . Непропорциональное увеличение массы и коэффициента жесткости приводит к изменению парциальных частот системы, а увеличение коэффициента демпфирования снижает коэффициент динамичности.

На рисунке 2 представлена зависимость коэффициента динамичности и ширины резонансной зоны от соотношения масс колебательной системы. С увеличением соотношения масс коэффициент динамичности системы уменьшается. Наилучшим образом зависимость аппроксимируется полиномиальной функцией с коэффициентом корреляции $R=1^6$:

$$k = 22,8\left(\frac{m_2}{m_1}\right)^2 - 19,78\left(\frac{m_2}{m_1}\right) + 6,63,$$

где k – коэффициент динамичности;
 m_1 – масса рабочего органа, кг;
 m_2 – масса вибратора, кг.

При этом ширина резонансной зоны увеличивается и может быть описана

$$b = 16,667\left(\frac{m_2}{m_1}\right)^2 + 27,5\left(\frac{m_2}{m_1}\right) + 32,083,$$

где b – ширина резонансной зоны, p/c .

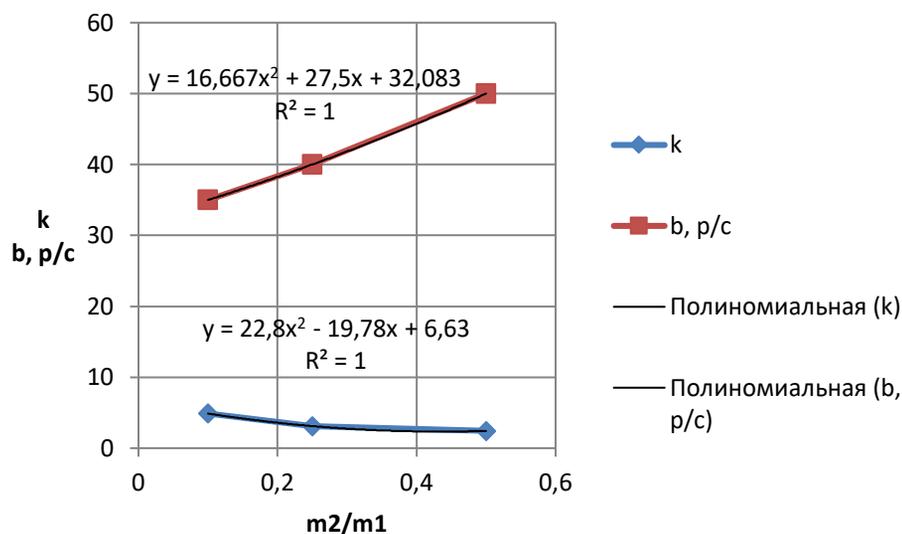


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента динамичности и ширины резонансной зоны от соотношения масс колебательной системы
 Источник: составлено авторами.

Fig. 2 – Dependence of the dynamicity coefficient and the width of the resonant zone on the mass ratio of the oscillatory system
 Source: compiled by the authors.

⁶ Завадский Ю. В. Методика статистической обработки экспериментальных данных. М.: МАДИ, 1973. 97 с.

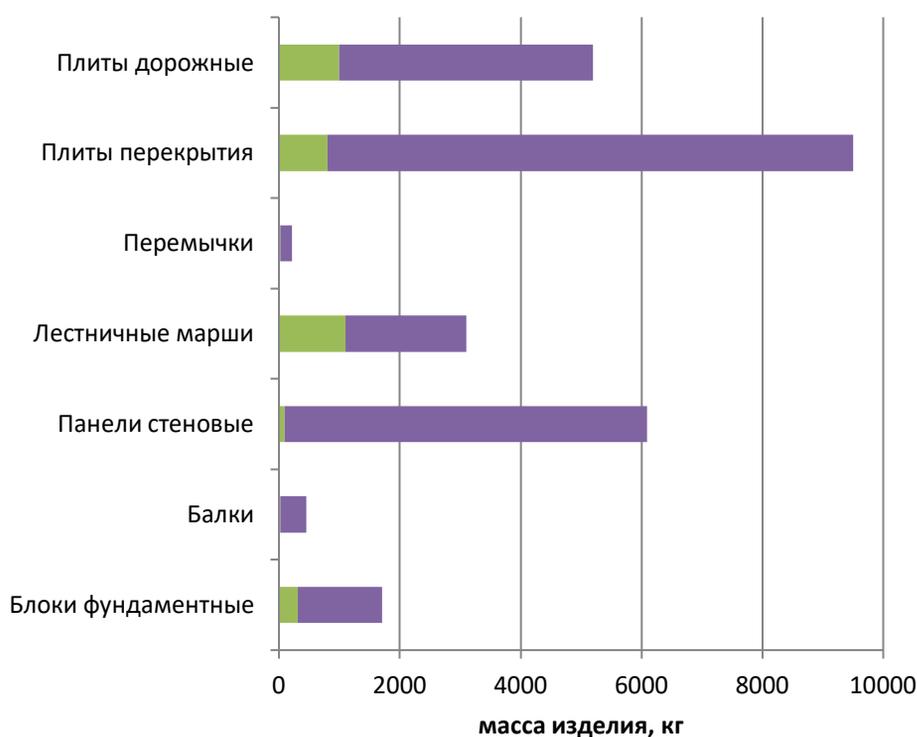
Рисунок 3 – Номенклатура и масса изделий сборного железобетона⁷Fig. 3 – Nomenclature and mass of precast concrete products⁷

Таблица
Технические характеристики типоразмерного ряда
Источник: составлено авторами.

Table
Technical characteristics of the standard-size range
Source: compiled by the authors.

Наименование параметра	Тип оборудования		
	легкий	средний	тяжелый
Масса рабочего органа, кг	1000	4000	8000
Масса вибратора, кг	100	400	800
Коэффициент жесткости рабочего органа, кН/м	22800	98000	210000
Коэффициент жесткости вибратора, кН/м	1700	7350	15800
Коэффициент демпфирования вибратора, Н·с/м	5780	24000	51000
Статический момент дебалансов, кг·м	0,11	0,44	0,88
Вынуждающая сила, Н	2500	10000	20000
Амплитуда колебаний рабочего органа, мм	1	1	1
Амплитуда колебаний вибратора, мм	1	2	2,5
Частота колебаний, р/с	150	150	150
Мощность, кВт	0,65	10,4	42,5

⁷ Масса ЖБИ изделий - Справочник массы [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL.: <https://wikiweight.info/strmat/massa-zhbi.html> - (дата обращения: 16.09.2023).

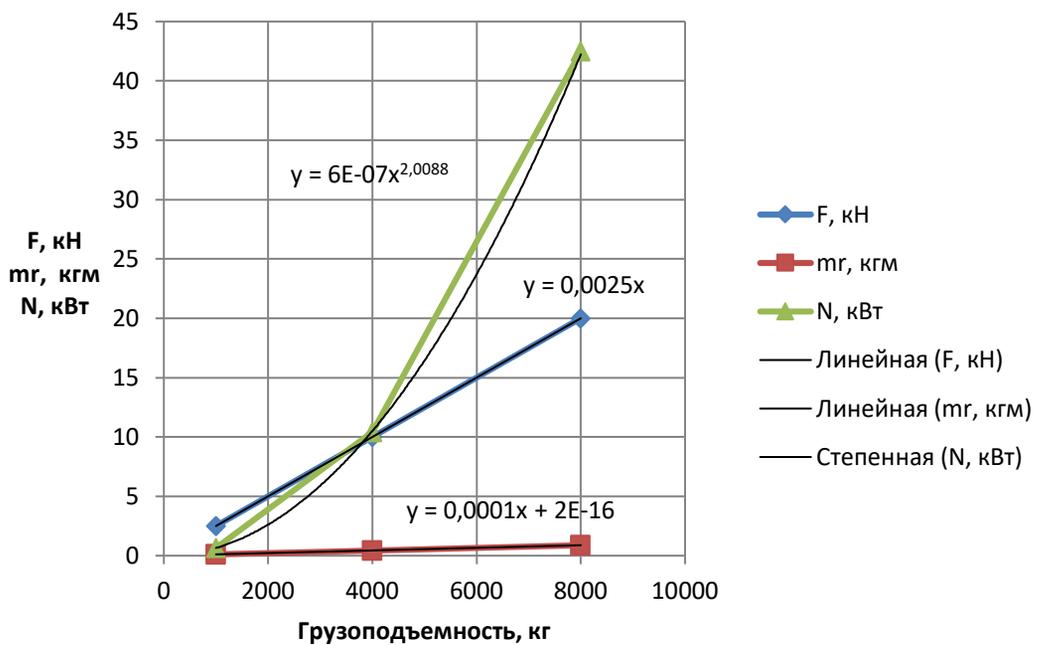
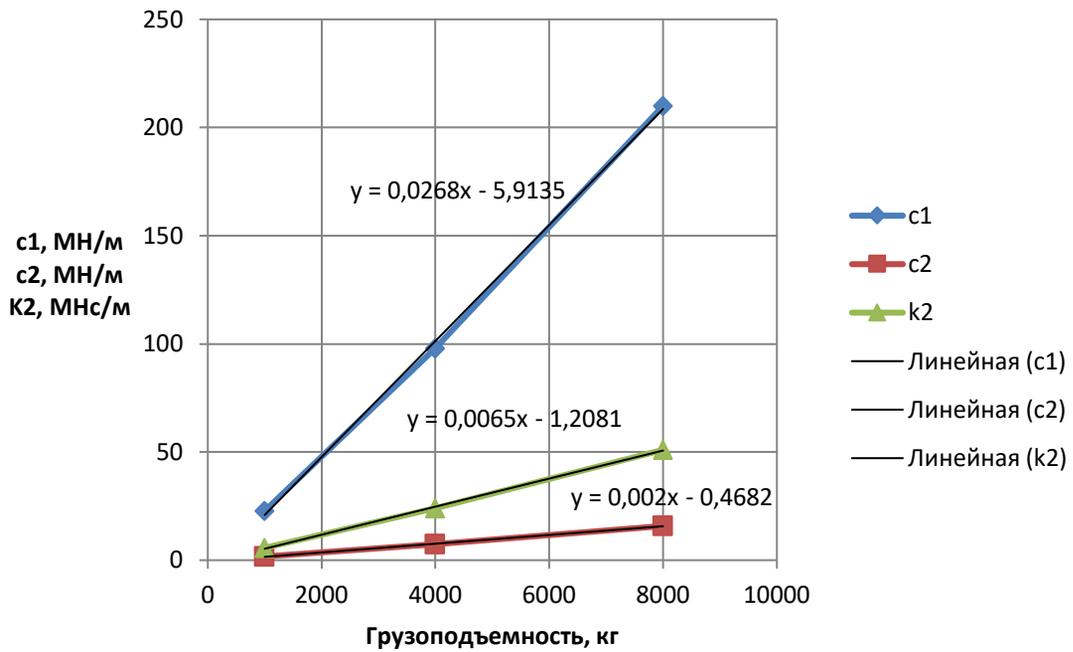


Рисунок 4 – Зависимость основных параметров резонансного вибрационного оборудования от его грузоподъемности: c_1 – жесткость упругого элемента рабочего органа; c_2 – жесткость упругого элемента вибратора; k_2 – коэффициент демпфирования вибратора; F – вынуждающая сила вибратора; mr – статический момент дебаланса; N – мощность на привод вибратора
 Источник: составлено авторами.

Fig. 4. – Dependence of the main parameters of resonant vibration equipment on its load capacity: c_1 – is the stiffness of the elastic element of the working body; c_2 – is the stiffness of the elastic element of the vibrator; k_2 – is the damping coefficient of the vibrator; F – is the driving force of the vibrator; mr – is the static moment of unbalance; N is the power to drive the vibrator
 Source: compiled by the authors.

Широкий спектр номенклатуры и масс сборного железобетона предполагает применение различного по грузоподъемности оборудования. На рисунке 3 представлены некоторые изделия и их массы⁸.

Указанное обстоятельство легло в основу разработки типоразмерного ряда резонансного вибрационного оборудования для уплотнения бетонных смесей: легкого (до 2 т), среднего (2–6 т) и тяжелого (6–10 т) типа.

Для качественного уплотнения бетонной смеси необходима интенсивность вибрации в пределах 80–300 см²/с³, которую обеспечивают большинство современных виброплощадок⁹. Исходя из амплитуды $A=1$ мм и интенсивности на уровне $I=150$ см²/с³, частота колебаний составит $w=150$ р/с.

По результатам выполненных исследований разработан типоразмерный ряд вибрационного резонансного оборудования, технические характеристики которого представлены в таблице.

При амплитуде колебаний рабочего органа $x_1=1$ мм приводная мощность для оборудования легкого, среднего и тяжелого типа составляет 0,65; 10,4 и 42,5 кВт соответственно.

В результате выполненных исследований получены зависимости основных параметров от грузоподъемности резонансного вибрационного оборудования (рисунок 4).

Анализ полученных зависимостей показывает, что все они, кроме мощности на привод вибратора, пропорциональны грузоподъемности резонансного вибрационного оборудования. Мощность нарастает по параболической зависимости, т.к. одновременно с массой рабочего органа возрастает коэффициент демпфирования вибратора.

На основе анализа и обобщения результатов исследований разработана методика расчета резонансного вибрационного оборудования, которая включает в себя следующие основные положения.

1. Исходя из номенклатуры и массы изделия, определяется грузоподъемность вибрационного оборудования.

2. С учетом желаемых ширины резонансной зоны и коэффициента динамичности системы определяется соотношение масс рабочего органа и вибратора (см. рисунок 2).

3. По существующим рекомендациям по уплотнению бетонных смесей выбирается амплитуда колебаний.

4. С учетом интенсивности определяется частота колебаний рабочего органа

$$w_1 = \sqrt[3]{\frac{I}{A^2}},$$

где w_1 – частота колебаний рабочего органа, 1/с;

I – интенсивность колебаний, см²/с³;

A – амплитуда колебаний, см;

5. Жесткость упругого элемента рабочего органа определяется

$$c_1 = m_1 w_1^2,$$

где c_1 – жесткость упругого элемента рабочего органа, Н/м;

m_1 – масса рабочего органа, кг;

w_1 – частота колебаний, р/с.

6. Жесткость упругого элемента вибратора определяется из соотношения

$$c_2 = \frac{c_1 m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2}.$$

7. Из условия существования расширенной резонансной зоны АЧХ коэффициент демпфирования находится в зависимости от массы рабочего органа

$$k_2 = 0,065 m_1 - 1,2.$$

8. По найденным значениям основных параметров дальнейший расчет вибрационного оборудования ведется по существующим методикам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований разработан типоразмерный ряд резонансного вибрационного оборудования для уплотнения бетонных смесей и методики расчета его основных параметров, позволяющих повысить энергоэффективность вибрационного оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лян И. П., Пановко Г. Я., Шохин А. Е. Сравнительный анализ энергоэффективности при использовании технологических машин вибрационного

⁸ Масса ЖБИ изделий - Справочник массы [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL.: <https://wikiweight.info/strmat/massa-zhbi.html> - (дата обращения: 16.09.2023).

⁹ Основные положения вибрирования бетонной смеси [Электронный ресурс] Режим доступа: URL.: <https://msd.com.ua/tehnologiya-betonnyx-i-zhelezobetonnyx-izdelii/osnovnye-polozheniya-teorii-vibrirvaniya-betonnoj-smesi/> (дата обращения: 16.09.2023).

типа в резонансном и сверхрезонансном режимах работы // Обогащение руд. 2019. № 6. С.42–49.

2. Гнездилов А. А. О реализации резонансных режимов технологических вибрационных машин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2019. № 1 (171). С. 159–163.

3. Антипов В. И., Асташев В. К. О принципах создания энергосберегающих вибрационных машин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. № 4. С. 3–8.

4. Асташев В. К. О новых направлениях использования явления резонанса в машинах [Электронный ресурс] // Вестник научно-технического развития: интернет-журнал. № 8(48). 2011. <http://www.vntr.ru/nomera/2011-848/> (14.12.2011). – 0421100120\0032

5. Денцов Н. Н. Перспективы развития резонансной вибрационной техники // Современные тенденции развития науки и технологий. 2015. № 2-2. С. 66–68.

6. Дмитриев В. Н., Горбунов А. А. Резонансный вибрационный электропривод машин и установок с автоматическим управлением // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11, № 3. С. 310–314.

7. Yatsun V., Filimonikhin G., Dumenko K., Nevdakha A. Equations of motion of vibration machines with a translational motion of platforms and a vibration exciter in the form of a passive auto-balancer // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 5. No. 1. P. 19–25

8. Федоренко И. Я., Гнездилов А. А. Динамические свойства двухмассной вибрационной технологической машины // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2016. № 3 (137). С. 179–183.

9. Зедгенизов В. Г., Файзов С. Х. Исследование влияния основных параметров двухмассовой колебательной системы на ее динамические характеристики // iPolytech Journal. 2022. Т. 26, № 2. С. 164–172.

10. Зедгенизов В. Г., Файзов С. Х. Влияние точки приложения вынуждающей силы в двухмассовой колебательной системе на ее энергоэффективность // Вестник СибАДИ. 2023;20(1):12-23. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-12-23>

REFERENCES

1. Ljan I. P., Panovko G. Ja., Shohin A. E. Sravnitel'nyj analiz jenergojeffektivnosti pri ispol'zovanii tehnologicheskikh mashin vibracionnogo tipa v rezonansnom i sverhrezonansnom rezhimah raboty [Comparative analysis of energy efficiency when using vibration-type technological machines in resonant and super-resonant operating modes]. *Obogashhenie rud.* 2019; 6: 42 – 49. (in Russ.)

2. Gnezdilov A. A. Implementation of resonant modes of technological vibration machines. *Bulletin of Altai State Agrarian University.* 2019. No. 1 (171). pp. 159 – 163. (in Russ.)

3. Antipov V. I., Astashev V. K. O principah sozdaniya jenergosberegajushhih vibracionnyh mashin [On the principles of creating energy-saving vibration machines. Problems of mechanical engineering and machine reliability]. *Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin.* 2004; 4: 3–8. (in Russ.)

4. Astashev V. K. O novyh napravlenijah ispol'zovanija javlenija rezonansa v mashinah [Jelektronnyj resurs] [On new directions for using the phenomenon of resonance in machines]. *Vestnik nauchno-technicheskogo razvitija: internet-zhurnal.* 2011; 8(48). <http://www.vntr.ru/nomera/2011-848/> (14.12.2011). 0421100120\0032. (in Russ.)

5. Dencov N. N. Perspektivy razvitija rezonansnoj vibracionnoj tehniki [Prospects for the development of resonant vibration technology]. *Sovremennye tendencii razvitija nauki i tehnologii.* 2015; 2-2: 66 –68. (in Russ.)

6. Dmitriev V. N., Gorbunov A. A. Resonant vibration electric drive of machines and plants with automatic control. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* 2009. T. 11, No. 3. pp. 310–314. (in Russ.)

7. Yatsun V., Filimonikhin G., Dumenko K., Nevdakha A. Equations of motion of vibration machines with a translational motion of platforms and a vibration exciter in the form of a passive auto-balancer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2017; Vol. 5. No. 1:19–25

8. Fedorenko I. Ja., Gnezdilov A. A. Dinamicheskie svojstva dvuhmassnoj vibracionnoj tehnologicheskoy mashiny [Dynamic properties of a two-mass vibration technological machine]. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.* 2016; 3 (137): 179–183. (in Russ.)

9. Zedgenizov V.G., Fayzov S.Kh. Influence of the main parameters of a dual-mass oscillation system on its dynamic characteristics. *iPolytech Journal.* 2022; T. 26. No. 2: 164-172. (in Russ.)

10. Zedgenizov V.G., Faizov S.K. Impact of force application point in two-mass oscillation system on its energy efficiency. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2023;20(1):12-23. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-12-23>

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Участие авторов в подготовке и написании статьи выражается в равных долях.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

The participation of the authors in the preparation and writing of the article is expressed in equal shares.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зедгенизов Виктор Георгиевич – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры строительных, дорожных машин и гидравлических систем, SPIN-код: 9565-419.

Файзов Сорбон Хотамович – аспирант кафедры строительных, дорожных машин и гидравлических систем.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktor G. Zedgenizov – Dr. of Sci., Professor, Professor of the Construction, Road Machines and Hydraulic Systems Department, SPIN-код: 9565-419.

Sorbon Kh. Faizov – Postgraduate student of the Construction, Road Machines and Hydraulic Systems Department.

Научная статья
УДК 625.08
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-548-559>
EDN: LACWPD



РАСЧЁТ НЕОБХОДИМОЙ МОЩНОСТИ НА ПРИВОД НАКОНЕЧНИКА МАЛОГО РОТОРА

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. Ранее определена конструктивная компоновка малого ротора, рассчитана высота спирали спирального ножа. Путём анализа взаимодействия элементов рабочих органов прямоточного роторного рыхлителя с грунтом необходимо выявить мощность на привод наконечника малого ротора.

Методика исследования. Разработаны методики расчётов: мощности на внедрение конуса в грунт, мощности на трение конуса о грунт, мощности на внедрение торца спирального ножа в грунт, мощности на внедрение спирального ножа в грунт в радиальном направлении, мощности на преодоление трения спирального ножа о грунт, мощности на преодоление силы противодействия грунта вращению спирального ножа.

Результаты. На основе разработанных методик произведены расчёты параметров. Из пространственных моделей сил взаимодействия с грунтом спирального ножа выявлены их равнодействующие, нормальные силы, силы противодействия грунта вращению спирального ножа, вычислены силы трения грунта о задние поверхности первого и второго витка спирального ножа. Рассчитана суммарная мощность на привод наконечника малого ротора и объёмная энергия на внедрение конуса со спиральным ножом в грунт.

Заключение. Суммарная мощность на привод наконечника малого ротора включает: мощность на внедрение конуса в грунт; мощность на трение конуса о грунт; мощность на внедрение торца спирального ножа в грунт; мощность на внедрение спирального ножа в грунт в радиальном направлении; мощность на преодоление трения спирального ножа о грунт; мощность на преодоление силы противодействия грунта вращению спирального ножа. Необходимая мощность на привод наконечника малого ротора 1127 Вт. Объёмная энергия на внедрение конуса со спиральным ножом в грунт 16,9 кДж/куб. м.

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

Статья поступила в редакцию 05.07.2023; одобрена после рецензирования 10.08.2023; принята к публикации 24.10.2023.

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 необходимой мощности на привод наконечника малого ротора // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 5 (93). С. 548-559. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-548-559>

© Николаев В. А., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-548-559>
EDN: LACWPD

REQUIRED POWER CALCULATION TO SMALL ROTOR TIP DRIVE

Vladimir A. Nikolaiev

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 coaxially with a large rotor should be installed. The small rotor contains of a small rotor tip with spiral knives, two teeth and two knives. Previously, the structural layout of the small rotor was determined, the height of the spiral of the spiral knife was calculated. By analyzing the interaction of the elements of the working bodies of the direct-flow rotary ripper with the soil, it is necessary to identify the power on the drive of the tip of the small rotor.

The method of research. The calculation methods of power for the introduction of a cone into the ground, power for friction of the cone on the ground, power for the introduction of the end of the spiral knife into the ground, power for the introduction of a spiral knife into the ground in the radial direction, power to overcome the friction of the spiral knife on the ground, power to overcome the force of resistance of the soil to the rotation of the spiral knife have been developed.

Results. On the basis of the developed methods, the parameters were calculated. From the spatial models of the forces of interaction with the soil of the spiral knife, their resultant, normal forces, the forces of resistance of the soil to the rotation of the spiral knife are revealed, the friction forces of the soil on the rear surfaces of the first and second turns of the spiral knife are calculated. The total power for the drive of the tip of the small rotor and the volumetric energy for the introduction of a cone with a spiral knife into the ground are calculated.

Conclusion. The total power for the drive of the tip of the small rotor includes power for the introduction of the cone into the ground, power for friction of the cone on the ground, power for the introduction of the end of the spiral knife into the ground; power for the introduction of a spiral knife into the ground in the radial direction, power to overcome the friction of the spiral knife on the ground, power to overcome the force of resistance of the soil to the rotation of the spiral knife. The required power to drive the tip of the small rotor is 1127 W. The volumetric energy for the introduction of a cone with a spiral knife into the ground is 16.9 kJ / cubic meter.

KEYWORDS: construction, roads, continuous units, direct-flow rotary ripper, small rotor, tip, spiral knife

The article was submitted 05.07.2023; approved after reviewing 10.08.2023; accepted for publication 24.10.2023.

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. Vladimir A. Nikolaiev Required power calculation to small rotor tip drive. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (5): 548-559. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-548-559>

© Nikolaiev V. A., 2023



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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ:

1) разработаны методики расчётов: мощности на внедрение конуса в грунт, мощности на трение конуса о грунт, мощности на внедрение торца спирального ножа в грунт, мощности на внедрение спирального ножа в грунт в радиальном направлении, мощности на преодоление трения спирального ножа о грунт, мощности на преодоление силы противодействия грунта вращению спирального ножа;

2) разработана методика построения пространственных моделей сил взаимодействия с грунтом спирального ножа;

3) из пространственных моделей сил взаимодействия с грунтом спирального ножа выявлены их равнодействующие, нормальные силы, силы противодействия грунта вращению спирального ножа, вычислены силы трения грунта о задние поверхности первого и второго витка спирального ножа;

4) рассчитана суммарная мощность на привод наконечника малого ротора и объёмная энергия на внедрение конуса со спиральным ножом в грунт.

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. Путём логических рассуждений, расчётов, построений в плоскости

и пространстве определены геометрические и режимные параметры большого ротора прямооточного роторного рыхлителя диаметром 1 метр [3]. Определён предельно малый радиус расположения окружных и торцевых ножей большого ротора. 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.

Хотя теоретические основы 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], взаимодействие с грунтом элементов прямооточного роторного рыхлителя почти не изучено. Применение прямооточных роторных рыхлителей для разработки грунта сдерживается недостаточным теоретическим обоснованием их параметров. Ранее в [22, 23] определена конструктивная компоновка малого ротора, рассчитана высота спирали спирального ножа. Путём анализа взаимодействия элементов рабочих органов прямооточного роторного рыхлителя с грунтом необходимо выявить мощность на привод наконечника малого ротора.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Суммарная требуемая мощность на привод наконечника малого ротора включает несколько составляющих:

- мощность на внедрение конуса в грунт;
- мощность на трение конуса о грунт;
- мощность на внедрение торца спирального ножа в грунт;
- мощность на внедрение спирального ножа в грунт в радиальном направлении;
- мощность на преодоление трения спирального ножа о грунт;

¹ Патент РФ № 2735497. Прямоточный роторный рыхлитель / Николаев В.А.; заявл. 09.01.2019 №2019100367; опублик. 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; опублик. 23.12.2019, Бюл. № 36. 13 с.

³ Зыков Б. И. Теория рабочих процессов строительных машин: Учеб. пособие / Б. И. Зыков; М-во образования Рос. Федерации. Яросл. гос. техн. ун-т. Ярославль : [Яросл. гос. техн. ун-т], 2003 (Тип. ЯГТУ). 114 с.

⁴ 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.

⁵ Попов Г. Ф. Рабочие органы фрез: материалы НТС ВИСХОМ. Вып. 27. М.: ОНТИ ВИСХОМ, 1970. С. 490–497.

⁶ 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.

⁷ 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).

- мощность на преодоление силы противодействия грунта вращению спирального ножа.

а) *Мощность на внедрение конуса в грунт*

Допустим, конус без спирального ножа внедряем в грунт. Сила, внедряющая конус в грунт [29],

$$4F_{к1} = \frac{f_{с-г} k p r r l}{\cos 15^\circ}, \quad (1)$$

где $f_{с-г}$ – коэффициент трения грунта о сталь; k – коэффициент, учитывающий увеличение удельного сопротивления грунта по мере его уплотнения конусом; p – удельное сопротивление грунта; r – радиус основания конуса; l – длина образующей; 15° – угол между направлением движения агрегата и образующей конуса. Если подойти строго, следовало бы в числителе вычесть площадь конуса, расположенную под спиральным ножом, но так как она относительно невелика, её пренебрегаем.

Совокупная сила $4F_{к1} = F_{к1} + F_{к2}$ [22]. Радиальная сила $4F_{п1}$ [22] условно приложена с одной стороны конуса, но, если конус заглублён, действует на него в радиальном направлении со всех сторон. Для расчёта на прочность нужно знать максимальную радиальную силу, приложенную к наконечнику малого ротора. Наиболее опасное положение конструкции наконечника малого ротора будет тогда, когда конус заглублён наполовину. В этом положении радиальная сила действует на конус с одной стороны. Если конус заглублён наполовину, то

$$4F_{п1} = \frac{4F_{к1}}{2 \cdot \tan 15^\circ}. \quad (2)$$

Затраты энергии на внедрение конуса в грунт на один метр пути агрегата

$$E_{к} = 4F_{к1} s. \quad (3)$$

Скорость агрегата v_a . Мощность на внедрение конуса в грунт

$$N_{к} = 4F_{к1} v_a. \quad (4)$$

б) *Мощность на трение конуса о грунт*

Допустим, конус без спирального ножа внедряем в грунт. Сила трения конуса о грунт [29]:

$$4F_{т1} = f_{с-г}. \quad (5)$$

Затраты энергии на трение конуса о грунт на один метр пути агрегата

$$E_{тк} = 4F_{т1} s. \quad (6)$$

Скорость агрегата v_a . Мощность на трение конуса о грунт

$$N_{тк} = 4F_{т1} v_a. \quad (7)$$

Исключим влияние внедряющего конуса на грунт, окружающий конус. Примем в расчёт лишь прямое воздействие конуса на грунт в пределах его диаметра. Диаметр наконечника малого ротора d_n . Вычислим расстояние, на которое должен переместиться агрегат, чтобы объём прямого воздействия конуса на грунт был один кубический метр,

$$s = \frac{4 \cdot 1}{\pi d_n^2}. \quad (8)$$

Объёмные затраты энергии на внедрение конуса в грунт и трение конуса о грунт

$$E_{кв} = \frac{(E_{к} + E_{тк}) s}{10^3}. \quad (9)$$

в) *Мощность на внедрение торца спирального ножа в грунт*

Торец спирального ножа, то есть начало его первого витка, при вращении наконечника малого ротора внедряется в грунт около вершины конуса, где уплотнение грунта конусом незначительное [23]. Поэтому уплотнение грунта конусом не учитываем. Рассмотрим внедрение торца спирального ножа, как резание грунта пуансоном. Сила $F_{тс}$, необходимая для внедрения торца спирального ножа в грунт, равна произведению удельного сопротивления грунта p на площадь сечения спирального ножа $S_{сеч}$. Высота витка спирального ножа h . Площадь сечения спирального ножа [23]

$$S_{сеч} = h \cdot h \tan 20^\circ = h^2 \tan 20^\circ; \quad (10)$$

$$F_{тс} = p S_{сеч} = p h^2 \tan 20^\circ.$$

Плечо этой силы [23] $h_{F_{тс}}$. Вращающий момент, необходимый для внедрения торца спирального ножа в грунт,

$$M_{тс} = F_{тс} h_{F_{тс}}. \quad (11)$$

Угловая скорость малого ротора $\omega_{мп}$, поэтому мощность на внедрение торца спирального ножа в грунт

$$N_{тс} = M_{тс} \omega_{мп}. \quad (12)$$

г) *Мощность на внедрение спирального ножа в грунт в радиальном направлении*

Условные силы $F_{с1}$ и $F_{с2}$ воздействия спирального ножа на грунт, параллельные оси малого ротора, можно определить по формулам:

$$F_{с1} = k p S_{1с} \cos \beta_1; F_{с2} = k p S_{2с} \cos \beta_2 \quad [23]. \quad (13)$$

Однако если при расчёте высоты спирального ножа коэффициент k , учитывающий увеличение удельного сопротивления грунта по мере его уплотнения конусом, принимали постоянным, то при расчёте энергии на внедрение лезвия спирального ножа в грунт его следует принять для второго витка спирального ножа большим, чем для первого витка. Площади передних поверхностей витков спирального ножа равны произведению высоты h витка спирального ножа на соответствующие длины l_{c1} и l_{c2} средних линий витков. Тогда формулы (13) будут иметь вид

$$F_{c1} = k_1 p h l_{c1} \cos \beta_1; F_{c2} = k_2 p h l_{c2} \cos \beta_2. \quad (14)$$

Удельное сопротивление грунта p , высота витка спирального ножа h . Длины средних линий витков спирального ножа [23]:

$$\begin{aligned} \text{первого витка} - l_{c1} &= 31,14h + 55,6; \\ \text{второго витка} - l_{c2} &= 31,24h + 127. \end{aligned} \quad (15)$$

Средний наклон оснований витков спиралей принят: первой – $\beta_1=30^\circ$, второй – $\beta_2=15,75^\circ$ [23]. Условные силы, внедряющие конус в грунт, параллельные оси малого ротора [23], F_{c1} и F_{c2} (рисунок 1).

Условными силами воздействия грунта на спиральный нож их назовём потому, что они на рисунке показаны сосредоточенными, действующими в продольно-вертикальной плоскости, воздействующими лишь на фрагмент спирального ножа. Реальные силы распределены по поверхности спирального ножа. Витки спирального ножа при ввинчивании в грунт разрежут его и переместятся на расстояние $s=11,5$ мм в радиальном направлении в положение, показанное штриховыми линиями. Радиальному перемещению передних поверхностей витков спирального ножа противодействуют условные силы F_{nc1} и F_{nc2} . Эти условные силы приложены к точкам A и B передних поверхностей сечений, соответственно, первого и второго витка спирального ножа. Радиальному перемещению задних поверхностей витков спирального ножа противодействуют условные силы F_{zc1} и F_{zc2} . Эти условные силы приложены к точкам C и D задних поверхностей сечений, соответственно, первого и второго витка спирального ножа. Рассматривая резание спиральным ножом грунта в радиальном направлении как резание пуансоном, можно определить эти силы:

$$F_{nc1} = k_1 p b_{nc1} l_{c1}; F_{nc2} = k_2 p b_{nc2} l_{c2}; \quad (16)$$

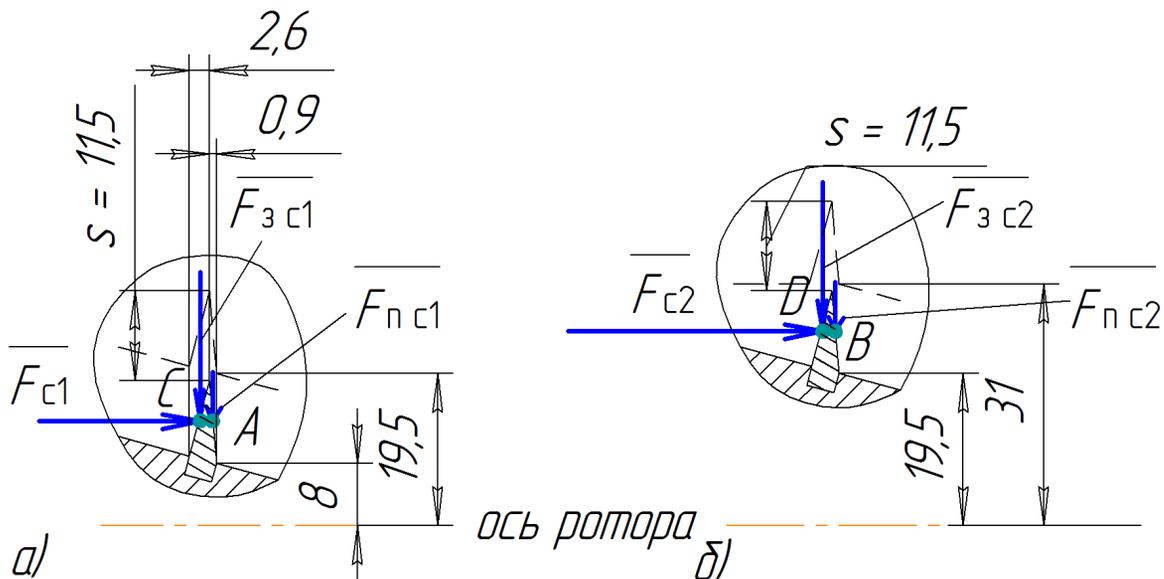


Рисунок 1 – Схема условных сил воздействия грунта на спиральный нож в продольной плоскости: а – на первый виток; б – на второй виток
Источник: составлено автором.

Figure 1 –Diagram of the conditional forces with impact of soil on the spiral knife in the longitudinal plane: а – on the first turn; б – on the second turn
Source: compiled by the authors.

$$F_{3c1} = k_1 p b_{3c1} l_{c1}; F_{3c2} = k_2 p b_{3c2} l_{c2}. \quad (17)$$

Ширина воздействия передней поверхности спирального ножа, из рисунка 1, $b_{nc1} = b_{nc2}$. Ширина воздействия задней поверхности спирального ножа $b_{3c1} = b_{3c2}$. Длины средних линий витков спирального ножа, соответственно, l_{c1}, l_{c2} .

Так как перемещение витков спирального ножа в радиальном направлении при ввинчивании в грунт на один оборот $s = 11,5 \text{ мм} = 0,0115 \text{ м}$ [23], то энергия на внедрение спирального ножа в грунт

$$E_{вс} = (F_{nc1} + F_{nc2} + F_{3c1} + F_{3c2})s. \quad (18)$$

Угловая скорость малого ротора $\omega_{мп} = 12,9 \text{ рад/с}$. За секунду витки спирального ножа сделают обороты, перемещая грунт в радиальном направлении,

$$n_{мп} = \frac{\omega_{мп}}{2\pi}. \quad (19)$$

Мощность, необходимая для внедрения спирального ножа в грунт в радиальном направлении,

$$N_{вс} = E_{вс} n_{мп}. \quad (20)$$

д) *Мощность на преодоление трения спирального ножа о грунт*

На рисунке 2 показана пространственная схема сил воздействия грунта на фрагмент (жёлтый) поверхности первого витка спирального ножа. Условно изобразим силы сосредоточенными. На переднюю поверхность первого витка спирального ножа действует сила F_{nc1} (сиреневый вектор). Нормальная реакция передней поверхности на эту силу (малый тёмно-синий вектор) очень мала. Сила трения грунта о переднюю поверхность спирального ножа незначительная.

На заднюю поверхность первого витка спирального ножа действует сила F_{3c1} (коричневый вектор) и сила F_{c1} (зелёный вектор). Сложив эти силы, из пространственной модели получим равнодействующую R_{3c1} (голубой вектор). Разложим равнодействующую на нормальную силу N_{3c1} (синий вектор) и силу противодействия грунта вращению спирального ножа $F_{пр c1}$ (серый вектор). Примем коэффициент трения стали о грунт $f_{с-г}$. Сила трения грунта о заднюю поверхность первого витка спирального ножа $F_{т3c1} = f_{с-г} N_{3c1}$ (красный вектор).

На рисунке 3 показана пространственная схема сил воздействия грунта на фрагмент (жёлтый) поверхности второго витка спирального ножа (цвет векторов аналогичный). Силы, воздействующие на переднюю поверхность второго витка спирального ножа, не показаны, так как сила трения грунта о переднюю поверхность спирального ножа незначительна.

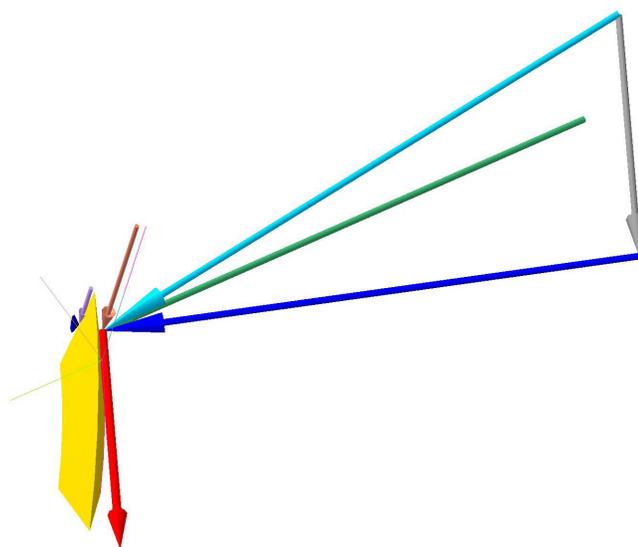


Рисунок 2 – Пространственная схема сил воздействия грунта на первый виток спирального ножа
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Spatial diagram of the forces with soil impact on the first turn of the spiral knife
Source: compiled by the authors.

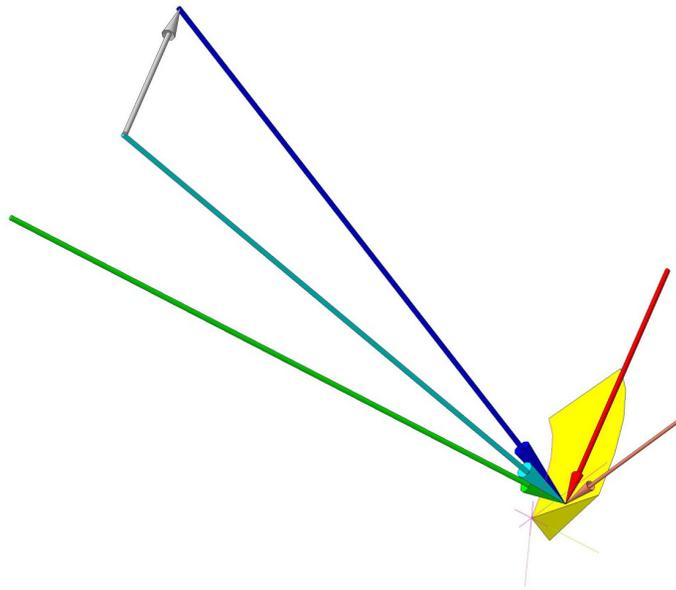


Рисунок 3 – Пространственная схема сил воздействия грунта на второй виток спирального ножа
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Spatial diagram of the forces with soil impact on the second turn of the spiral knife
Source: compiled by the authors.

В результате построений получены: равнодействующая R_{3c2} (голубой вектор), нормальная сила N_{3c2} (синий вектор) и сила противодействия грунта вращению спирального ножа $F_{пр c2}$ (серый вектор). Сила трения грунта о переднюю поверхность второго витка спирального ножа $F_{т c2} = f_{с-г} N_{3c2}$ (красный вектор).

Среднее плечо силы трения первого витка спирального ножа [23]:

$$h_{F_{т c1}} = \frac{(8+19,5)}{2} + \frac{h}{2}. \quad (21)$$

Вращающий момент, необходимый для преодоления силы трения первого витка спирального ножа о грунт,

$$M_{т c1} = F_{т c1} h_{F_{т c1}}. \quad (22)$$

Угловая скорость малого ротора $\omega_{мр}$. Мощность на преодоление силы трения первого витка спирального ножа о грунт

$$N_{т c1} = M_{т c1} \omega_{мр}. \quad (23)$$

Среднее плечо силы трения второго витка спирального ножа [23]:

$$h_{F_{т c2}} = \frac{(19,5+31)}{2} + \frac{h}{2}. \quad (24)$$

Вращающий момент, необходимый для преодоления силы трения второго витка спи-

рального ножа о грунт,

$$M_{т c2} = F_{т c2} h_{F_{т c2}}. \quad (25)$$

Мощность на преодоление силы трения второго витка спирального ножа о грунт

$$N_{т c2} = M_{т c2} \omega_{мр}. \quad (26)$$

Общая мощность на преодоление силы трения спирального ножа о грунт

$$N_{т c} = N_{т c1} + N_{т c2}. \quad (27)$$

е) *Мощность на преодоление силы противодействия грунта вращению спирального ножа*

Так как витки спирального ножа наклонены к поперечно-вертикальной плоскости, то возникают силы противодействия грунта вращению спирального ножа $F_{пр c1}$ и $F_{пр c2}$ (серые векторы на рисунках 2 и 3). Сила противодействия грунта вращению первого витка спирального ножа больше силы противодействия грунта вращению второго витка спирального ножа, так как угол наклона первого витка к поперечно-вертикальной плоскости больше, чем второго витка спирального ножа. Средние плечи этих сил $h_{F_{пр c1}}$ и $h_{F_{пр c2}}$. Вращающие моменты, необходимые для преодоления этих сил, соответственно:

$$M_{\text{пр c1}} = F_{\text{пр c1}} h_{F_{T3 c1}}; M_{\text{пр c2}} = F_{\text{пр c2}} h_{F_{T3 c2}}. \quad (28)$$

Угловая скорость малого ротора $\omega_{\text{мр}}$. Мощность на преодоление сил противодействия грунта вращению первого и второго витка спирального ножа:

$$N_{\text{пр c1}} = M_{\text{пр c1}} \omega_{\text{мр}}; N_{\text{пр c2}} = M_{\text{пр c2}} \omega_{\text{мр}}. \quad (29)$$

Мощность на преодоление противодействия грунта вращению витков спирального ножа

$$N_{\text{пр c}} = N_{\text{пр c1}} + N_{\text{пр c2}}. \quad (30)$$

Суммарная требуемая мощность на привод спирального ножа

$$N_c = N_k + N_{T_k} + N_{B_c} + N_{T_c} + N_{\text{пр c}}; \quad (31)$$

Перемещение агрегата для разработки грунта объёмом один кубический метр:

$$s = 1: \frac{\pi D_{6p}^2}{4}. \quad (32)$$

Объёмная энергия на внедрение конуса со спиральным ножом в грунт

$$u_{k+c} = \frac{N_c}{\tau} = \frac{N_c s}{v_a \cdot 10^3}, \quad (33)$$

где v_a – скорость агрегата; τ – время перемещения агрегата для разработки грунта объёмом один кубический метр.

РЕЗУЛЬТАТЫ

а) Мощность на внедрение конуса в грунт

Допустим, что конус без спирального ножа внедряем в грунт. Коэффициент трения грунта о сталь примем $f_{c-r} \approx 0,5$. Коэффициент k , учитывающий увеличение удельного сопротивления грунта по мере его уплотнения конусом, зависит от многих факторов, поэтому его следует уточнять в конкретных расчётах, основываясь на экспериментальных данных. Для ориентировочного расчёта примем $k=1,2$. Удельное сопротивление грунта $p = \sigma_{cm}^B = 0,3$ МПа. Радиус основания конуса [22] $r=31$ мм, длина образующей $l=120$ мм. Сила, внедряющая конус в грунт (1),

$$F_{k1} = \frac{0,5 \cdot 1,2 \cdot 0,3 \cdot 3,14 \cdot 31 \cdot 120}{0,966} = 2176 \text{ Н.}$$

Если конус заглублён наполовину, максимальная радиальная сила, приложенная к наконечнику малого ротора (2):

$$4F_{k1} = \frac{2176}{2 \cdot 0,268} = 4060 \text{ Н.}$$

Затраты энергии на внедрение конуса в грунт на один метр пути агрегата (3):

$$E_k = 4F_{k1}s; E_k = 2176 \text{ Дж/м.}$$

Скорость агрегата $v_a=0,085$ м/с. Мощность на внедрение конуса в грунт (4):

$$N_k = 2176 \cdot 0,085 = 185 \text{ Вт.}$$

б) Мощность на трение конуса о грунт

Допустим, конус без спирального ножа внедряем в грунт. Сила трения конуса о грунт (5):

$$4F_{T1} = 0,5 \cdot 1,2 \cdot 0,3 \cdot 3,14 \cdot 31 \cdot 120 = 2102 \text{ Н.}$$

Затраты энергии на трение конуса о грунт на один метр пути агрегата (6):

$$E_{T_k} = 2102 \text{ Дж/м.}$$

Скорость агрегата $v_a=0,085$ м/с. Мощность на трение конуса о грунт (7):

$$N_{T_k} = 2102 \cdot 0,085 \approx 180 \text{ Вт.}$$

Диаметр наконечника малого ротора $d_H=62$ мм= $0,062$ м [29]. Расстояние, на которое должен переместиться агрегат, чтобы объём прямого воздействия конуса на грунт был один кубический метр, (8):

$$s = \frac{4 \cdot 1}{\pi d_H^2}; s = \frac{4}{3,14 \cdot 0,062^2} = 333,333 \text{ м.}$$

Объёмные затраты энергии на внедрение конуса в грунт и трение конуса о грунт (9):

$$E_{kV} = \frac{(2176+2102) \cdot 333,333}{10^3} = 1426 \text{ кДж/м}^3.$$

в) Мощность на внедрение торца спирального ножа в грунт

Предположим, удельное сопротивление грунта $p=0,3$ МПа. Высота витка спирального ножа $h=10$ мм [30]. Сила, необходимая для внедрения торца спирального ножа в грунт (10),

$$F_{T_c} = 0,3 \cdot 10^2 \cdot 0,364 \approx 11 \text{ Н.}$$

Плечо этой силы [30]
 $h_{F_{T_c}} = 8 + h/2 = 13$ мм = $0,013$ м.

Вращающий момент, необходимый для внедрения торца спирального ножа в грунт (11),

$$M_{Tc} = 11 \cdot 0,013 = 0,143 \text{ Нм.}$$

Угловая скорость малого ротора $\omega_{mp} = 12,9 \text{ рад/с}$ [22], поэтому мощность на внедрение торца спирального ножа в грунт (12) $N_{Tc} = 0,143 \cdot 12,9 = 1,8 \text{ Вт}$.

Мощность на внедрение торца спирального ножа в грунт незначительная, поэтому затратами энергии на внедрение торца спирального ножа в грунт можно пренебречь.

г) *Мощность на внедрение спирального ножа в грунт в радиальном направлении*

Высота витка спирального ножа $h = 10 \text{ мм}$ [23]. Длины средних линий витков спирального ножа (15):

$$\text{первого витка } l_{c1} = 31,14 \cdot 10 + 55,6 = 367 \text{ мм,}$$

$$\text{второго витка } l_{c2} = 31,24 \cdot 10 + 127 \approx 440 \text{ мм.}$$

Примем коэффициенты $k_1 = 1,1$, $k_2 = 1,3$. Удельное сопротивление грунта принято $p = 0,3 \text{ МПа}$. Средний наклон оснований витков спиралей принят: первой – $\beta_1 = 30^\circ$, второй – $\beta_2 = 15,75^\circ$. Условные силы, внедряющие конус в грунт, параллельные оси малого ротора (14),

$$F_{c1} = 1,1 \cdot 0,3 \cdot 10 \cdot 367 \cdot 0,866 \approx 1050 \text{ Н;}$$

$$F_{c2} = 1,3 \cdot 0,3 \cdot 10 \cdot 440 \cdot 0,962 \approx 1650 \text{ Н.}$$

Ширина воздействия передней поверхности спирального ножа, из рисунка 1, $a, b_{nc1} = b_{nc2} = 0,9 \text{ мм}$. Ширина воздействия задней поверхности спирального ножа $b_{sc1} = b_{sc2} = 2,6 \text{ мм}$. Длина средних линий витков спирального ножа, соответственно, $l_{c1} = 367 \text{ мм}$, $l_{c2} = 440 \text{ мм}$. Средние величины условных сил воздействия передней и задней поверхности спирального ножа на грунт в радиальном направлении (16,17):

$$F_{nc1} = 1,1 \cdot 0,3 \cdot 0,9 \cdot 367 = 109 \text{ Н;}$$

$$F_{nc2} = 1,3 \cdot 0,3 \cdot 0,9 \cdot 440 = 154 \text{ Н;}$$

$$F_{sc1} = 1,1 \cdot 0,3 \cdot 2,6 \cdot 367 = 315 \text{ Н;}$$

$$F_{sc2} = 1,3 \cdot 0,3 \cdot 2,6 \cdot 440 = 446 \text{ Н.}$$

Так как перемещение витков спирального ножа в радиальном направлении при ввинчивании в грунт на один оборот $s = 11,5 \text{ мм} = 0,0115 \text{ м}$ (см. рисунок 1, а), то энергия на внедрение спирального ножа в грунт (18):

$$E_{bc} = (109 + 154 + 315 + 446) \cdot 0,0115 = \\ = 11,776 \text{ Дж.}$$

Угловая скорость малого ротора $\omega_{mp} = 12,9 \text{ рад/с}$. За секунду витки спирального ножа сделают оборотов, перемещая грунт в радиальном направлении (19),

$$n_{mp} = \frac{12,9}{2 \cdot 3,14} \approx 2,054 \text{ об/с.}$$

Мощность, необходимая для внедрения спирального ножа в грунт в радиальном направлении (20),

$$N_{bc} = 11,776 \cdot 2,054 \approx 24 \text{ Вт.}$$

д) *Мощность на преодоление трения спирального ножа о грунт*

Из пространственной модели (см. рисунок 2) получим равнодействующую $R_{3c1} = 1096 \text{ Н}$ (голубой вектор). Разложим равнодействующую на нормальную силу $N_{3c1} = 962 \text{ Н}$ (синий вектор) и силу противодействия грунта вращению спирального ножа $F_{np c1} = 524 \text{ Н}$ (серый вектор). Примем коэффициент трения стали о грунт $f_{c-r} = 0,5$. Сила трения грунта о переднюю поверхность первого витка спирального ножа равна половине нормальной силы N_{3c1} , то есть $F_{T3c1} = 481 \text{ Н}$ (красный вектор).

В результате построений (см. рисунок 3) равнодействующая $R_{3c2} = 1710 \text{ Н}$ (голубой вектор), нормальная сила $N_{3c2} = 1650 \text{ Н}$ (синий вектор) и сила противодействия грунта вращению спирального ножа $F_{np c2} = 447 \text{ Н}$ (серый вектор). Сила трения грунта о переднюю поверхность второго витка спирального ножа равна половине нормальной силы N_{3c2} , то есть $F_{T3c2} = 825 \text{ Н}$ (красный вектор).

Среднее плечо силы трения первого витка спирального ножа (21):

$$h_{F_{T3c1}} = 13,75 + \frac{10}{2} = 18,75 \text{ мм} = 0,01875 \text{ м.}$$

Вращающий момент, необходимый для преодоления силы трения первого витка спирального ножа о грунт (22),

$$M_{T3c1} = 481 \cdot 0,01875 \approx 9 \text{ Нм.}$$

Угловая скорость малого ротора $\omega_{mp} = 12,9 \text{ рад/с}$. Мощность на преодоление силы трения первого витка спирального ножа о грунт (23):

$$N_{Tc1} = 9 \cdot 12,9 \approx 116 \text{ Вт.}$$

Среднее плечо силы трения второго витка спирального ножа (24):

$$h_{F_{T3c2}} = 25,25 + \frac{10}{2} = 30,25 \text{ мм} = 0,03025 \text{ м.}$$

Вращающий момент, необходимый для преодоления силы трения второго витка спирального ножа о грунт (25),

$$M_{T_{3c2}} = F_{T_{3c2}} h_{F_{T_{3c2}}};$$

$$M_{T_{3c2}} = 825 \cdot 0,03025 \approx 25 \text{ Нм.}$$

Мощность на преодоление силы трения второго витка спирального ножа о грунт (26):

$$N_{T_{c2}} = 25 \cdot 12,9 \approx 322 \text{ Вт.}$$

Общая мощность на преодоление силы трения спирального ножа о грунт (27):

$$N_{T_c} = 116 + 322 = 438 \text{ Вт.}$$

е) Мощность на преодоление силы противодействия грунта вращению спирального ножа

Силы противодействия грунта вращению спирального ножа $F_{np\ c1} = 524 \text{ Н}$ и $F_{np\ c2} = 447 \text{ Н}$. Средние плечи этих сил $h_{F_{T_{3c1}}} = 0,01875 \text{ м}$ и $h_{F_{T_{3c2}}} = 0,03025 \text{ м}$. Вращающие моменты, необходимые для преодоления этих сил, соответственно (28):

$$M_{np\ c1} = 524 \cdot 0,01875 = 9,8 \text{ Нм;}$$

$$M_{np\ c2} = 447 \cdot 0,03025 = 13,5 \text{ Нм.}$$

Угловая скорость малого ротора $\omega_{mp} = 12,9 \text{ рад/с}$. Мощность на преодоление сил противодействия грунта вращению первого и второго витка спирального ножа (29):

$$N_{np\ c1} = 9,8 \cdot 12,9 = 126 \text{ Вт;}$$

$$N_{np\ c2} = 13,5 \cdot 12,9 = 174 \text{ Вт.}$$

Мощность на преодоление противодействия грунта вращению первого витка спирального ножа приблизительно в 1,5 раза меньше мощности противодействия грунта вращению второго витка спирального ножа, так как меньше среднее плечо силы.

Ранее [23] оставили первый виток спирального ножа без изменений, не укорачивая его. Результаты расчёта мощности противодействия грунта вращению первого и второго витка спирального ножа подтвердили правильность этого решения. Если укоротить первый виток спирального ножа, для соблюдения равновесия наконечника малого ротора необходимо будет увеличить высоту витков спирального ножа. Это приведёт к увеличению мощности на резание спиральным ножом, а также увеличению плеч сил, следовательно, к увеличению мощностей на преодоление силы трения спирального ножа о грунт и силы противодействия грунта вращению спирального ножа.

Мощность на преодоление противодействия грунта вращению витков спирального ножа (30):

$$N_{pp\ c} = 126 + 174 = 300 \text{ Вт.}$$

Суммарная требуемая мощность на внедрение, трение конуса и привод спирального ножа (31):

$$N_c = 185 + 180 + 24 + 438 + 300 = 1127 \text{ Вт.}$$

Скорость агрегата $v_a = 0,085 \text{ м/с}$. Перемещение агрегата для разработки грунта объёмом один кубический метр (32):

$$s = 1: \frac{3,14 \cdot 1^2}{4} \approx 1,274 \text{ м.}$$

Объёмная энергия на внедрение конуса со спиральным ножом в грунт (33):

$$u_{k+c} = \frac{1127 \cdot 1,274}{0,085 \cdot 10^3} = 16,9 \text{ кДж/м}^3.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммарная мощность на привод наконечника малого ротора включает: мощность на внедрение конуса в грунт; мощность на трение конуса о грунт; мощность на внедрение торца спирального ножа в грунт; мощность на внедрение спирального ножа в грунт в радиальном направлении; мощность на преодоление трения спирального ножа о грунт; мощность на преодоление силы противодействия грунта вращению спирального ножа. Необходимая мощность на привод наконечника малого ротора $N_c = 1127 \text{ Вт}$. Объёмная энергия на внедрение конуса со спиральным ножом в грунт $u_{k+c} = 16,9 \text{ кДж/м}^3$.

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*. Москва. 2019 выпуск 41/1. 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. Карнаузов 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., Kurzhner 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. 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.

22. 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>

23. Николаев В.А. Расчёт высоты витка спирального ножа // Вестник СибАДИ. 2023;20(3):326-336. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-326-336>. EDN: TTTTPI

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 ztrat 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 gidrofrezoj [Determine critical cutting depth when combined cutting soils gidrofrezoj]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 5: 47-49. (In Russ)

7. Kirillov F. F. Determinirovannaja matematicheskaja model' vremennogo raspredelenija tjagovogo usilija dlja mnogorezcovyh rabochih organov zemlerojnyh mashin [Deterministic mathematical model of the temporal distribution of traction for mnogorezcovyh 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., Kurzhner 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 upravlyaemykh nozhevyyh 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 usloviyah svobodnogo rezaniya [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-akkumuljativnyj privod ryhlitelja s avtomaticheskim vyborom ugla rezaniya [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 kopaniya gruntov ro-torno-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 prjamym 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. Parhomenko G. G., Parhomenko S. G. Silovoj analiz mehanizmov peremeshhenija rabochih organov pochvoobrabatyvajushhih mashin po zadannoju 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.)

22. 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>

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

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.

Научная статья
УДК 629.113
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-560-572>
EDN: KBOCMW



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО ЛОПАСТНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО АМОРТИЗАТОРА

С. В. Козелетов¹, С. В. Савельев^{2*}

¹Омский автобронетанковый инженерный институт (филиал) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева, г. Омск, Россия

²Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), г. Омск, Россия

kozeletov_sergey@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-2320-318X>
saveliev_sergval@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4034-2457>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Современные технологии, а также различные способы и схемы, применяемые на данный момент в технике, позволили производить автоматическое управление демпфирующими свойствами амортизаторов, что повышает энергоемкость всей системы поддресоривания. Тем не менее для использования этих решений в практической плоскости необходима разработка математических моделей данных демпфирующих элементов. Такие модели служат теоретическим инструментом изучения описываемых процессов с целью осуществления правильного управляющего воздействия. Что касается таких агрегатов, как управляемые (регулируемые) лопастные амортизаторы, то ранее проведенных по ним исследований явно недостаточно для обеспечения эффективной работы в различных условиях. Объектом настоящего исследования является управляемый лопастной гидравлический амортизатор. Цель данной работы – выполнение теоретических исследований и совершенствование методики расчета управляемых (регулируемых) лопастных гидравлических амортизаторов, в которых в качестве рабочего тела амортизатора применяется магнитореологическая жидкость.

Материалы и методы. Рассмотрена конструкция и принцип работы управляемого лопастного гидравлического амортизатора. Предложена методика расчета и выполнены теоретические исследования по влиянию изменения объемного расхода рабочего тела амортизатора в магнитореологическом дросселе на силы сопротивления повороту лопасти амортизатора.

Результаты теоретических исследований. 1. Представлены результаты теоретических исследований изменения объемного расхода рабочего тела, управляемого гидравлического лопастного амортизатора. 2. Получена математическая модель, которая пригодна для расчета характеристик управляемых (регулируемых) гидравлических лопастных амортизаторов, где в качестве рабочего тела амортизатора применяется магнитореологическая жидкость, а также для выбора управляющего воздействия в системе управления.

Заключение. Результаты исследования предназначены для организаций и предприятий, занимающихся разработкой и производством военных гусеничных машин.

Результаты исследований могут быть использованы для уточнения методики оценки плавности хода ВГМ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: управляемый лопастной амортизатор, математическая модель, магнитореологический дроссель, магнитореологическая жидкость, объемный расход, перепад давления, гидравлическое сопротивление, коэффициент демпфирования, магнитное поле, напряженность магнитного поля

Статья поступила в редакцию 01.06.2023; одобрена после рецензирования 15.09.2023; принята к публикации 24.10.2023.

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: Козелетов С. В., Савельев С. В. Математическая модель управляемого лопастного гидравлического амортизатора // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 5 (93). С. 560-572. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-560-572>

© Козелетов С. В., Савельев С. В., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-560-572>

EDN: KBOCMW

MATHEMATICAL MODEL OF CONTROLLED VANE HYDRAULIC SHOCK ABSORBER

Sergei V. Kozeletov¹, Sergei V. Savelyev^{2*}

¹General A. V. Khrulev Omsk Armored Engineering Institute (branch)
of the Military Academy of Logistics,
Omsk, Russia

²Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia

kozeletov_sergey@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-2320-318X>
savelyev_sergval@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4034-2457>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Modern technologies, as well as various methods and schemes currently used in technology, have made it possible to automatically control the damping properties of shock absorbers, which increases the energy intensity of the entire suspension system. However, in order to use these solutions in practice, it is necessary to develop mathematical models of these damping elements. Such models serve as a theoretical tool for studying the described processes in order to implement the correct control action. As for such units as controlled (adjustable) vane shock absorbers, the studies carried out earlier on them are clearly not enough to ensure their effective operation in various conditions.

The object of this study is a controlled vane hydraulic shock absorber.

The purpose of this work is to carry out theoretical studies and improve the methodology for calculating controlled (adjustable) bladed hydraulic shock absorbers, in which magnetorheological fluid is used as the working fluid of the shock absorber.

Research methods. The design and principle of operation of controlled vane hydraulic shock absorber with magnetorheological (MR) throttles are considered. Method of calculation is proposed and theoretical studies are performed on influence of change of volume flow rate of working medium of shock absorber in MR throttle on forces of resistance to rotation on shaft of shock absorber blade.

The results of theoretical research. 1) Results of theoretical studies of change of volume flow rate of working medium of controlled hydraulic blade shock absorber are presented. 2) An adequate mathematical model is obtained that is suitable for calculating the characteristics of controlled (adjustable) hydraulic vane shock absorbers, where magnetorheological fluid is used as the working medium of the shock absorber, as well as for selecting control action in the control system.

Conclusion. The results of the study are intended for organizations and enterprises engaged in the development and production of heavy high-speed tracked vehicles.

The results of the studies can be used to refine the methodology for estimating the smoothness of the heavy high-speed tracked vehicles.

KEYWORDS: controlled shock-absorber, mathematical model, magnetorheological throttle, magnetorheological liquid, volume flow, pressure difference, hydraulic resistance, damping coefficient, magnetic field, tension of magnetic field

The article was submitted 01.06.2023; approved after reviewing 15.09.2023; accepted for publication 24.10.2023.

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. Sergei V. Kozeletov, Sergei V. Savelyev Mathematical model of controlled vane hydraulic shock absorber. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2023; 20 (5): 560-572. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-560-572>

© Kozeletov S. V., Savelyev S. V., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

Амортизатор представляет собой устройство, которое гасит вынужденные колебания подрессоренного корпуса ВГМ. Принцип работы основывается на преобразовании кинетической энергии колебаний в другие виды энергий: электрическую и тепловую [1].

Для создания математической модели исследуемого амортизатора¹ в работе будут рассмотрены: принцип работы лопастного амортизатора танка Т-72, расчет гидравлической части управляемого гидравлического лопастного амортизатора, а также расчет его электрической части и сил сопротивления на вале лопасти.

При описании принципа работы амортизатора необходимо рассмотреть и проанализировать структуру узла подвески ходовой части танка Т-72 с амортизатором, которая представлена на рисунке 1.

Во время своего движения танк гусеницей и опорным катком наезжает на определённую неровность, при этом опорный каток поднимается относительно корпуса машины. Это приводит к повороту балансира и опорного катка на нём относительно корпуса машины. Через тягу, соединённую с рычагом амортизатора, балансир поворачивает тягу вверх, что является прямым ходом амортизатора. Если опорный каток перемещается вниз относительно корпуса военной гусеничной машины (ВГМ) и балансир тягу тянет, поворачивая рычаг амортизатора вниз, то это обратный ход [2].

Работа лопастного амортизатора представлена на рисунке 2 и заключается в гашении колебаний корпуса под действием создания сил сопротивления на лопасти амортизатора, которая возникает при перетекании рабочего тела амортизатора и камер с большим давлением в камеры с меньшим давлением [2].

Управляемый амортизатор, представленный на рисунке 3, рабочий процесс проходит также за счёт действия внешних возмущающих сил. Регулирование этих сил происходит за счёт изменения расхода рабочего тела при перетекании через магнитореологические (МР) дроссели. Работа исследуемого амортизатора отличается от работы обычного лопастного амортизатора, устанавливаемого на ВГМ, тем, что при наезде танка на определённую неровность усилие амортизатору переда-

ется через связь системы «каток – балансир – рычаг – амортизатор», лопасть соединённая шлицевым соединением с осью рычага поворачивается. При этом рабочее тело создаёт давление в камерах «б» и «г» и перетекает в камеры «а» и «в» через каналы «ж» дросселей с катушками индуктивности. Если давление достигает значений $65+25 \text{ кгс/см}^2$, то открываются клапаны. Если давление меньше, то клапаны закрыты. В этом случае жидкость перетекает только через каналы «ж» втулок и щелевые зазоры внутри гидроамортизатора. При обратном ходе лопасть поворачивается в обратном направлении, и давление создается в камерах «а» и «в». Под действием силы давления и пружины клапаны закрыты, и жидкость из камер «а» и «в» перетекает в камеры «б» и «г» только через каналы «ж» дросселей и щелевые зазоры внутри амортизатора [3].

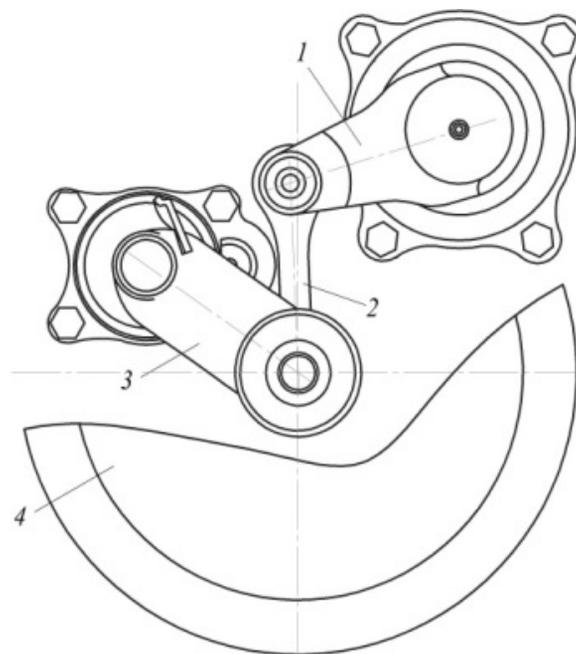


Рисунок 1 – Кинематика узла подвески ходовой части танка Т-72:
1 – амортизатор; 2 – тяга; 3 – балансир;
4 – опорный каток
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Kinematics of the suspension unit of the undercarriage of the T-72 tank
1 – shock absorber; 2 – thrust; 3 – balancer;
4 – track roller
Source: compiled by the authors.

¹ Патент на полезную модель: № RU 210655, МПК F16F 9/53. Управляемый гидравлический лопастной амортизатор / Козелетов С.В., Хамитов Р.Н., Миронов Д.В., Беляков В.Е.; заявл. 08.10.2021 г., опубл. 25.04.2022 г.

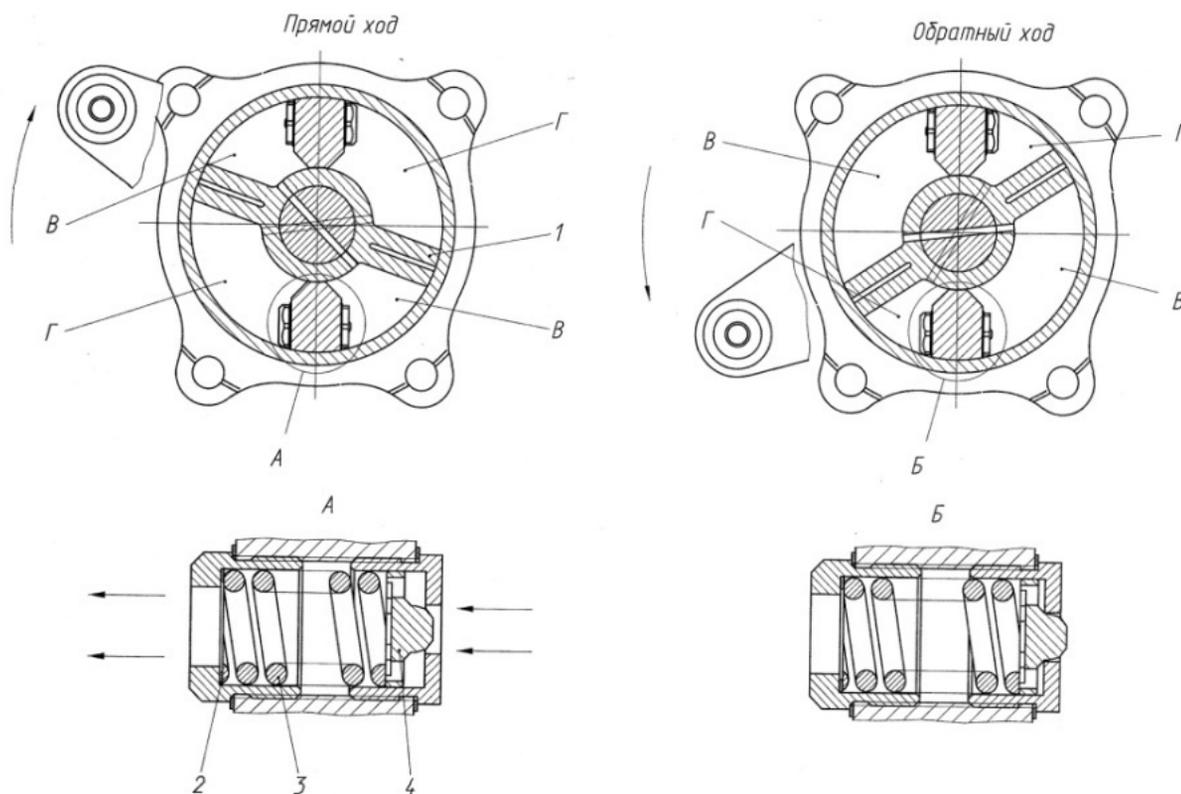


Рисунок 2 – Работа гидравлического амортизатора танка Т-72:
 1 – лопасть; 2 – регулировочная прокладка; 3 – пружина; 4 – клапан; В, Г – рабочие камеры
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – The operation of the hydraulic shock absorber of the T-72 tank
 1 – blade; 2 – adjusting gasket, 3 – spring; 4 – valve; C, D – working chambers
 Source: compiled by the authors.

РАСЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЧАСТИ УПРАВЛЯЕМОГО АМОРТИЗАТОРА

Примем условие, что давление в одноименных камерах равно, в таком случае расход рабочего тела через согласующие каналы равен 0, что учтем в математической модели.

Исходя из конструкции, модель работы лопастного гидравлического управляемого амортизатора представляет собой 5-камерную модель (5-я камера компенсационная), но по причине незначительного объема компенсационная камера в модели не учитывается.

В лопастных амортизаторах из-за формы рабочих камер сложно обеспечить высокий уровень уплотнения из-за трудно поддающихся уплотнению торцевых и диаметральных зазоров, что также необходимо учитывать в математической модели, так как герметичность уплотнений влияет на эффективность работы амортизатора на всех режимах.

Особенностью в работе управляемого (регулируемого) гидравлического лопастного амортизатора является рабочий процесс МР дросселя, в котором при постоянной площади сечения изменение расхода осуществляется посредством изменения объемного расхода МР жидкости во внешнем магнитном поле. На рисунке 4 представлена расчетная схема объемного расхода лопастного гидравлического лопастного амортизатора, в таком случае уравнение расхода рабочей жидкости камеры 1 в случае прямого хода лопасти амортизатора может быть представлено в следующем виде:

$$Q_{раб} = Q_{п.з} + Q_{кл} + Q_3 + Q_{сог} + Q_{мр.др}, \quad (1)$$

где $Q_{раб}$ – расход рабочий; $Q_{п.з}$ – расход по переменному зазору; $Q_{кл}$ – расход по клапану; Q_3 – расход по постоянным зазорам; $Q_{сог}$ – расход по согласующему уравнивающему давлению каналу; $Q_{мр.др}$ – расход через МР дроссель.

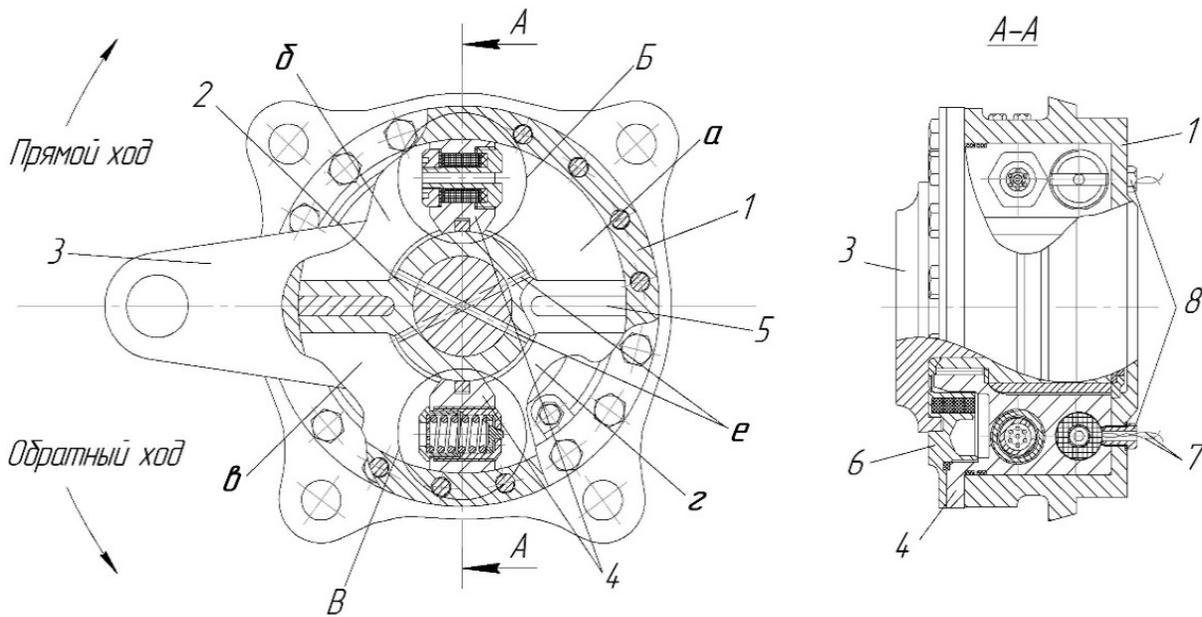


Рисунок 3 – Управляемый гидравлический лопастной амортизатор (в разрезе):
 1 – цилиндрический корпус с крепежными отливками; 2 – лопасть с пазами; 3 – рычаг амортизатора;
 4 – выступы перегородок; 5 – бронзовые колодки; 6 – крышка; 7 – провод управления;
 8 – штуцер; «а», «б», «в», «г» и «д» – рабочие камеры; «е» – сквозные каналы соединения рабочих камер;
 «ж» – сквозные каналы втулок; Б – МР дроссель; В – клапанное устройство прямого хода
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Controlled hydraulic vane shock absorber (in section)
 1 – a cylindrical body with mounting ebbs; 2 – blade with grooves; 3 – shock absorber lever;
 4 – ledges of partitions; 5 – bronze blocks; 6 – cover; 7 – control wire;
 8 – fitting; «а», «б», «в», «г» и «д» – working chambers; «е» – through channels for connecting working chambers;
 «г» – through channels of bushings; Б – MR choke; В – direct stroke valve device
 Source: compiled by the authors.

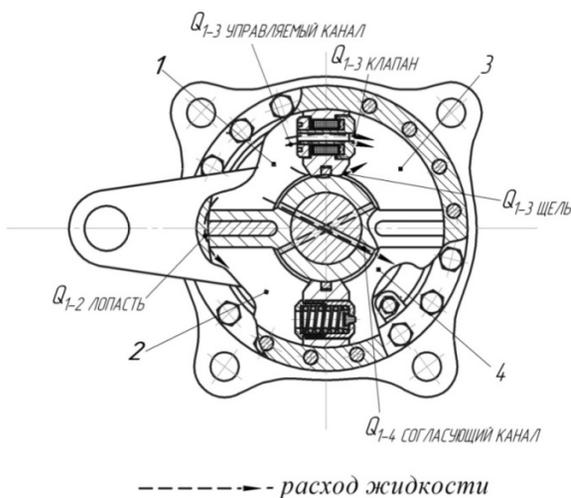


Рисунок 4 – Расчетная схема объемного расхода управляемого гидравлического лопастного амортизатора
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Calculation scheme for the volumetric flow rate of a controlled hydraulic vane shock absorber
 Source: compiled by the authors.

В уравнении (1) расход рабочей $Q_{\text{раб}}$ отражает нарастание давления, а остальные объемные расходы: $Q_{\text{п.з}}$, $Q_{\text{кл}}$, $Q_{\text{з}}$, $Q_{\text{сop}}$, $Q_{\text{мр.др}}$ его падение. В таком случае уравнение (1) позволит оценить эффективность управляемого усилия амортизатора, которое зависит от объемного расхода через МР дроссель, так как расход $Q_{\text{мр.др}}$ зависит от величины магнитного поля и ограничивается намагниченностью насыщения МР жидкости, что позволит оценить эффективность управляемого усилия амортизатора.

Для компенсации расширения МР жидкости при нагреве амортизатора находится небольшое количество воздуха, в связи с чем рабочее тело амортизатора (МР жидкость) можно принять сжимаемой (далее газомасляная (ГМ) смесь), что необходимо учесть при составлении математической модели.

Сама модель подразумевает следующие расчёты: определение статического давления (это давление в амортизаторе при известной температуре и известном начальном положении подвижного звена), расчет магнито-реологического дросселя, решение системы

дифференциальных уравнений для рабочего процесса, определение сил сопротивления повороту лопасти амортизатора.

Расчет статического давления, а также основные параметры представлены в источнике [4]. Например, при нагреве амортизатора рабочая жидкость расширяется, газ сжимается. Если нагрев по всему объекту равномерный, а газ изменяет давление в зависимости от объема и подчиняется уравнению Менделеева – Клайперона, определим

$$P_{cm} = P_0 \cdot \frac{T}{T_0} \cdot \frac{V_{за} - V_{ж0}}{V_{за} - V_{ж0}(1 + \beta \cdot \Delta T)}, \quad (2)$$

где P_0 – давление газа при заправке амортизатора, кгс/м²; T – расчетная температура МР жидкости и газа, °K; T_0 – температура МР жидкости и газа при заправке, °K; $\Delta T = T - T_0$ – разность температур; $P_{ст}$ – статическое давление в камерах при температуре T , кгс/м²; $V_{за}$ – объем внутренних объем камер, сообщающихся между собой, м³; β – коэффициент объемного расширения МР жидкости, 1/град; $V_{ж0}$ – объем МР жидкости, заправленной во внутренние камеры при температуре T_0 и давлении P_0 , м³.

Можно предположить, что определённый объем газа $V_{жк}$ в смеси с МР жидкостью находится в соотношении

$$i_e = \frac{V_{жк0}}{V_{ж0}}, \quad (3)$$

где i_e – соотношение объема газа к объему жидкости в газомасленной смеси.

Остальная часть газа $V_{зсв}$ находится в компенсационной камере.

При заправке амортизатора МР жидкостью (при T_0 и P_0) требуется выполнение условия

$$V_z = V_{зсв0} + V_{жк0} = V_{за} - V_{ж0}. \quad (4)$$

Рассмотрим прямой ход протекания рабочих процессов в амортизаторе при повороте лопасти от ψ_0 до ψ_T .

Так, масса ГМ смеси в камере 1 в момент времени Δt при температуре $T = \text{const}$ равна

$$m_t = \rho_{cm_t} \cdot V_{cm_t}, \quad (5)$$

где ρ_{cm_t} и V_{cm_t} – плотность и объем ГМ смеси в момент времени t при давлении P_{1t} .

В момент времени $t + \Delta t$ масса смеси будет равна

$$m_{(t+\Delta t)} = \rho_{cm_{(t+\Delta t)}} V_{cm_{(t+\Delta t)}} = (\rho_{cm_t} + \Delta \rho_{cm})(V_{cm_t} - \Delta V_{cm}). \quad (6)$$

Продифференцировав уменьшение массы ГМ смеси за время Δt получим

$$\frac{dm}{dt} = \rho_{cm_t} \frac{dV_{cm}}{dt} - V_{cm_t} \frac{d\rho_{cm}}{dt}. \quad (7)$$

Член dm/dt может представлять собой массовый расход из камеры 1 и определён через объемные плотность и расход:

$$\frac{dm}{dt} = \rho_{cm_t} \cdot \sum Q_i, \quad (8)$$

где $\sum Q_i$ – суммарный объемный расход ГМ смеси из камеры 1, м³/с; i – коэффициент, обозначающий принадлежность к камере.

При этом член dV/dt представляет собой уменьшение геометрического объема камеры 1:

$$\frac{dV_{cm}}{dt} = S_n \cdot r_{cp} \cdot \frac{d\psi}{dt}, \quad (9)$$

где $S_n = L_n(R-r)$ – площадь лопасти, м²; $r_{cp} = (R+r)/2$ – средний радиус лопасти; L_n – высота лопасти, м; R – внутренний радиус цилиндра, м; r – наружный радиус вала лопасти, м; $d\psi$ – угол поворота лопасти.

Рассмотрим плотность ГМ смеси в момент времени t :

$$\rho_{1cm_t} = \frac{m_{cm_t}}{V_{cm_t}} = \frac{m_{эт} + m_{жт}}{S_n \cdot r_{cp} \cdot (\psi_T - \psi) + \Delta V_1}, \quad (10)$$

где $m_{эт}$ и $m_{жт}$ – массы газа и жидкости в камере 1 при давлении P_{1t} ; ΔV_1 – объем вредного пространства в камере прямого хода (неиспользуемого для перемещения).

Учитывая допущение (3) уравнение (10) запишется в виде

$$\rho_{1cm_t} = \frac{V_{ж0t}(\rho_{г0} \cdot i_e + \rho_{ж0})}{S_n \cdot r_{cp} \cdot (\psi_T - \psi) + \Delta V_1}. \quad (11)$$

Согласно уравнению Менделеева – Клайперона выразим текущий объем газа при давлении P_{1t} и температуре T через объем газа при заправочных условиях:

$$V_{эт} = \frac{P_0}{P_{1t}} \cdot \frac{T}{T_0} V_{з0}. \quad (12)$$

Исходя из уравнения (12), объем занимаемый МР жидкостью в камере 1 будет равен

$$\begin{aligned} V_{жт} &= V_{cm_t} - V_{гт} = S_n \cdot r_{cp} \cdot (\psi_T - \psi) - \\ &- \frac{P_0}{P_{1t}} \cdot \frac{T}{T_0} V_{з0} + \Delta V_1 = \\ &= V_{ж0t} (1 + \beta \cdot \Delta T) \cdot [1 - \alpha_p (P_{1t} - P_0)] \end{aligned} \quad (13)$$

где $V_{ж0t}$ – объем жидкости в камере 1, приведенный к заправочным условиям; α_p – коэффициент относительного объемного сжатия жидкости; β – температурный коэффициент объемного расширения жидкости.

Приравнивая значения объемов по формуле (13) и учитывая формулу (12), получим

$$V_{ж0t} = \frac{S_n \cdot r_{cp} \cdot (\psi_T - \psi) + \Delta V_1}{(1 + \beta \cdot \Delta T) \cdot [1 - \alpha_p (P_{1t} - P_0)] + \frac{P_0}{P_{1t}} \cdot \frac{T}{T_0} \cdot i_e} \cdot (14)$$

Продифференцировав по времени уравнение (10) и подставив в него найденное в уравнении (14) значение $V_{ж0t}$, получим

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_{1cm}}{dt} = & \\ & (1 + \beta \cdot \Delta T) \cdot \alpha_p + \frac{P_0}{P_1^2} \cdot \frac{T}{T_0} \cdot i_e \\ = \rho_{1cm} \frac{(1 + \beta \cdot \Delta T) \cdot \alpha_p + \frac{P_0}{P_1^2} \cdot \frac{T}{T_0} \cdot i_e}{(1 + \beta \cdot \Delta T) \cdot [1 - \alpha_p P_1 + \alpha_p P_0] + \frac{P_0}{P_1} \cdot \frac{T}{T_0} \cdot i_e} \cdot & (15) \\ & \cdot \frac{dP_1}{dt}. \end{aligned}$$

Подставляя значение членов, найденных по формулам (8), (9), (13) и (15), в уравнение (7) получаем

$$\begin{aligned} \sum Q_i = S_n \cdot r_{cp} \cdot \frac{d\psi}{dt} - [S_n \cdot r_{cp} \cdot (\psi_T - \psi) + \Delta V_1] \times & \\ (1 + \beta \cdot \Delta T) \cdot \alpha_p + \frac{P_0}{P_1^2} \cdot \frac{T}{T_0} \cdot i_e & \\ \times \frac{dP_1}{(1 + \beta \cdot \Delta T) \cdot [1 - \alpha_p P_1 + \alpha_p P_0] + \frac{P_0}{P_1} \cdot \frac{T}{T_0} \cdot i_e} & (16) \end{aligned}$$

Из уравнения (16) находим

$$\begin{aligned} \frac{dP_1}{dt} = \frac{S_n \cdot r_{cp} \cdot \frac{d\psi}{dt} - \sum Q_i}{[S_n \cdot r_{cp} \cdot (\psi_T - \psi) + \Delta V_1]} \cdot & (17) \\ \frac{P_1 \cdot b + P_1^2 \cdot c(1 - \alpha_p P_1 + \alpha_p P_0)}{b + P_1^2 \cdot c \cdot \alpha_p}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} b = i_e \cdot \frac{T}{T_0} \cdot P_0, \\ c = 1 + \beta \cdot \Delta T. \end{aligned}$$

Аналогично рассматривается протекание процесса в камере 3. Процесс в камерах 2 и 4 имеет аналогичный характер камер 3 и 1 соответственно.

Для учета наличия магнитного поля для управления объемным расходом $Q_{мр.др}$ управляемого канала и учесть зависимость перепада давления на МР дросселе от напряженности магнитного поля и так как расход через МР дроссель зависит от вязкости рабочей среды представим объемный расход на нем как

$$Q_{мр.др} = Q_{мр.др}(H), \quad (18)$$

где H – напряженность магнитного поля, А/м.

С учетом допущений получаем систему дифференциальных уравнений первого порядка (19), которая описывает работу исследуемого амортизатора²:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_1}{dt} = \frac{S_n \cdot r_{cp} \cdot \frac{d\psi}{dt} - \sum Q_1 - Q_{мр.др}(H)}{[S_n \cdot r_{cp} \cdot (\psi_T - \psi) + \Delta V_1]} \cdot \frac{P_1 \cdot b + P_1^2 \cdot c(1 - \alpha_p P_1 + \alpha_p P_0)}{b + P_1^2 \cdot c \cdot \alpha_p}, \\ \frac{dP_2}{dt} = \frac{-S_n \cdot r_{cp} \cdot \frac{d\psi}{dt} + \sum Q_2 + Q_{мр.др}(H)}{S_n \cdot r_{cp} \cdot \psi + \Delta V_2} \cdot \frac{P_2 \cdot b + P_2^2 \cdot c(1 - \alpha_p P_1 + \alpha_p P_0)}{b + P_2^2 \cdot c \cdot \alpha_p}, \\ \frac{dP_3}{dt} = \frac{-S_n \cdot r_{cp} \cdot \frac{d\psi}{dt} + \sum Q_3 + Q_{мр.др}(H)}{S_n \cdot r_{cp} \cdot \psi + \Delta V_3} \cdot \frac{P_3 \cdot b + P_3^2 \cdot c(1 - \alpha_p P_1 + \alpha_p P_0)}{b + P_3^2 \cdot c \cdot \alpha_p}, \\ \frac{dP_4}{dt} = \frac{S_n \cdot r_{cp} \cdot \frac{d\psi}{dt} - \sum Q_4 - Q_{мр.др}(H)}{[S_n \cdot r_{cp} \cdot (\psi_T - \psi) + \Delta V_4]} \cdot \frac{P_4 \cdot b + P_4^2 \cdot c(1 - \alpha_p P_1 + \alpha_p P_0)}{b + P_4^2 \cdot c \cdot \alpha_p}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

² Башта Т. М. Машиностроительная гидравлика. М.: Машиностроение, 1971. 771 с.

Проведя анализ системы уравнений (19), можно выявить следующие закономерности: уравнения состоят из двух однотипных частей, отображающих текущий геометрический объем и суммарный расход смеси посредством гидравлических сопротивлений. Скорость изменения геометрического объема и расход смеси одинаковы по структуре для всех уравнений.

На основании вышеуказанного анализа из уравнения (1) определим суммарный расход

МР жидкости. Необходимо учитывать номер рассматриваемой камеры и направление потока через гидравлические сопротивления. Также следует учитывать наличие магнитного поля при расходе ГМ смеси по постоянному задору, равному

$$Q_3 = Q_{щ} + Q_{л} + Q_{лн}. \quad (20)$$

Если направление потоков положительное, то при прямом ходе запишем следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \sum Q_1 &= -Q_{щ13} - Q_{с14} - Q_{л12} - Q_{л312} - Q_{лн12} - Q_{кл13} - Q_{мр.др31} (H); \\ \sum Q_2 &= Q_{щ42} + Q_{с32} + Q_{л12} + Q_{л312} + Q_{лн12} + Q_{кл42} + Q_{мр.др42} (H); \\ \sum Q_3 &= Q_{щ13} + Q_{с23} + Q_{л43} + Q_{л343} + Q_{лн43} + Q_{кл13} + Q_{мр.др13} (H); \\ \sum Q_4 &= -Q_{щ42} - Q_{с41} - Q_{л43} - Q_{л343} - Q_{лн43} - Q_{кл42} - Q_{мр.др42} (H). \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

В случае обратного хода система уравнений не учитывает объемный расход МР жидкости через клапан:

$$\left. \begin{aligned} \sum Q_1 &= Q_{щ31} + Q_{с41} + Q_{л21} - Q_{л321} + Q_{лн21} + Q_{мр.др31} (H); \\ \sum Q_2 &= -Q_{щ24} - Q_{с23} - Q_{л21} - Q_{л321} - Q_{лн21} - Q_{мр.др24} (H); \\ \sum Q_3 &= -Q_{щ31} - Q_{с32} - Q_{л34} - Q_{л334} - Q_{лн34} - Q_{мр.др31} (H); \\ \sum Q_4 &= Q_{щ24} + Q_{с14} + Q_{л34} - Q_{л334} + Q_{лн34} + Q_{мр.др24} (H). \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Определим расходы $Q_{щ}$ через щели между валом лопасти и перегородками [1]:

$$Q_{щ} = \frac{\Delta P \cdot \delta_n^3 \cdot L_n}{12 \cdot \eta \cdot h_n}, \quad (23)$$

где ΔP – перепад давлений, под действием которого происходит течение МР жидкости в зазоре; δ_n – зазор между валом лопасти и перегородкой, м; L_n – длина контакта вала лопасти и перегородки, м; η – коэффициент динамической вязкости, кг·м/с; h_n – ширина перегородки в районе контакта с валом лопасти, м.

Расходы $Q_{л}$ через щели между лопастью и цилиндром корпуса рассчитываются по формуле

$$Q_{л} = \frac{\Delta P \cdot \delta_u^3 \cdot L_u}{12 \cdot \eta \cdot h_{лн}}, \quad (24)$$

где ΔP – перепад давлений, под действием которого происходит течение МР жидкости в зазоре; δ_u – зазор между лопастью и цилиндром корпуса, м; L_u – длина контакта лопасти и цилиндра корпуса, м; η – коэффициент динамической вязкости, кг·м/с; $h_{лн}$ – ширина лопасти, м.

Расход $Q_{лн}$ через щели переменной длины, который учитывает угол поворота лопасти, рассчитывается согласно уравнения (25), описанного в труде [5]:

$$Q_{лн} = \frac{\Delta P \cdot \delta_{лн}^3 \cdot L_{лн} \cdot 360}{12 \cdot \eta \cdot \pi \cdot h_{лн} \cdot \psi}, \quad (25)$$

где ΔP – перепад давлений, под действием которого происходит течение МР жидкости в зазоре; $\delta_{лн}$ – зазор между лопастью и крышкой, м; $L_{лн}$ – длина лопасти, м; η – коэффициент динамической вязкости, кг·м/с; $h_{лн}$ – ширина лопасти, м.

Расход $Q_{лн}$ через зазор между лопастью и донышком, который учитывает угол поворота лопасти, рассчитывается согласно уравнению

$$Q_{лн} = \frac{\Delta P \cdot \delta_{лн}^3 \cdot L_{лн} \cdot 360}{12 \cdot \eta \cdot \pi \cdot h_{лн} \cdot \psi}, \quad (26)$$

где ΔP – перепад давлений, под действием которого происходит течение МР жидкости в зазоре; $\delta_{лн}$ – зазор между лопастью и донышком, м; $L_{лн}$ – длина лопасти, м; η – коэффициент динамической вязкости, кг/м·с; $h_{лн}$ – ширина лопасти, м.

Объемный расход клапана и МР дросселя при отсутствии магнитного поля в соответствии с уравнением Бернулли определяется по формуле

$$Q = \mu S_{\kappa} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{см}}}, \quad (27)$$

где S_{κ} – площадь проходного сечения, м²; ΔP – разность давлений между камерами, кг/м·с²; $\rho_{см}$ – плотность рабочей смеси в полости, из которой она вытекает, кг/м³; μ – безразмерный коэффициент расхода, который определяет неравномерность распределения сжатия струи и для небольших круглых и прямоугольных отверстий и скорость по сечению потока принимается в диапазоне от 0,6 до 0,62 [1].

Выразим расход на МР дросселе при наличии магнитного поля, а также с учетом зависимости скорости потока от вязкости, допуская, что режим движения рабочей среды ламинарный [1]:

$$Q_{мр.др} = \frac{R_e \cdot \eta^* \cdot S_{мр.др}}{\rho_{см} \cdot l_{мр.др}}, \quad (28)$$

где R_e – число Рейнольдса; η^* – коэффициент динамической вязкости МР жидкости в присутствии магнитного поля, кг/м·с; $S_{мр.др}$ – площадь проходного сечения МР дросселя, м²; $l_{мр.др}$ – длина канала, м.

Вязкость МР жидкости во внешних магнитных полях претерпевает существенный рост, поэтому справедливо описать данный магнитореологический эффект в виде добавочного члена, выражающего степень изменения начальной вязкости магнитореологической среды после ее помещения во внешние магнитные поля [6]:

$$\eta^* = \eta_c + \frac{1}{4} \cdot \frac{\tau \cdot M(H)}{(1 + (\tau \tau_s \cdot H \cdot M(H))/J)}, \quad (29)$$

где η_c – коэффициент сдвиговой вязкости, кг/м·с; $M(H)$ – намагниченность вещества под действием магнитного поля, А/м; H – напряженность магнитного поля, А/м; τ , τ_s – времена релаксации (немагнитных и магнитных частиц), с; J – суммарный момент инерции частицы в магнитном поле, кг·А/м².

Подставив уравнение (29) в (28), получим изменение расхода МР жидкости во внешнем магнитном поле:

$$Q_{мр.др}(H) = \frac{R_e \cdot S_{мр.др} \cdot \left(\eta_c + \frac{1}{4} \cdot \frac{\tau \cdot M(H)}{(1 + (\tau \tau_s \cdot H \cdot M(H))/J)} \right)}{\rho_{см} \cdot l_{мр.др}}. \quad (30)$$

РАСЧЕТ МР ДРОССЕЛЯ В РЕЖИМЕ ПОСТОЯННОГО УПРАВЛЯЮЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Детальное моделирование рабочего процесса МР дросселя, который работает в режиме постоянного управляющего магнитного поля. Проанализируем уравнение изменения расхода МР жидкости во внешнем магнитном поле (30).

Необходимо всесторонне рассмотреть зависимость перепада давления МР дросселя в зависимости от напряженности магнитного поля.

Рассмотрим зависимость перепада давления на МР дросселе от напряженности магнитного поля. Если на участке проточной части МР дросселя ещё осуществляется электромагнитное управления расходом МР жидкости и поток является ламинарным, то перепад давления в дросселе запишется следующим образом [6]:

$$\Delta p = \lambda \frac{l_{мр.др}}{d} \cdot \frac{v_{см}^2 \rho_{см}}{2}, \quad (31)$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления; d – диаметр проходного сечения, м; $v_{см}$ – скорость потока рабочей среды, м/с; $l_{мр.др}$ – длина канала, м.

$$\lambda = \frac{c_p}{R_e}, \quad (32)$$

где c_p – коэффициент отношения давлений.

$$R_e = \frac{\rho u_{cm} d}{\eta^*}. \quad (33)$$

Подставив отношения (32) и (33) в уравнение (31), получим

$$\Delta p = \frac{c_p \cdot I_{mp.dp} \cdot u_{cm} \cdot \eta^*}{2 \cdot d}. \quad (34)$$

Преобразуя формулы (29) в (34), выведем зависимость для перепада давления на МР дросселе от напряженности магнитного поля:

$$\Delta p = \frac{c_p \cdot I_{mp.dp} \cdot u_{cm} \cdot \left(\eta_c + \frac{1}{4} \cdot \frac{\tau \cdot M(H)}{1 + (\tau \tau_s \cdot H \cdot M(H))/J} \right)}{2 \cdot d}. \quad (35)$$

Предполагая, что характеристика M в уравнениях (29), (30) и (35) задана как функция $M(H)$ и зависит от вольтамперной характеристики катушек индуктивности МР дросселя и от конструктивных особенностей. Намагниченность как функцию от напряженности магнитного поля запишем в виде [7]:

$$\begin{aligned} \bar{M} &= \frac{\bar{B}}{\mu_0} - \bar{H}; \\ \bar{B} &= \mu_{mp} \cdot \mu_0 \cdot \bar{H}. \end{aligned} \quad (36)$$

где μ_{mp} – относительная магнитная проницаемость магнитопровода, Гн/м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, Гн/м – магнитная постоянная; B – индукция, Тл.

Учитывая, что конструкция МР дросселя имеет цилиндрическую симметрию, запишем параметры элемента обмотки как [8]:

$$H = \frac{N \cdot I}{l_{ku}}, \quad (37)$$

где l_{ku} – длина катушки индуктивности, м; N – количество витков; I – сила тока, А.

Приведенные расчетные зависимости по-

зволяют определять как влияние управляющего электромагнитного поля на расход рабочего тела через сечение МР дросселя, так и на параметры блоков электромагнитного управления характеристиками потока [9, 10].

РАСЧЕТ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОВОРОТА ЛОПАСТИ В МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

Для лопастного амортизатора значения расчетного полного сопротивления (с учетом одноименных полостей), перемещения и скорости подвижного звена являются приведенными к среднему радиусу лопасти. Для приведения к оси рычага первый параметр должен быть разделен, а остальные умножены на отношение радиуса рычага к среднему радиусу лопасти [11].

Так, сила сопротивления на вале лопасти амортизатора равняется произведению коэффициента демпфирования b (кг/с) на линейную скорость лопасти u_n :

$$R_a = b \cdot u_n. \quad (38)$$

При этом скорость лопасти приводится к среднему радиусу [11]:

$$u_n = \frac{(R+r)}{2} \cdot \dot{\psi}. \quad (39)$$

Коэффициент демпфирования b (кг/с) равен производной массового расхода от времени и может быть выражен через объемный расход и плотность согласно уравнению

$$b = \rho \cdot \sum Q. \quad (40)$$

Из рассмотренных ранее систем уравнений (21) и (22) видно, что управление силами сопротивления достигается за счет изменения объемного расхода через МР дроссель, который рассчитывается в соответствии с уравнением (30). При этом силы на вале лопасти при воздействии магнитного поля на прямом и обратном ходе лопасти амортизатора можно представить как

$$\Delta R_a = \frac{R_e \cdot S_{mp.dp} \cdot \frac{(R+r)}{2} \cdot \dot{\psi} \cdot \left(\eta_c + \frac{1}{4} \cdot \frac{\tau \cdot M(H)}{1 + (\tau \tau_s \cdot H \cdot M(H))/J} \right) / \rho_{cm}}{I_{mp.dp}}. \quad (41)$$

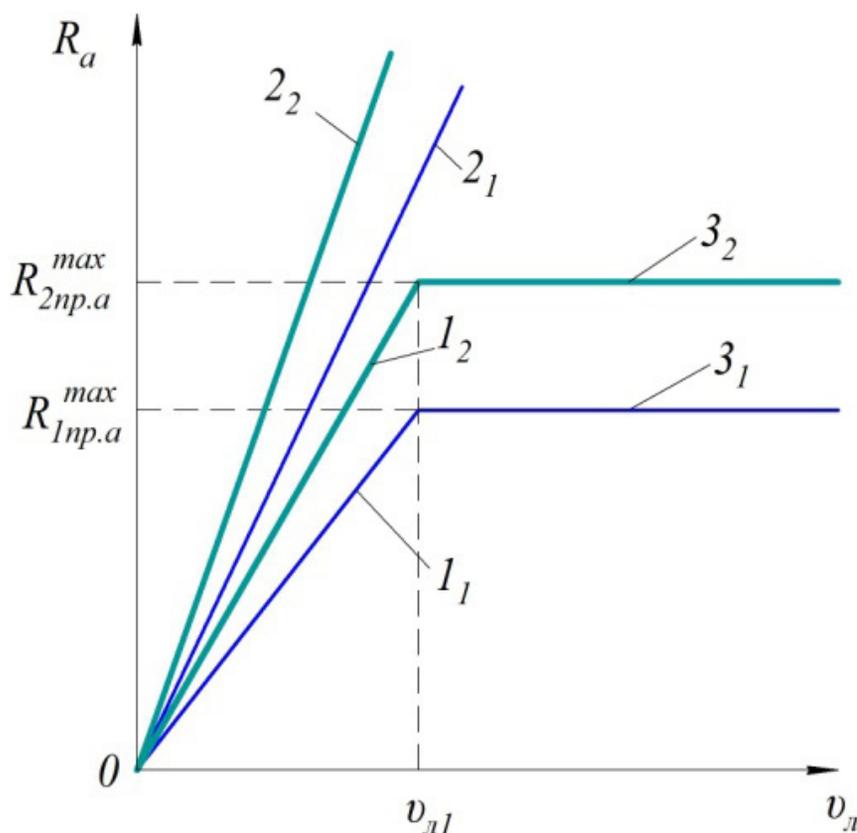


Рисунок 5 – Линейная характеристика управляемого гидравлического лопастного амортизатора
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Linear characteristic of a controlled hydraulic vane shock absorber
Source: compiled by the authors.

Таким образом, в управляемом лопастном амортизаторе в отличие от неуправляемого амортизатора рабочий процесс протекает не только под действием сил внешнего возмущения, но формируется и системой управления. С учетом условий, что компенсационная камера в модели не учитывается, динамическая вязкость МР жидкости без воздействия магнитного поля равна $0,35 \text{ кг/м}\cdot\text{с}$; плотность МР жидкости составляет 1410 кг/м^3 ; намагниченность насыщения – 45 кА/м , линейная скоростная характеристика управляемого гидравлического лопастного амортизатора (1_1 – дроссельный участок прямого хода; 2_1 – дроссельный участок обратного хода; 3_1 – клапанный участок прямого хода) будет выглядеть, как показано на рисунке 5, где $1_1, 2_1, 3_1$ – характеристики без управления и $1_2, 2_2, 3_2$ – характеристики с управлением соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования была получена математическая модель управляемого

(регулируемого) лопастного гидравлического амортизатора, которая пригодна для расчета характеристик лопастных гидравлических амортизаторов, где в качестве рабочего тела применяется магнитореологическая жидкость. Помимо этого расчет элементов управления расходом МР жидкости может быть использован в системе управления амортизаторами ВГМ при выборе управляющего воздействия при задании необходимых характеристик, что позволит значительно повысить плавность хода ВГМ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Савельев Ю. Ф., Симак Н. Ю. Виброзащита подвижного состава и экипажа на основе механических устройств со знакопеременной упругостью: монография. Омск, 2010. 187 с.
2. Наказной О. А., Ципилев А. А. К вопросу расчета подвесок с гидравлическими упругими элементами // Известия МГТУ. МАМИ. 2022. Т. 16, № 2. С. 135–148.
3. Козелетов С. В. Способ повышения демпфирующих свойств устройств гашения колебаний кор-

пуса танка // Стратегическая стабильность. 2022. № 3 (100). С. 45–48.

4. Антонов И. В., Коваль В. С., Рыков С. П. Оценка демпфирующей способности гидравлического амортизатора: модель, оборудование, эксперимент // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 1, С. 165–175.

5. Перевозчиков Ю. А. Особенности расчетной модели лопастного амортизатора // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. Вып. 11. Ч. 3, С. 144–155.

6. Altmeyer S. Усложнение течения при нестационарной модуляции течения Куэтта магнитной жидкости // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2022. № 3. С. 135–150.

7. Игнатов А. Н., Фадеева Н. Е., Савиных В. Л. Анализ возможностей импортозамещения электронной компонентной базы: монография. Инфра-Инженерия. 2023. 148 с. ISBN: 978-5-9729-1402-9.

8. Галунин С. А., Ситников М. А., Лобович А. З. Типовая магнитная характеристика электрических машин // Электротехника. 2022. № 3. С. 53–57.

9. Еремочкин С. Ю., Дорохов Д. В., Жуков А. А. Разработка и исследование энергоэффективного электропривода для сельскохозяйственных машин // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2023. № 2 (100). С. 129–134.

10. Палашов В. В. Элементы теории образования электрического тока в грунтовых и водных средах (проводниках второго рода) [Электронный ресурс]: монография / В. В. Палашов; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. Н. Новгород: ННГАСУ, 2016. 204 с. 1 электрон. опт. диск (CD-R) ISBN 978-5-528-00156-2.

11. Исаков П. П. Теория и конструкция танка: Т.6. Вопросы проектирования ходовой части военных гусеничных машин. М.: Машиностроение, 1985. 245 с.

REFERENCES

1. Savel'ev Ju. F., Simak N. Ju. *Vibrozhshhita podvizhnogo sostava i jekipazha na osnove mehanicheskikh ustrojstv so znakoperemennoj uprugost'ju* [Vibration protection of rolling stock and crew based on mechanical devices with alternating elasticity]. Monografija. Omsk, 2010:187. (in Russ.)

2. Nakaznoj O. A., Cipilev A. A. K voprosu raschjota podvesok s gidravlichesкими uprugimi jelementami [On the issue of calculation of suspensions with hydraulic elastic elements]. *Izvestija MGTU MAMI*. 2022; T. 16. № 2:135-148. (in Russ.)

3. Kozeletov S. V. Sposob povyshenija dempfirujushhijh svojstv ustrojstv gashenija kolebanij korpusa tanka [A method for increasing the damping properties of vibration damping devices in a tank hull. strategic stability]. *Strategicheskaja stabil'nost'*. 2022; 3 (100): 45-48. (in Russ.)

4. Antonov I. V., Koval' V. S., Rykov S. P. Ocenka dempfirujushhej sposobnosti gidravlichesкого

amortizatoroa: model', oborudovanie, jeksperiment [Evaluation of the damping capacity of a hydraulic shock absorber: model, equipment, experiment]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Estestvennye i inzhenernye nauki*. 2019; T. 1: 165-175. (in Russ.)

5. Perevozchikov Ju. A. Osobennosti raschetnoj modeli lopastnogo amortizatora [Features of the calculation model of a bladed shock absorber]. *Izvestija TulGU. Tehnicheskie nauki*. 2017; Vyp. 11. Ch. 3: 144-155. (in Russ.)

6. Altmeyer S. Uslozhnenie techenija pri nestacionarnoj moduljácii techenija Kujetta magnitnoj zhidkosti [Complication of the flow with non-stationary modulation of the Couette flow of a magnetic fluid]. *Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Mehanika zhidkosti i gaza*. 2022; 3: 135-150. (in Russ.)

7. Ignatov A. N., Fadeeva N. E., Savinyh V. L. *Analiz vozmozhnostej importozameshenija jelektronnoj komponentnoj bazy* [Analysis of the possibilities of import substitution of the electronic component base]. Monografija Izdatel'stvo: Infra-Inzhenerija. 2023: 148. ISBN: 978-5-9729-1402-9.

8. Galunin S. A., Sitnikov M. A., Lobovich A. Z. Tipovaja magnitnaja harakteristika jelektricheskikh mashin. [Typical magnetic characteristics of electrical machines]. *Jelektrotehnika*. 2022; 3: 53-57. (in Russ.)

9. Eremochkin S. Ju., Dorohov D. V., Zhukov A. A. Razrabotka i issledovanie jenergojefektivnogo jelektroprivoda dlja sel'skhozajstvennyh mashin. [Development and research of an energy-efficient electric drive for agricultural machines] *Izvestija Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2023; 2 (100):129-134. (in Russ.)

10. Palashov V. V. *Jelementy teorii obrazovaniya jelektricheskogo toka v gruntovyh i vodnyh sredah (provodnikah vtorogo roda) [Jelektronnyj resurs]: monografija*. [Elements of the theory of electric current generation in soil and water environments (conductors of the second kind)] V. V. Palashov; Nizhegor. gos. arhitektur.-stroit. un-t. N. Novgorod: NNGASU, 2016: 204. 1 jelektron. opt. disk (CD-R) ISBN 978-5-528-00156-2. (in Russ.)

11. Isakov P. P. *Teorija i konstrukcija tanka: T.6. Voprosy proektirovanija hodovoj chasti voennyh gusenichnyh mashin* [Theory and design of the tank: T.6. Issues of designing the undercarriage of military tracked vehicles]. Moscow: Mashinostroenie, 1985: 245. (in Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Козелетов С. В. Формулировка направления и темы исследования. Постановка задач исследования. Разработка теоретических исследований (50%).

Савельев С. В. Проверка теоретических предположений, анализ результатов исследования, редактирования, формирование выводов. Рецензирование результатов, корреспонденция данных с иностранными авторами (50%).

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Sergei V. Kozeletov. Direction and topics of the study statement. Research tasks setting. Theoretical studies development (50%).

Sergei V. Saveliev. Theoretical assumptions verification, research results analysis, editing, conclusions statement. Review of results, correspondence of data with foreign authors (50%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Козелетов Сергей Владимирович – адъюнкт, SPIN-код: 2811-7536.

Савельев Сергей Валерьевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и

строительной техники» института «Автомобильный транспорт, нефтегазовая и строительная техника», SPIN-код: 4135-8370.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey V. Kozeletov – Postgraduate student, SPIN-код: 2811-7536.

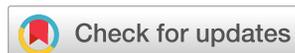
Sergey V. Saveliev – Dr of Sci., Professor of the Operation of Oil and Gas and Construction Equipment Department, Motor Transport, Oil and Gas and Construction Equipment Institute, SPIN-код: 4135-8370.

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.13
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-574-585>
EDN: SGIFUS



СБОР, ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ОТКРЫТЫХ ДАННЫХ ПО ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫМ ПРОИСШЕСТВИЯМ

Н. К. Горяев*, С. П. Любецкий

Южно-Уральский государственный университет (ЮУрГУ),
г. Челябинск, Россия

vetkadog@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7556-6522>
ser140799@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0003-7635-7073>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальной задачей для любого муниципального образования является повышение безопасности дорожного движения, для чего необходим анализ существующего положения. При этом важнейшим элементом считается анализ дорожно-транспортных происшествий (ДТП). Цель данного исследования заключается в разработке методики сбора, обработки и анализа данных по ДТП из основного официального источника – сайта Государственной инспекции по безопасности дорожного движения (ГИБДД).

Описание проблемы. Выгрузку данных с портала ГИБДД можно осуществлять в четырех форматах, однако ни один из них не позволяет проводить автоматизированный анализ ДТП и представлять его результаты с использованием геоинформационных систем (ГИС).

Предлагаемая методика. В работе предложена методика проведения анализа дорожно-транспортных происшествий, включающая следующие этапы: выгрузку данных с сайта, преобразование данных в удобные форматы, ввод данных в геоинформационную систему, анализ данных с использованием геоинформационных систем.

Апробация методики. С использованием предлагаемой методики произведен анализ дорожно-транспортных происшествий в Чебоксарской агломерации и дана его визуализация с использованием ГИС.

Выводы. Применение информации о ДТП в форматах, предлагаемых на сайте ГИБДД, невозможно ни для анализа, ни для визуализации в ГИС. Предложенная методика сбора, обработки и анализа ДТП по данным из официального источника с использованием ГИС позволяет автоматизировать процесс и повысить качество анализа ДТП.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорожно-транспортные происшествия, обработка данных, анализ данных, геоинформационные системы

Статья поступила в редакцию 12.09.2023; одобрена после рецензирования 09.10.2023; принята к публикации 24.10.2023.

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: Горяев Н. К. Любецкий С. П. Сбор, обработка и анализ открытых данных по дорожно-транспортным происшествиям // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 5 (93). С. 574-585. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-574-585>

© Горяев Н. К., Любецкий С. П., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-574-585>
EDN: SGIFUS

PEN DATA ON ROAD TRAFFIC ACCIDENTS ACCUMULATION, PROCESSING AND ANALYSIS

Nikolai K. Goryaev*, **Sergei P. Lubetskii**
South Ural State University (SUSU),
Chelyabinsk, Russia

vetkadog@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7556-6522>
ser140799@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0003-7635-7073>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. An urgent task for any municipality is the development of an Integrated Traffic Management Scheme, which is based on an analysis of the current situation. At the same time, the most important element is the analysis of road traffic accidents (RTA). The purpose of this study is to develop a methodology for accumulating, processing and analyzing the data on road accidents from the main official source - the State Inspectorate for Road Safety (GIBDD).

Description of the problem. The data can be uploaded from the traffic police portal in two formats, but none of them allows for automated analysis of road accidents and presentation of its results using geographic information systems (GIS).

Proposed methodology. The paper proposes a methodology for analyzing traffic accidents, including the following steps: uploading data from the site, converting data into convenient formats, entering data into a geographic information system, analyzing data using geographic information systems.

Methodology approbation. Using the proposed methodology, an analysis of traffic accidents in the Cheboksary agglomeration was made and its visualization was made using GIS.

Conclusions. The use of information about road accidents in the formats offered on the traffic police website is impossible either for analysis or for visualization in a GIS. The proposed method for accumulating, processing and analyzing accidents based on data from an official source using GIS makes it possible to automate the process and improve the quality of accident analysis.

KEYWORDS: traffic accidents, data processing, data analysis, geoinformation systems

The article was submitted 12.09.2023; approved after reviewing 09.10.2023; accepted for publication 24.10.2023.

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. Nikolai K. Goryaev, Sergei P. Lubetskii Open data on road traffic accidents accumulation, processing and analysis. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (5): 574-585. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-574-585>

© Goryaev N. K., Lubetskii S. P., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

Повышение безопасности дорожного движения (БДД) – задача государственного уровня, отраженная во многих нормативных документах^{1,2}, а также в статье [1]. По статистике аварийности автомобиль является самым опасным видом транспорта, а также самым распространенным [2]. Это подтверждают данные Росстата³. Сбор статистических данных по ДТП, их обработка и анализ необходимы для разработки мероприятий по повышению БДД. В России ДТП с пострадавшими и погибшими фиксируются ГИБДД и размещаются на специализированном портале⁴ с указанием параметров каждого происшествия. Все ДТП заносятся в общую статистическую базу данных свободного доступа. Авторы работы⁵ считают, что высокая смертность является основной проблемой автомобильного транспорта.

На сайте <http://stat.gibdd.ru> (рисунок 1) присутствует набор фильтров: по показателям и субъектам Российской Федерации.

Также можно определить, в полном виде нужна информация по ДТП или же самая основная, пример основной информации представлен на рисунке 2. Можно выгружать данные в нескольких форматах: PDF, XLS, CSV и XML. Единственное ограничение – это период выгрузки не должен превышать 31 дня. Главный же недочет данной системы – невозможность проведения анализа выгруженных полных данных и перекачки данных в ГИС без предварительной обработки.

Рисунок 1 – Пример списка фильтров для карточек ДТП
Источник: составлено авторами на основе данных с сайта⁶.

Figure 1 – An example of a list of filters for accident cards
Source: compiled by the authors based on data from the site⁶.

¹ ФЗ № 196 от 10.12.1995 г. «О безопасности дорожного движения» (с изм. от 27.12.2018 г.).

² «Стратегия безопасности дорожного движения в Российской Федерации на 2018–2024 годы», утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 8 января 2018 года №1-р.

³ Транспорт в России 2022: статистический сборник. М.: Росстат, 2022. 101 с.

⁴ Показатели безопасности дорожного движения в регионах Российской Федерации [Электронный ресурс] // Госавтоинспекция: официальный сайт [сайт]. Режим доступа: <http://stat.gibdd.ru/> (дата обращения 19.04.2023).

⁵ Бинецкая Е. Д., Афонин В. В. Некоторые проблемы обеспечения безопасности дорожного движения сотрудниками Государственной инспекции безопасности дорожного движения Российской Федерации // Современное состояние и перспективы обеспечения безопасности дорожного движения: теория и практика: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Орёл, 27 ноября 2020 года. Орёл: Орловский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации имени В.В. Лукьянова, 2020. С. 19–26.

⁶ Показатели безопасности дорожного движения в регионах Российской Федерации [Электронный ресурс] // Госавтоинспекция: официальный сайт. Режим доступа: <http://stat.gibdd.ru/> (дата обращения: 19.04.2023).

Российская Федерация, Владимирская область Дорожно-транспортные происшествия (01.11.2022-30.11.2022)

№ п/п	Дата ДТП	Район	Номер ДТП	Вид ДТП	Дорога	КМ	М	Адрес	Погибло	Ранено	Кол-во ТС	Кол-во участников
1	30.11.2022	Селивановский район	170018400	Съезд с дороги	Владимир - Муром - Арзамас	98	950		0	1	1	2
2	30.11.2022	Фрунзенский район	170018384	Наезд на пешехода		0	0	г Владимир ул Добросельская 167Д	0	2	1	3
3	29.11.2022	Судогодский район	170018325	Наезд на пешехода	Владимир - Муром - Арзамас	50	850		1	0	2	3

Рисунок 2 – Пример списка карточек ДТП
 Источник: составлено авторами на основе данных с сайта⁷.

Figure 2 – An example of a list of accident cards
 Source: compiled by the authors based on data from the site⁷.

В данной статье предложен алгоритм обработки исходных данных с помощью Excel и его надстроек, приведена некоторая аналитика по обработанным данным и реализован перевод полученных данных в ГИС.

ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Выгрузку данных с портала ГИБДД можно осуществлять в четырех форматах. PDF-формат удобен для анализа конкретного ДТП (в нем помимо удобно расположенной информации по ДТП также есть цветной рисунок происшествия, пример представлен на рисунке 3). Excel формат сделан не стандартным (табличным) для Excel способом, на листы помещается информация по одной карточке ДТП, созданная на основе её PDF представления, элемент карточки представлен на рисунке 4. По мнению авторов статьи, такой формат мало удобен для пользователя.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ
 Дата: 30.11.2022, Время: 19:10
 Широта: 55.700106, Долгота: 41.645072
 Номер ДТП: 170018400, Вид ДТП: Съезд с дороги

Адрес: Селивановский район, Владимир - Муром - Арзамас, 98км 950м
 Значение дороги: Региональная или межмуниципальная (дорога регионального или межмуниципального значения)
 Категория дороги: 4
 Категория улицы:

ДОРОЖНЫЕ УСЛОВИЯ
 Объекты УДС на месте ДТП: Перегон (нет объектов на месте ДТП)
 Объекты УДС вблизи места ДТП: Отсутствие в непосредственной близости объектов УДС и объектов притяжения
 Недостатки транспортного-эксплуатационного содержания улично-дорожной сети: Не установлены
 Факторы, оказывающие влияние на режим движения: Сведения отсутствуют
 Состояние погоды: Ясно
 Состояние проезжей части: Сухо
 Освещение: В темное время суток, освещение отсутствует
 Изменения в режиме движения: Режим движения не изменился

УЧАСТНИКИ
 Количество ТС: 1, Число участников: 2, Число погибших: 0, Число раненых: 1

ТС 1
 Сведения об оставлении места: Осталось на месте ДТП, Расположение руля, тип привода: С передним приводом
 Тип ТС: Прочие легковые автомобили
 Марка/модель ТС: TOYOTA Camry, Год выпуска: 2016, Юридические лица, являющиеся коммерческими организациями

Цвет: Белый
 Места повреждения: Технические неисправности отсутствуют

УЧАСТНИК 1
 Категория участника: Водитель, Использовался ли ремень: Нет
 Транспортное средство: 1, Тип детского удерживающего устройства: Нет (не скрутился)
 Сведения об оставлении места ДТП: Нет (не скрутился), Степень опьянения: Водительский стаж: 27
 Пол: Мужской, Не пострадал
 Степень тяжести последствий: Нет пострадал
 Непосредственные нарушения ПДД: Несоответствие скорости конкретным условиям движения
 Сопутствующие нарушения ПДД: Нет нарушений

УЧАСТНИК 2
 Категория участника: Пассажир, Использовался ли ремень: Нет
 Транспортное средство: 1, Тип детского удерживающего устройства: Нет (не скрутился)
 Сведения об оставлении места ДТП: Нет (не скрутился), Степень опьянения: Водительский стаж:
 Пол: Мужской, Раненый, находящийся (находившийся) на амбулаторном лечении, либо в условиях дневного стационара
 Степень тяжести последствий: Раненый, находящийся (находившийся) на амбулаторном лечении, либо в условиях дневного стационара
 Непосредственные нарушения ПДД: Нет нарушений
 Сопутствующие нарушения ПДД: Нет нарушений

Рисунок 3 – Пример карточки ДТП в PDF-формате
 Источник: составлено авторами на основе данных с сайта⁸.

Figure 3 – An example of an accident card in PDF format
 Source: compiled by the authors based on data from the site⁸.

⁷ Показатели безопасности дорожного движения в регионах Российской Федерации [Электронный ресурс] // Госавтоинспекция: официальный сайт. Режим доступа: <http://stat.gibdd.ru/> (дата обращения: 19.04.2023).

⁸ Показатели безопасности дорожного движения в регионах Российской Федерации [Электронный ресурс] // Госавтоинспекция: официальный сайт. Режим доступа: <http://stat.gibdd.ru/> (дата обращения: 19.04.2023).

ВРЕМЯ И МЕСТО ПРОИСШЕСТВИЯ

Дата: 17.07.2022 Время: 21:40
 Широта: 50.740325 Долгота: 36.943309
 Номер ДТП: 140006950 Вид ДТП: Опрокидывание

Адрес: КОРОЧАНСКИЙ РАЙОН, с Гремяче, ул Лесная, 67,
 Дорога:
 Значение дороги: Местного значения (дорога местного значения, включая относящиеся к собственности поселений, муниципальных
 Категория дороги:
 Категория улицы: Улицы и дороги местного значения в жилой застройке

Объекты УДС на месте ДТП: Внутривд
 оровая территория
 Объекты УДС вблизи места ДТП: Жилые дома индивидуальной застройки
 Недостатки транспортно-эксплуатационного содержания улично-дорожной сети: Не установлены
 Факторы, оказывающие влияние на режим движения: Сведения отсутствуют
 Состояние погоды: Ясно

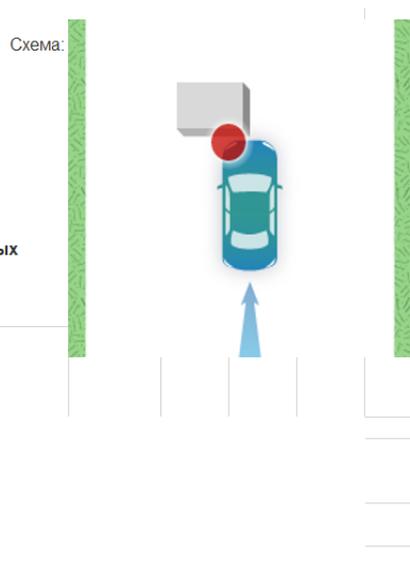


Рисунок 4 – Пример карточки ДТП в Excel-формате
 Источник: составлено авторами на основе данных с сайта⁹.

Figure 4 – An example of an accident card in Excel format
 Source: compiled by the authors based on data from the site⁹.

Дата	Время	Схема	Широта	Долгота	Номер ДТП	Вид ДТП
17.07.2022	21:40	930	36.943309		50.740325	140006950
17.07.2022	21:40	930	36.943309		50.740325	140006950
1	Осталось на месте ДТП	Иное расположение рулевого управления	Мопеды с двигателем внутреннего сгорания менее 50 см. куб.		2018	Прочие марки ТС Прочие марки и модели ТС
1	1	1	17.07.2022		21:40	930
1	Осталось на месте ДТП	Иное расположение рулевого управления	Мопеды с двигателем внутреннего сгорания менее 50 см. куб.		2018	Прочие марки ТС Прочие марки и модели ТС

Рисунок 5 – Элемент CSV-таблицы
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – CSV table element
 Source: compiled by the authors.

Формат CSV был бы очень удобен для работы, но выгрузка в данный формат, по мнению авторов статьи, написана с ошибкой. Она заключается в том, что если какое-то из полей не заполнено, то последующие поля оказываются сдвинуты на один столбец, при встрече нового, незаполненного поля сдвиг повторяется и т.д. Итого, на выходе получаем таблицу, у которой в столбце со временем ДТП может оказаться описание ДТП, тип нарушения или что-то еще. На рисунке 5 желтым цветом отмечены примеры несоответствия.

Найти решение выявленной проблемы в научных статьях или иных источниках не удалось, поэтому было разработано авторское решение.

И остается последний вариант выгрузки – XML, по этому способу нареканий по кор-

ректности данных и возможности для дальнейшей работы с ними нет, но данные в таком формате не очень удобно анализировать для обычного пользователя, который привык к понятным ему сводным таблицам Excel.

ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДИКА

На первом этапе скачиваем набор необходимых XML-файлов с данными с сайта¹⁰, открываем их с помощью Excel как XML-таблицы и сохраняем данный набор файлов в папку, куда будут в последующем обращаться запросы Power Query (надстройка Excel), с помощью которых будет проведена обработка данных. Power Query способен подключаться к нескольким источникам данных, объединять их и помещать в одну электронную таблицу или в модель данных Excel [3].

⁹ Показатели безопасности дорожного движения в регионах Российской Федерации [Электронный ресурс] // Госавтоинспекция: официальный сайт [сайт]. Режим доступа: <http://stat.gibdd.ru/> (дата обращения: 19.04.2023).

¹⁰ ФЗ № 196 от 10.12.1995 г. «О безопасности дорожного движения» (с изм. от 27.12.2018 г.)

Объекты УДС вблизи места ДТП	Освещение	Погибло	Ранено	Время ДТП	Улица, дом	Номер ДТП
	В темное время	0	1	16:10		970011374
Административные здания	В темное время	0	1	16:10		970011374
Регулируемый пешеходный переход	В темное время	0	1	16:10		970011374
Регулируемый перекресток	В темное время	0	1	16:10		970011374
Многоквартирные жилые дома	В темное время	0	1	16:10		970011374
	В темное время	0	1	22:00	ш Марпосадское новгородская д. 40 1	970011331
	В темное время	0	1	22:00	ш Марпосадское новгородская д. 40 1	970011331
	В темное время	0	1	22:00	ш Марпосадское новгородская д. 40 1	970011331
Остановка общественного транспорта	В темное время	0	1	22:00	ш Марпосадское новгородская д. 40 1	970011331
Подземный пешеходный переход	В темное время	0	1	22:00	ш Марпосадское новгородская д. 40 1	970011331
Жилые дома индивидуальной застройки	В темное время	0	1	22:00	ш Марпосадское новгородская д. 40 1	970011331
Многоквартирные жилые дома	В темное время	0	1	22:00	ш Марпосадское новгородская д. 40 1	970011331
Остановка общественного транспорта	В темное время	0	1	22:00	ш Марпосадское новгородская д. 40 1	970011331

Рисунок 6 – Фрагмент промежуточной таблицы
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Fragment of the intermediate table
Source: compiled by the authors.

С помощью запроса объединяем разрозненные файлы в одну большую плоскую таблицу, которая имеет весь корректный набор строк и столбцов. Для дальнейшей работы оставляем набор самых информативных столбцов, также для удобства восприятия переименоуем их. Для удобства сцепляем улицу и дом в один столбец. Добавляем столбец с индексом. Описание получившейся таблицы (в скобках новое именование) выглядит следующим образом:

- 1) EMTP_NUMBER (номер ДТП);
- 2) COORD_W (широта);
- 3) COORD_L (долгота);
- 4) date (дата ДТП);
- 5) time (время ДТП);
- 6) DTPV (вид ДТП);
- 7) regName (место ДТП);
- 8) district (район ДТП);
- 9) dor (дорога, км, м);
- 10) street, house (улица, дом);
- 11) POG11 (погибло);
- 12) RAN12 (ранено);
- 13) k_ul (категория улицы);
- 14) sdor (объекты УДС на месте ДТП);
- 15) OBJ_DTP (объекты УДС вблизи места ДТП);
- 16) ndu (недостатки транспортно-эксплуатационного содержания улично-дорожной сети);
- 17) factor (факторы, оказывающие влияние на режим движения);
- 18) osv (освещение);
- 19) NPDD (непосредственные нарушения ПДД).

На рисунке 6 представлен фрагмент сформированной таблицы.

Теперь перейдем к способу описания конкретного ДТП не набором строк (например,

«Факторы, оказывающие влияние на режим движения» могут быть не в единственном числе, следовательно, занимают несколько строк), а одной. Для начала выделим столбцы, которые могут иметь несколько значений, относящихся к одному ДТП, это:

- 1) факторы, оказывающие влияние на режим движения;
- 2) категория улицы;
- 3) объекты УДС вблизи места ДТП;
- 4) объекты УДС на месте ДТП;
- 5) недостатки транспортно-эксплуатационного содержания улично-дорожной сети;
- 6) непосредственные нарушения ПДД.

С помощью запросов получаем наборы уникальных значений для каждого из этих столбцов. Преимуществом данного способа является возможность легкого обновления списка, если в нем появляются или удаляются другие значения. Далее соединяем все уникальные значения в один список и применяем к нему макрос, описанный ниже.

SubДТП()

Count = 2

Do While ActiveCell<> ""

ActiveCell.Offset(0, 2) = «#»»Добавлен пользовательский объект» & Str(Count) & «» = Table.AddColumn(«#»»Добавлен пользовательский объект» & Str(Count - 1) & «», «» & ActiveCell & «(» & ActiveCell.Offset(0, 1) & «)»», each if [«#»] & ActiveCell & «»] = «» & ActiveCell.Offset(0, 1) & «» then 1 else 0),»

ActiveCell.Offset(1, 0).Activate

Count = Count + 1

Loop

End Sub

С помощью макроса, представленного ниже, формируем набор строк кода для запроса вида:

#»Добавлен пользовательский объект9» = Table. AddColumn(#»Добавлен пользовательский объект8», «Факторы, оказывающие влияние на режим движения (Сужение проезжей части вследствие проведения работ)», eachif [#»Факторы, оказывающие влияние на режим движения] =>Сужение проезжей части вследствие проведения работ» then 1 else 0).

Суть работы созданного макросом кода: формируется название нового столбца – это текущий заголовок списка + текущее значение из списка, далее реализуется простая проверка на совпадение текущего значения исходного столбца и значения из списка, если они равны, то получаем 1, если нет, то 0.

Каждая такая запись соответствует одному уникальному значению из всех наборов списков. Весь сформированный массив записей вставляется в запрос Power Query и по итогу мы получаем большой набор столбцов, который имеет значение 0 или 1, что отражает отсутствие или наличие определенной записи в конкретном ДТП. Далее производится группировка строк по ДТП, и мы получаем удобную таблицу для анализа, которую можно загрузить в ГИС в корректном виде.

На рисунке 7 представлен пример сводной таблицы по обработанным данным. Теперь с

исходными данными удобно работать пользователю, выявлять различные зависимости между данными и строить их графическое представление.

АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ

Апробация осуществлялась на основе статистики по ДТП за 2019–2021 гг. в Чебоксарской агломерации.

Основными показателями состояния БДД являются количество ДТП, количество пострадавших и количество погибших, пример их анализа представлен в статье [4]. Также существует множество других показателей для оценки БДД, например, автор статьи [5] использует термин социального риска, который сопоставляет количество погибших в ДТП с численностью населения. Рассмотрим статистику по годам для основных показателей и проанализируем её (рисунки 8, 9, 10).

На рисунках 8 и 10 показано, что количество ДТП и раненых в них имеет тенденцию к снижению, что говорит о повышении БДД. Но в то же время количество смертей остается на одном уровне. Это говорит о необходимости углубления системной работы по повышению БДД.

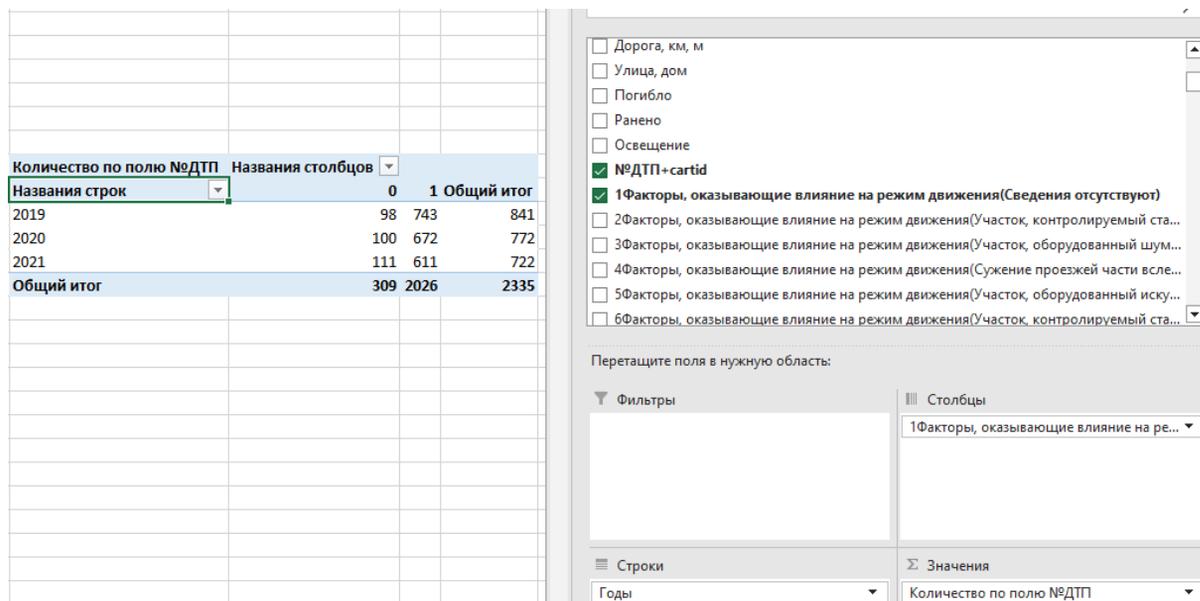


Рисунок 7 – Пример сводной таблицы
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – An example of a summary table
Source: compiled by the authors.

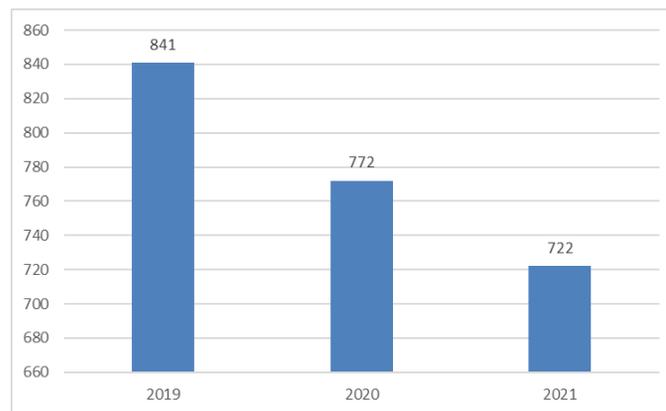


Рисунок 8 – Количество ДТП за 2019–2021 гг.
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Number of accidents for 2019–2021
Source: compiled by the authors.

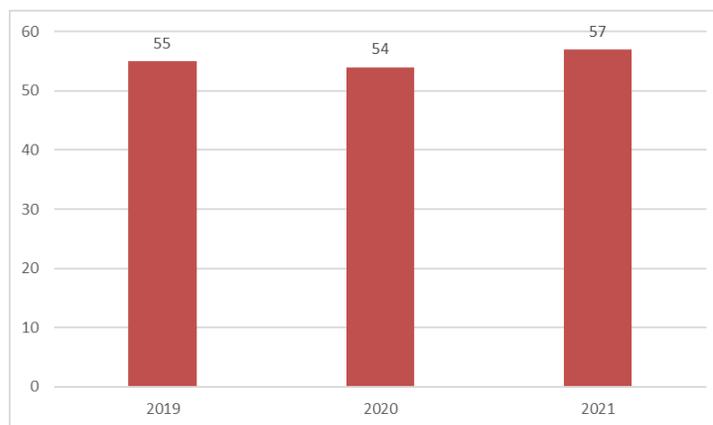


Рисунок 9 – Количество погибших в ДТП за 2019–2021 гг.
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Number of deaths in road accidents for 2019–2021
Source: compiled by the authors.

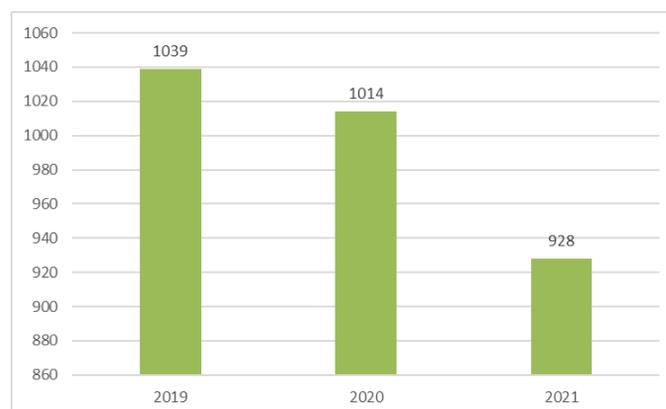


Рисунок 10 – Количество раненых в ДТП за 2019–2021 гг.
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Number of injured in road accidents for 2019–2021
Source: compiled by the authors.



Рисунок 11 – Распределение ДТП по видам за 2021 г.
Источник: составлено авторами.

Figure 11 – Distribution of accidents by type for 2021
Source: compiled by the authors.

Теперь рассмотрим, как же ДТП распределяются по видам (рисунок 11).

На рисунке 11 показано, что наиболее частым видом ДТП является столкновение и наезд на пешехода. Автор статьи [6] указывает, что необходимо заимствовать европейский опыт по обеспечению безопасности пешеходов на дороге, так как частота таких случаев у них существенно ниже. На европейскую безопасность положительно влияют более строгие ПДД и штрафы за их нарушения, отмечается в статье [7]. Также в связи с развитием средств индивидуальной мобильности (СИМ) участились ДТП, связанные с ними, что в свою очередь увеличило количество столкновений с участием СИМ. На данный момент этот вид ДТП самый частый [8].

После проведенного анализа всех ДТП за 2019–2021 гг. были выбраны несколько наиболее повторяющиеся нарушения ПДД:

- 1) выезд на полосу встречного движения в местах, где это запрещено;
- 2) нарушение требований сигналов светофора;
- 3) нарушение правил проезда пешеходного перехода;
- 4) неправильный выбор дистанции.

Загрузка статистических данных в ГИС позволяет в удобном и наглядном формате анализировать информацию о ДТП, а именно:

- 1) оценка тенденций изменения аварийности на исследуемых участках;
- 2) изучение причин и выявление участков концентрации ДТП;
- 3) оценки динамики показателей аварийности на местах, где были проведены мероприятия по повышению БДД [9].

В качестве инструмента анализа аварийности и создания карты мест концентрации ДТП был использован QGIS 3.24, он обладает полным объемом функций создания и анализа пространственно-распределенной информации [10]. QGIS прекрасно подходит для анализа пространственных данных¹¹.

В ГИС предусмотрена возможность импорта данных из файлов Excel в csv-формате [11]. Поэтому первым делом таблицу с данными из формата xls необходимо сохранить в формате csv. В формате csv необходимо заменить все запятые в числах на точки для корректного отображения. Благодаря этому обработанные данные довольно просто попадают в ГИС.

В QGIS добавляется слой из текста с разделителями (рисунок 12) – файл, который перевели в cvs.

¹¹ Анализ данных в геоинформационной системе QGIS / О. В. Пашковская, О. В. Новоселов, И. А. Поталенко // Решетневские чтения: материалы XXIV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева: в 2 частях, Красноярск, 10–13 ноября 2020 года. Том Часть 2. Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 2020. С. 345–346.

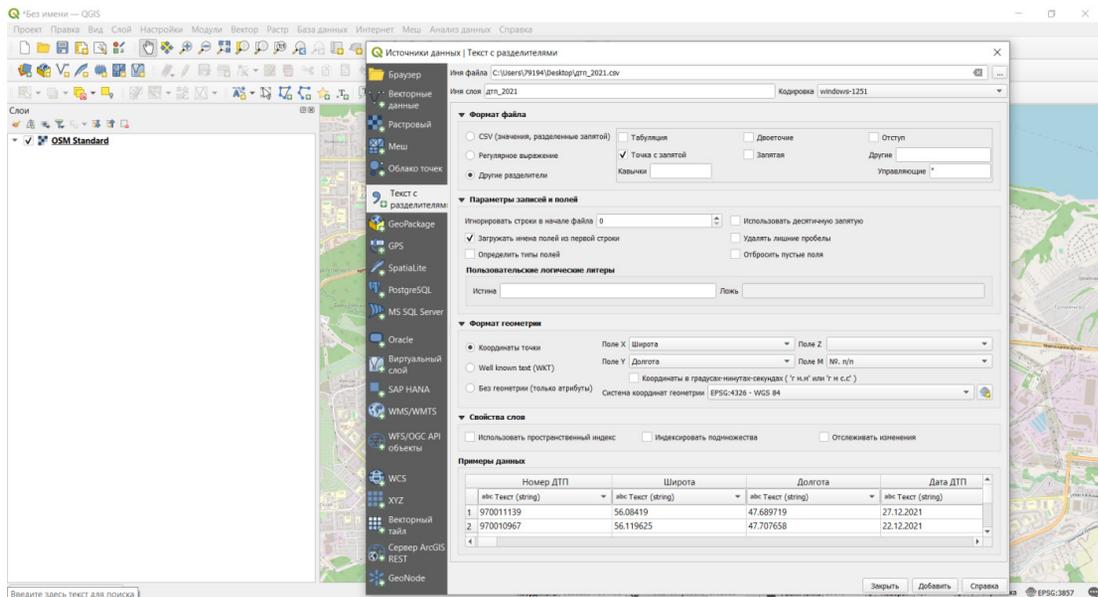


Рисунок 12 – Пример добавления слоя из текста с разделителями
Источник: составлено авторами.

Figure 12 – An example of adding a layer of delimited text
Source: compiled by the authors.

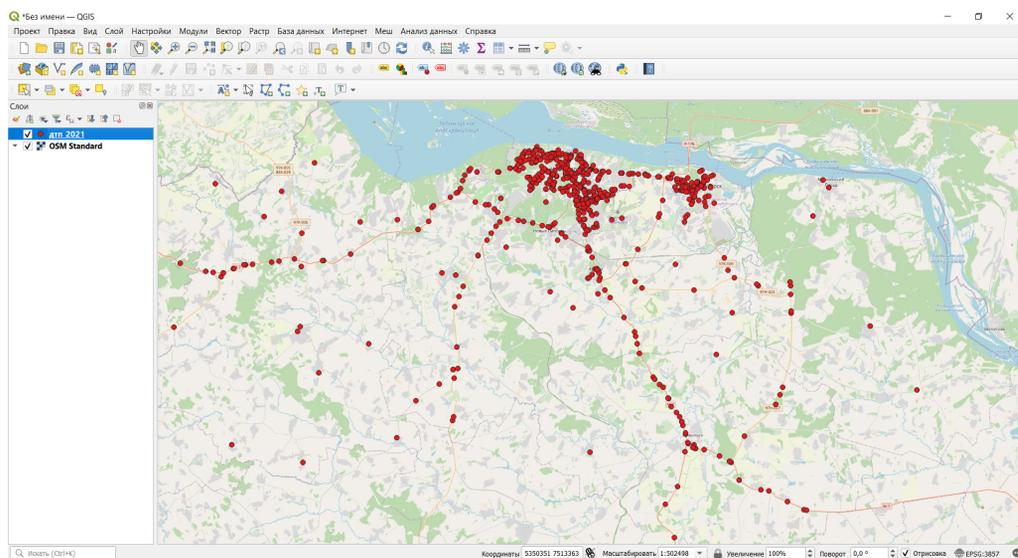


Рисунок 13 – Места ДТП отмечены на карте
Источник: составлено авторами.

Figure 13 – Places of accidents are marked on the map
Source: compiled by the authors.

Необходимо выбрать кодировку windows-1251/1250 (такую, чтобы «примеры данных» были читаемы). Формат файла – точка с запятой. Заполнить координаты точки – поле X и Y (ссылаясь на данные таблицы).

Появился слой дтп_2021 (рисунок 13), точки – это и есть места ДТП. Но данный слой редактировать нельзя, поэтому необходимо

пересохранить его в векторный слой. Далее с векторным слоем можно удобно работать, фильтровать ДТП по времени суток, по числу погибших и т.д. Появляется возможность визуально находить места концентрации ДТП по различным условиям. На рисунке 14 для примера показана сортировка ДТП по освещению.

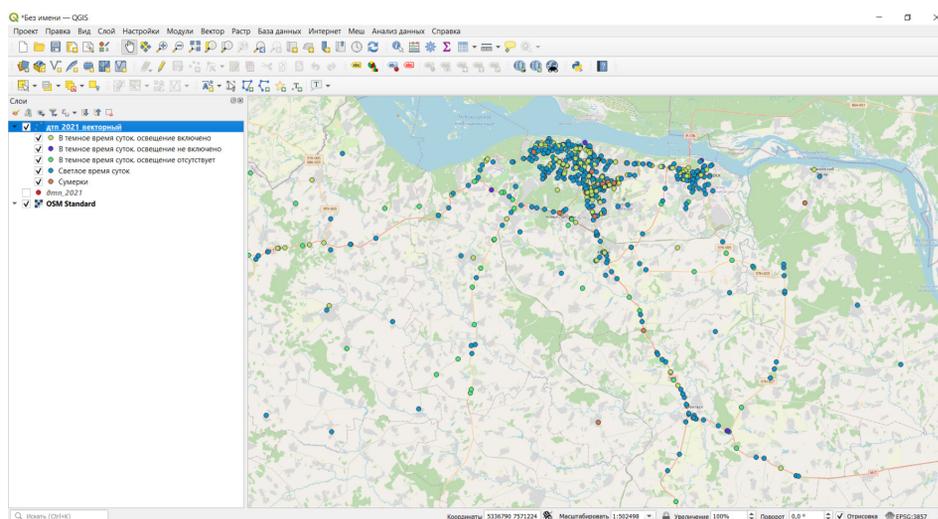


Рисунок 14 – Отфильтрованные места ДТП по освещению
Источник: составлено авторами.

Figure 14 – Filtered accident sites by lighting
Source: compiled by the authors.

ВЫВОДЫ

Использование информации о ДТП в форматах, предлагаемых на сайте ГИБДД, невозможно ни для анализа, ни для визуализации в ГИС. Предложенная методика сбора, обработки и анализа ДТП по данным из официального источника с применением ГИС позволяет автоматизировать процесс и повысить качество анализа ДТП. На основе такого анализа проще разрабатывать мероприятия по повышению БДД, что не только уменьшает количество жертв, но и по оценке специалистов снижает экономический ущерб от дорожных происшествий, который может достигать до 9% валового национального продукта страны [12].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Куракина Е. В., Складорова А. А. Повышение уровня безопасности дорожного движения в системе «участник дорожного движения – транспортное средство – дорога – внешняя среда» // *Вестник СибАДИ*. 2020;17(4):488–499. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-488-499>
2. Анализ аварийности по регионам в зависимости от времени суток / Д. В. Колышкина, Ю. В. Семикопенко, Д. А. Волков, В. М. Балабанов // *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. 2020. № 3(42). С. 225–228.
3. Назаров Д. М., Назаров А. Д. Power Query: формирование профессиональных компетенций бизнес-аналитика // *Информатика и образование*. 2020. № 2(311). С. 30–40. DOI 10.32517/0234-0453-2020-35-2-30-40.

4. Жмакин И. А. Основные характеристики ДТП с пострадавшими в Тверской области за 2015–2019 годы // *Тверской медицинский журнал*. 2020. № 4. С. 44–54.

5. Миронов В. Л. Социальный риск как один из показателей безопасности дорожного движения // *Управление деятельностью по обеспечению безопасности дорожного движения: состояние, проблемы, пути совершенствования*. 2019. № 1(2). С. 311–315.

6. Кузьменко Е. А., Донченко Д. С., Рагозин В. О. Анализ данных для прогнозирования вероятности дорожно-транспортных происшествий с участием пешеходов // *Инженерный вестник Дона*. 2020. № 6(66). 10 с.

7. Нгуен Т. Т. Х. Сравнительная характеристика устранения нарушений порядка и безопасности дорожного движения в Европе и РФ // *Colloquium-Journal*. 2019. № 18-7(42). С. 5–7.

8. Юнг А. А., Шевцова А. Г. Результат оценки характеристик транспортного потока с учетом движения средств индивидуальной мобильности с помощью моделирования участка дорожного движения. *Вестник СибАДИ*. 2022;19(5):716–726. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-716-726>

9. Куракина Е. В. Об эффективности проведения исследований мест концентрации ДТП // *Вестник гражданских инженеров*. 2018. № 2(67). С. 231–237. DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-2-231–237.

10. Михаилиди И. М., Кишко Д. И. Выявление мест концентрации ДТП в индустриальном районе города Барнаула с применением геоинформационных технологий // *Ползуновский альманах*. 2019. № 2-2. С. 33–36.

11. Михеева Т. И. Системный анализ объектов транспортной инфраструктуры в геоинформаци-

онной среде // Программные продукты и системы. 2018. № 1. С. 12–18.

12. Пугачев И. Н., Шешера Н. Г., Щеглов В. И. Анализ геометрических элементов дорог с помощью современных геоинформационных систем при оценке их аварийности // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 3(86). С. 127–133. DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-3-127-133.

REFERENCES

1. Kurakina E.V., Sklyarova V.A. Road safety improvement in road traffic participant – vehicle – road – external environment system. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020;17(4):488–499. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-488-499>

2. Kolyshkina D.V. Analiz avarijnosti po regionam v zavisimosti ot vremeni sutok [Analysis of accidents by region depending on the time of day]. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitelstve*. 2020; 3(42): 225–228. (In Russ.)

3. Nazarov D. M., Nazarov A. D. Power Query: formirovanie professional'nyh kompetencij biznes-analitika [Power Query: formation of professional competencies of a business analyst]. *Informatika i obrazovanie*, 2020; 2(311): 30–40. (In Russ.)

4. Zhmakin I. A. Osnovnye harakteristiki DTP s postradavshimi v Tverskoj oblasti za 2015-2019 gody [The main characteristics of road accidents with victims in the Tver region for 2015-2019]. *Tverskoj medicinskij zhurnal*. 2020; 4: 44–54. (In Russ.)

5. Mironov V. L. Social'nyj risk kak odin iz pokazatelej bezopasnosti dorozhnogo dvizhenija [Social risk as one of the indicators of road safety]. *Upravlenie deyatel'nostyu po obespecheniyu bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya: sostoyanie, problemy, puti sovershenstvovaniya*. 2019; 1(2): 311–315. (In Russ.)

6. Kuzmenko E. A., Donchenko D. S., Ragozin V. O. Analiz dannyh dlja prognozirovaniya verojatnosti dorozhno-transportnyh proisshestvij s uchastiem peshehodov [Data analysis for predicting the probability of traffic accidents involving pedestrians]. *Inzhernyj vestnik Dona*. 2020; 6(66): 10. (In Russ.)

7. Nguyen T. T. X [A comparative analysis of elimination of violations and road safety in Europe and Russia]. *Colloquium-Journal*. 2019; 18-7(42): 5–7. (In Russ.)

8. Jung A.A., Shevtsova A.G. The result of an evaluation for traffic flow characteristics considering the movement of personal mobility equipment by modeling a road traffic section. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022;19(5):716–726. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-716-726>

9. Kurakina E. V. Ob jeffektivnosti provedeniya issledovanij mest koncentracii DTP [On the effectiveness of studies carried out at places of road traffic accident concentration]. *Bulletin of Civil Engineers*. 2018; 2(67): 231–237. DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-2-231-237. (In Russ.)

10. Mikhaylidi I. M., Kishko D. I. Vyjavlenie mest koncentracii DTP v industrial'nom rajone goroda Barnaula s primeneniem geoinformacionnyh tehnologij [Identification of places of concentration of accidents in the industrial district of the city of Barnaul with the use of geoinformation technologies]. *Polzunovskij almanah*. 2019; 2-2: 33–36. (In Russ.)

11. Mikheeva T. I. Sistemnyj analiz ob'ektov transportnoj infrastruktury v geoinformacionnoj srede [System analysis of transport infrastructure objects in the geoinformation environment]. *Programmnye produkty i sistemy*. 2018; 1:12–18. (In Russ.)

12. Pugachev I. N. Analiz geometricheskikh jelementov dorog s pomoshh'ju sovremennyh geoinformacionnyh sistem pri ocenke ih avarijnosti [Analysis of geometric elements of roads when assessing their accident rate by means of modern geoinformation systems]. *Bulletin of Civil Engineers*. 2021; 3(86): 127–133. DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-3-127-133. (In Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Любецкий С. П. – методика обработки и анализа данных.

Горяев Н. К. – визуализация в ГИС.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Sergei P. Lyubetskii. Data processing and analysis methods.

Nikolai K. Goryaev. Visualization in GIS.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горяев Николай Константинович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры автомобильного транспорта, SPIN-код: 2534-6207.

Любецкий Сергей Павлович – аспирант кафедры математического и компьютерного моделирования.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolai K. Goryaev – Cand. of Sci., Associate Professor of the Road Transport Department, SPIN-код: 2534-6207.

Sergei P. Lyubetskii – Postgraduate student of the Mathematical and Computer Modelling Department.

Научная статья
УДК 656.13
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-586-599>
EDN: OHGMZO



СПОСОБ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КООРДИНИРОВАННОГО ТИПА УПРАВЛЕНИЯ НА МАГИСТРАЛЬНОЙ УЛИЦЕ

С. В. Дорохин, А. Ю. Артемов*

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова,
г. Воронеж, Россия

dsvvm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3869-9115>
artenov_a_u@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0605-3018>
*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Для большинства городов с устоявшейся транспортной системой характерны определенные перепады интенсивности, которые цикличны и повторяются в течение дня, суток и недели. С учетом имеющегося оборудования – исполнительных элементов первого слоя интеллектуальных транспортных систем (ИТС) – возможна оперативная оценка транспортной ситуации и изменение режима управления в формате онлайн, но такого рода технологии представлены в основном в крупных городах. Несмотря на то, что в городах с малой численностью населения, относящихся к категории малых и средних, имеются идентичные проблемы в области координированного управления магистральными улицами, на таких участках нет возможности оперативного изменения управления из-за отсутствия специального оборудования и осуществления постоянного мониторинга и контроля над транспортной ситуацией. Для повышения эффективности управления на данных участках, расположенных в малых и средних городах, необходимо разработать способ оценки эффективности координированного управления, что и является основной целью выполненного исследования.

Методы и материалы. В результате выполненного исследования применены методы натурных наблюдений, расчетные методы и методы моделирования.

Результаты. В рамках данного исследования был разработан способ оценки эффективности координированного типа управления на основании сопоставления средней величины интенсивности смежных и магистрального участка и соответствующим им средним величинам задержки.

Заключение. Использование полученных результатов на объекте исследования позволило установить временные периоды применения координации и жесткого некоординированного управления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: координированное управление, интенсивность движения, Any Logic, средняя задержка, оценка результатов

Статья поступила в редакцию 27.08.2023; одобрена после рецензирования 27.09.2023; принята к публикации 24.10.2023.

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: Дорохин С. В., Артемов А. Ю. Способ оценки эффективности работы координированного типа управления на магистральной улице // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 5 (93). С. 586-599. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-586-599>

© Дорохин С. В., Артемов А. Ю., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-586-599>

EDN: OHGMZO

EFFICIENCY EVALUATING METHOD FOR COORDINATED CONTROL TYPE ON MAIN STREET

Sergei V. Dorokhin, Aleksandr Yu. Artemov*

G.F. Morozov Voronezh State Forestry University,
Voronezh, Russia

dsvvrn@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3869-9115>
artenov_a_u@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0605-3018>
*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. For the majority of cities with an established transport system, certain intensity fluctuations are characteristic, which are cyclical and repeated during a day, day and night and week. Taking into account the available equipment, executive elements of the first layer of intelligent transportation systems (ITS), it is possible to promptly assess the transportation situation and change the mode of control in the on-line format, but this kind of technology is mainly presented in large cities. In spite of the fact that in cities with a small population, belonging to the category of small and medium-sized cities there are identical problems in the field of coordinated management of main streets, on such sections there is no possibility of operational change of management, due to the lack of special equipment and implementation of constant monitoring and control of the traffic situation. In order to improve the efficiency of management in such sections located in small and medium-sized cities, it is necessary to develop a way to evaluate the effectiveness of coordinated management, which is the main purpose of the study.

Methods and materials. As a result of the performed research, methods of field observations, calculation methods and modelling methods were used.

Results. As part of the completed study, a method to evaluate the effectiveness of the coordinated type of control based on a comparison of the average intensity of the adjacent and mainline section and their corresponding average delay values was developed.

Conclusion. The use of the obtained results on the research object made possible to establish time periods of application of coordination and rigid non-coordinated control.

KEYWORDS: coordinated control, traffic intensity, Any Logic, average delay, evaluation of results

The article was submitted 27.08.2023; approved after reviewing 27.09.2023; accepted for publication 24.10.2023.

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. Dorokhin S. V., Artemov A. Yu. Efficiency evaluating method for coordinated control type on main street. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2023; 20 (5): 586-599. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-586-599>

© Dorokhin S. V., Artemov A. Yu., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении многих лет вопрос управления транспортными потоками продолжает оставаться актуальным. Ежегодный прирост уровня автомобилизации способствует увеличению трафика в городах, что приводит к возникновению заторовых ситуаций. Одним из самых действенных способов в таком случае является реконструкция улично-дорожной сети (УДС) – увеличение числа полос для движения или строительство многоуровневых развязок, но высокая стоимость такого рода мероприятий не позволяет реализовать их в полной мере. Альтернативным мероприятием будет являться применение технических средств организации дорожного движения (ТСОДД), например светофоров, которые позволяют разделить транспортные потоки во времени и тем самым снизить конфликтность пересечений, сократить время простоя и минимизировать вероятность возникновения дорожно-транспортных происшествий (ДТП). В результате постоянного совершенствования современные светофоры работают в различных режимах, предназначенных для управления как изолированными перекрестками, так и магистральными улицами, в состав которых входит несколько управляемых участков. Связь нескольких перекрестков в результате согласованного управления светофоров в научной практике определена как координация, а тип управления – координированный. В большинстве городов при управлении движением транспортных потоков, особенно на магистральных улицах, довольно часто используется координированный тип управления, позволяющий снизить блокирование пересечений и обеспечить безостановочное движение по магистральной улице.

Активная урбанизация и перераспределение транспортных потоков приводит к изменению загруженности УДС и, как следствие, к изменению используемых методов управления и лежащих в их основе алгоритмов. В таком случае при использовании координированного типа управления довольно часто на второстепенных участках – прилегающих улицах, наблюдаются заторовые ситуации, выраженные длительными простоями транспортных средств. Несмотря на то, что движение по магистральной улице происходит с минимальными простоями, на второстепенных участках ввиду возрастающей интенсивности движения автомобилям приходится простаивать довольно длительные промежутки времени. В дан-

ном случае применение координированного типа управления должно быть обоснованным и целесообразным, потому что при возникновении таких ситуаций требуется оперативное изменение режимов управления и применение иного типа управления, например жесткого, без сохранения координации.

Также следует отметить, что для большинства городов с устоявшейся транспортной системой характерны определенные перепады интенсивности, которые цикличны и повторяются в течение дня, суток и недели. С учетом имеющегося оборудования – исполнительных элементов первого слоя ИТС – возможна оперативная оценка транспортной ситуации и изменение режима управления в формате онлайн, но такого рода технологии представлены в основном в крупных городах. Несмотря на то, что в городах с малой численностью населения, относящихся к категории малых и средних, имеются идентичные проблемы в области координированного управления магистральными улицами, на таких участках нет возможности оперативного изменения управления из-за отсутствия специального оборудования и осуществления постоянного мониторинга и контроля над транспортной ситуацией. Для повышения эффективности управления на данных участках, расположенных в малых и средних городах, необходимо разработать способ оценки эффективности применения координированного управления, что и является основной целью выполненного исследования. Для достижения поставленной цели определены основные задачи: 1. Выполнить анализ существующих методов оценки эффективности применения координированного типа управления. 2. Провести натурные исследования магистральной улицы, расположенной в городе с малой численностью населения. 3. Построить имитационную модель объекта исследования и провести процедуру моделирования движения транспортного потока с учетом различных сочетаний интенсивностей по магистральному и смежному направлению. 4. Выполнить анализ величины средней задержки на объекте исследования по рассматриваемым направлениям и разработать способ оценки эффективности применения координированного типа управления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вопросу координированного управления посвящено большое количество научных трудов, в которых рассматриваются принципы организации такого типа управления, крите-

рии ввода, а также методы оценки эффективности применения данного типа управления. В труде А. А. Власова [1], рассмотрены модели, позволяющие оценить целесообразность координации светофорных объектов и включения в систему координации новых светофорных объектов (перекрестков), например, в зарубежной практике предложен индекс желательности координации (*IDI – Intercoordination Desirability Index*), который рассчитывается с использованием формулы

$$IDI = \left(\frac{0.5}{1+t} \right) \times \left(\frac{q_{\max}}{q_T} - (N - 2) \right), \quad (1)$$

где t – время движения по связи, мин; q_{\max} – максимальный поток со смежного регулируемого пересечения, авт./ч; q_T – суммарный поток по всем направлениям со смежного регулируемого пересечения, авт./ч; N – число полос движения, с которых осуществляется движение по маршруту координации.

Градации полученного значения *IDI*, представленная в таблице 1, позволяет установить

возможность включения нового светофорного объекта в существующую систему координации.

В зарубежной практике, согласно представленному обзору в источнике [1], распространено применение индекса связности (*CI – Coupling Index*), который также позволяет оценить возможность включения нового светофорного объекта в существующую систему координации по результату расчета индекса с использованием формулы

$$CI = \frac{V}{(D/0,62)^2}, \quad (2)$$

где V – интенсивность движения для анализируемого периода, тыс. авт./ч; D – длина связи, км.

В результате расчета с использованием градации диапазонов возможных значений индекса связности, представленных в таблице 2, возможно оценить целесообразность включения в систему координации нового светофорного объекта.

Таблица 1

Градация индекса желательности координации (IDI)

Источник: Составлено авторами.

Table 1

Gradation of Coordination Desirability Index (IDI)

Source: compiled by the authors.

Диапазон значения индекса желательности координации (IDI)	Результат
0,35 – 1	Возможно включение нового светофорного объекта в систему координации
0 – 0,35	Невозможно включение нового светофорного объекта в систему координации

Таблица 2

Градация индекса связности (CI)

Источник: Составлено авторами.

Table 2

Gradation of the cohesion index (CI)

Source: compiled by the authors.

Диапазон значения индекса связности (CI)	Результат
0 – 0,1	Нет необходимости включения нового светофорного объекта в систему координации
1 – 50	Желательно включить новый светофорный объект в систему координации
> 50	Рекомендуется включить новый светофорный объект в систему координации

В источнике [1] приведено еще несколько формул для расчета индекса связности, которые также как и предыдущие (1) и (2) позволяют оценить целесообразность включения нового светофорного объекта в систему координации. Следует отметить, что представленные формулы не позволяют оценить эффективность применения уже установленной координации, что является необходимым мероприятием в условиях современных городов, ввиду возросшей интенсивности движения, а также с учетом ее довольно частых перепадов.

В отечественной практике, в частности, в методических рекомендациях по оптимизации светофорного регулирования и координации работы светофорных объектов, представленных на официальном сайте ОАО «НИИАТ», аналогичным образом для определения целесообразности включения светофорного объекта в зону координируемости применяется фактор координируемости (*CF* – *coordination factor*), определяемый с использованием формулы

$$CF = \max(CF1, CF2) + A_p + A_y + A_c, \quad (3)$$

где *CF1* – фактор координируемости по времени движения; *CF2* – фактор переполнения транспортной связи средним потоком за цикл регулирования; *A_p* – фактор наличия групп в цикле регулирования при установленной интенсивности; *A_y* – установленная интенсивность; *A_c* – установленная длительность цикла регулирования.

Для транспортных связей, время движения по которым превышает 80 с, значение *CF1* принимается равным 0. Для транспортных связей, время движения по которым составляет менее 4 с, возможно возникновение эффекта блоки-

рования и координация светофорных объектов является обязательной. Соответственно, значение *CF1* принимается равным 100. Для связей, время движения по которым варьируется в диапазоне от 4 до 80 с, значение *CF1* определяется по формуле

$$CF1 = 100 - \frac{(time - 4) \cdot 100}{76}. \quad (4)$$

Фактор переполнения транспортной связи средним потоком за цикл регулирования (*CF2*) рассчитывается по формуле

$$CF2 = 100 - \frac{AT}{SS}, \quad (5)$$

где *AT* (*Average Traffic*) – средняя интенсивность движения за цикл регулирования, ед./цикл; *SS* (*Storage Space*) – пропускная способность рассматриваемого участка ед./цикл.

В данном случае составляющие, необходимые для расчета *CF2*, определяются с использованием формул (6) и (7):

$$AT = \frac{q \cdot C}{3600}, \quad (6)$$

где *q* – интенсивность движения, ед./ч; *C* – установленная длительность цикла регулирования, с.

$$SS = \frac{n \cdot LD}{VL}, \quad (7)$$

где *n* – число полос движения, *LD* – длина связи между участками, м; *VL* – средняя длина автомобилей, м.

В результате расчета полученные данные интерпретируются с учетом градации, представленной в таблице 3.

Таблица 3
Интерпретация диапазонов значений коэффициента координации (*CF*)
Источник: Составлено авторами.

Table 3
Interpretation of Coordination Factor (*CF*) value ranges
Source: compiled by the authors.

Диапазон значения коэффициента координации (<i>CF</i>)	Результат
> 80	Рекомендуется включить новый светофорный объект в систему координации
20 – 80	Возможно включить новый светофорный объект в систему координации
0 – 20	Нет необходимости включения нового светофорного объекта в систему координации

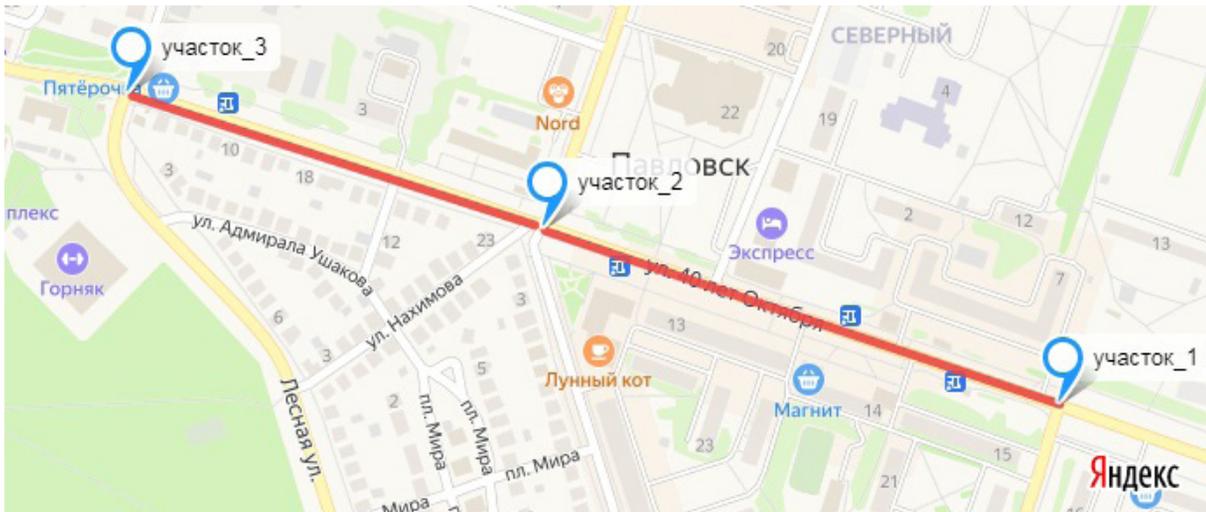


Рисунок 1 – Вид улицы 40 лет Октября в г. Павловске
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – View of 40 Let Oktiabria Street in the city of Pavlovsk
Source: compiled by the authors.

Аналогичным образом отраженный метод позволяет оценить возможность включения новых светофорных объектов в зону координации, но не позволяет оценить эффективность. Кроме представленных формул (1) – (3) в научной практике есть много исследований, в которых описываются условия ввода и основное оборудование для реализации координированного типа управления [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10], тем не менее вопрос эффективности его применения координированного управления особенно с учетом изменения интенсивности дорожного движения остается открытым.

ЭКСПЕРИМЕНТ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования территории Воронежской области и отдельных муниципалитетов показали, что в городах с малой и средней численностью населения отсутствует возможность постоянного мониторинга транспортной сети и управление транспортными потоками с использованием светофоров производится по жестким программам, без возможности оперативного изменения [11]. На магистральных улицах, управление на которых координированно, наблюдается схожая ситуация. В каче-

стве объекта исследования определена магистральная ул. 40 лет Октября, расположенная в г. Павловске Воронежской области (рисунок 1), протяженностью 849 м. В координации находится 3 перекрестка:

- 1) участок_1 – ул. 40 лет Октября – мкр-н Гранитный;
- 2) участок_2 – ул. 40 лет Октября – ул. Голя;
- 3) участок_3 – ул. 40 лет Октября – ул. Лесная (см. рисунок 1).

На магистральной улице действует пять программ координации, переключение которых происходит в зависимости от дня недели и времени суток, в среднем длительность режима изменяется от 72 до 96 с.

Выполненные натурные исследования показали, что в течение дня на объекте исследования средняя часовая интенсивность по магистральной улице (N_m) и смежным направлениям (N_c) неравномерна (рисунок 2). На участке в течение дня постоянно сохраняется режим координации с целью обеспечения движения по ул. 40 лет Октября с минимальным числом непреднамеренных остановок.

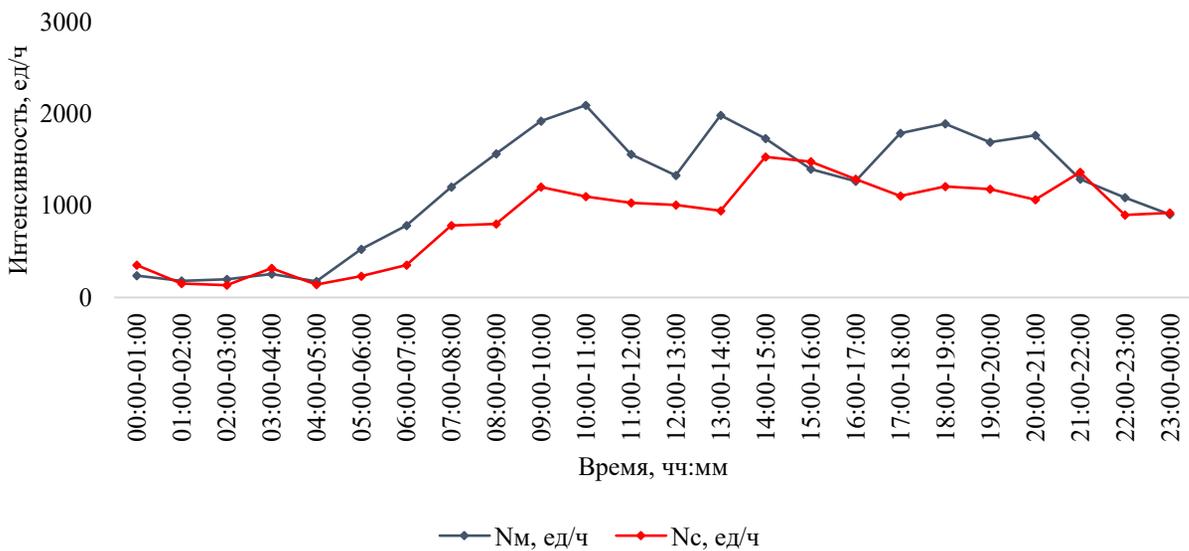


Рисунок 2 – Результаты исследования интенсивности движения на магистральной улице в г. Павловске
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Results of the study of traffic intensity on the main street in Pavlovsk city
Source: compiled by the authors.



Рисунок 3 – Результаты мониторинга транспортной ситуации с использованием онлайн-сервиса Google-карты
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Results of transportation situation monitoring using on-line Google-maps service
Source: compiled by the authors.

Натурные обследования рассматриваемой магистральной улицы показали, что на смежных улицах довольно часто наблюдаются заторовые ситуации, что наглядно отражено на рисунке 3.

С целью оценки транспортной ситуации и существующего режима координации в программной среде Any Logic [12] была построена имитационная модель [13, 14, 15, 16, 17, 18] обследуемой магистральной улицы. Оценка адекватности построенной модели осуществлена с использованием U-статистики Зейла [19, 20, 21], которая позволила осуществить

калибровку модели по заданной величине интенсивности и геометрическим показателям. В результате оценки адекватности построенной модели значение главной статистики изменялось в пределе от 0,76 до 0,92, что позволяет судить об адекватности построенной модели.

Для оценки эффективности использования координированного типа управления была определена величина средней задержки [22, 23, 24, 25] на главном (магистральном) направлении и второстепенных (смежных участках). Полученные результаты представлены в таблице 4 (рисунок 4) и таблице 5 (рисунок 5).

Таблица 4
Значения средней величины задержки на магистральной улице
Источник: составлено авторами.

Table 4
Values of average delay on the main street
Source: compiled by the authors.

$N_{с'}$ ед/ч \ $N_{м'}$ ед/ч	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
250	115,5	115,93	198,46	280,77	343,32	393,09	482,04	496,14	528,65
500	142,87	149,92	203,43	322,69	435,68	498,5	478,39	564,62	546,08
750	151,56	209,69	348,02	366,93	443,61	499,92	498,86	537,03	558,83
1000	200,85	332,96	402,69	365,82	460,33	527,14	564,65	554,4	572,56
1250	220,9	348,42	446,1	433,13	459,37	472,55	564,64	631,55	587,98
1500	237,65	378,44	453,3	471,7	492,05	523,01	545,19	579,48	591,13
1750	305,71	384,53	462,53	525,16	477,64	546,23	595,55	552,13	617,19
2000	311,37	384,69	393,47	461,39	495,58	480,16	608,99	599,37	552,43
2250	338,09	405,9	406,22	526,81	560,92	505,01	579,16	631,85	567,32
2500	280,1	390,77	489,19	490,07	535,82	563,11	528,27	607,88	601,66
2750	366,13	445,8	508,49	460,3	549,68	551,98	561,28	564,12	626,42
3000	335,79	443,35	471,78	608,67	568,42	597,95	593,09	628,13	570,72

Таблица 5
Значения средней величины задержки на смежных участках
Источник: составлено авторами.

Table 5
Values of average delay on adjacent sections
Source: compiled by the authors.

$N_{с'}$ ед/ч \ $N_{м'}$ ед/ч	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
250	93,73	95,92	165,09	264,98	308,85	400,13	452,99	452,69	487,98
500	101,69	107,43	331,03	326,01	448,35	478,71	446,704	499,11	490,8
750	120,38	171,52	331,95	387,06	466,18	475,94	461,07	497,83	426,24
1000	183,66	325,08	395,36	442,12	444,36	524,08	540,85	521,78	554,04
1250	234,74	386,99	476,18	465,26	481,74	535,72	534,08	563	540,88
1500	269,57	432,93	458	511,25	537,25	504,37	543,73	572,63	562,29
1750	353,52	437,45	481,03	542,7	535,16	542,57	604,82	548,35	565,23
2000	380,83	457,75	444,43	503,69	511,69	497,82	593,56	618,09	555,93
2250	395,98	483,52	559,83	549,58	570,36	590,75	576,04	644,71	543,52
2500	305,51	474,85	486,17	527,49	530,74	561,26	547,12	569,46	587,98
2750	420,27	455,1	554,78	512,27	589,81	569,38	543,62	557,42	599,86
3000	374,57	511,97	523,59	578,46	570,05	557,67	601,24	581,37	546,05

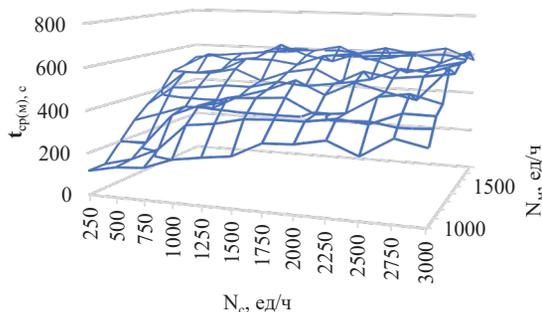


Рисунок 4 – Графическое представление изменения средней величины задержки по магистральной улице
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Graphical representation of the change in average delay along a main street
Source: compiled by the authors.

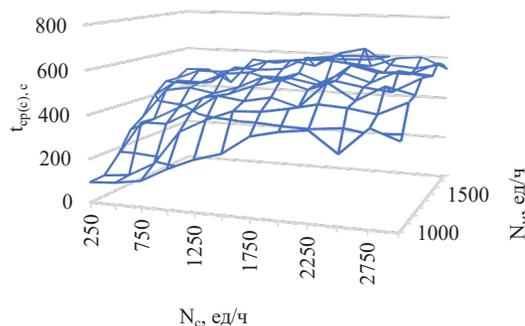
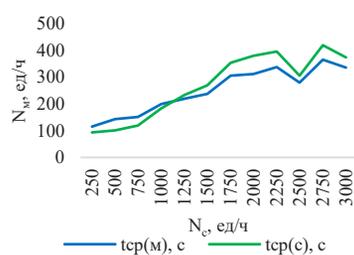
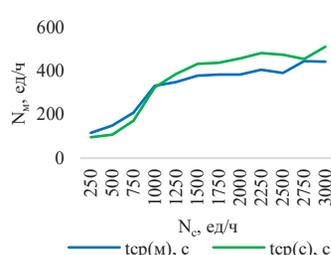


Рисунок 5 – Графическое представление изменения средней величины задержки на смежных участках
Источник: составлено авторами.

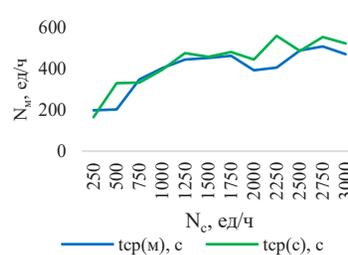
Figure 5 – Graphical representation of the change in the average delay on adjacent sites
Source: compiled by the authors.



а – при $N_m = 1000$ ед./ч



б – при $N_m = 1100$ ед./ч



в – при $N_m = 1200$ ед./ч

Рисунок 6 – Линейные графики изменения средней величины задержки по магистральному и смежным направлениям при суммарной N_m от 1,000 до 1,200 units/hr
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Line graphs of average delay variation along the mainline and adjacent directions for total N_m from 1,000 to 1,200 units/hr
Source: compiled by the authors.

В ходе моделирования было установлено, что при относительно невысоких значениях величины интенсивности магистральной улицы (от 1000 до 1200 ед./ч) средняя величина задержки на смежных участках довольно часто превышает аналогичное значение по магистральной улице (рисунок 6), что позволяет судить о неэффективности применения координированного типа управления в представленных соотношения интенсивности.

Интенсивность по смежным участкам в данном случае представлена в виде суммы интенсивностей входящих транспортных потоков, в среднем по одному смежному направле-

нию интенсивность изменялась в пределах от 50 до 600 ед./ч.

Анализ изменения средней величины задержки по рассматриваемым направлениям – магистральному и связным участкам при интенсивности транспортного потока на магистральной улице свыше 1200 ед./ч показал, что в большинстве случаев рассматриваемая величина по магистральному направлению выше рассматриваемой величины на смежных участках (рисунок 7), что свидетельствует об эффективности установления координированного типа управления и организации движения с минимальным числом остановок по ул. 40 лет Октября.

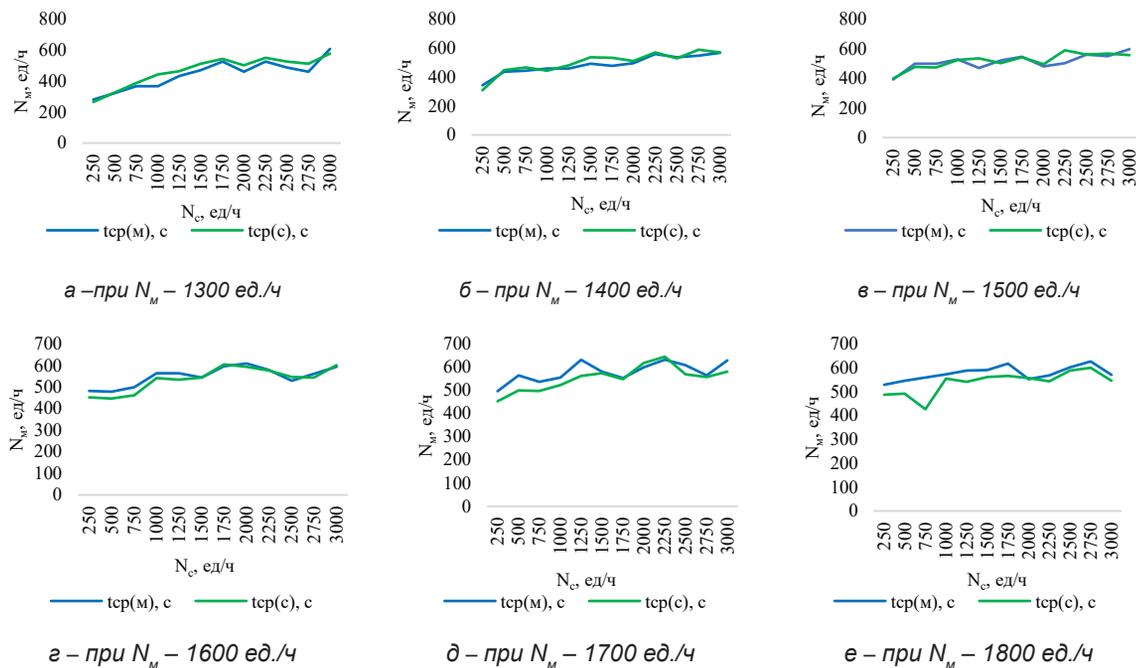


Рисунок 7 – Линейные графики изменения средней величины задержки по магистральному и смежным направлениям при суммарной N_M от 1300 до 1800 ед./ч
 Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Line graphs of average delay variation along the mainline and adjacent directions for total N_M from 1300 to 1800 units/hr
 Source: compiled by the authors.

В результате выполненной оценки полученных результатов и последующей разработке способа оценки эффективности координированного типа управления значения интенсивности заданные в модели были представлены в аналитическом виде, в пользование был введен коэффициент соотношения интенсивностей (k_N) при координированном управлении:

$$k_N = \frac{\bar{N}_c}{\bar{N}_M}, \quad (8)$$

где k_N – коэффициент соотношения интенсивностей дорожного движения; \bar{N}_c – средняя интенсивность движения по связным участкам, ед./ч; \bar{N}_M – средняя интенсивность движения по магистральному участку, ед./ч.

Аналогичным образом соотношения полученных значений средней величины задержки предложено рассчитать с использованием введенного коэффициента соотношения средних задержек (k_t):

$$k_N = \frac{\bar{N}_c}{\bar{N}_M}, \quad (9)$$

где k_t – коэффициент соотношения средних задержек на рассматриваемом участке; \bar{t}_c – средняя задержка при движении по связным участкам, с; \bar{t}_0 – средняя задержка при движении магистральному участку, с.

Таким образом, с использованием введенных коэффициентов (8) и (9), полученные результаты были представлены в виде соотношений, где определенному значению k_N соответствует определенное значение k_t . Обработка полученных результатов позволила построить точечный график и установить области эффективного и неэффективного применения координированного управления (рисунок 8).

Определено, что при значении $k_t > 1$, которому соответствуют определенные значения k_N применение координированного типа управления не является эффективным, т.к. среднее значение величины задержки на смежных участках превышает среднее значение величины задержки на магистральной улице (красная область) (см. рисунок 8).

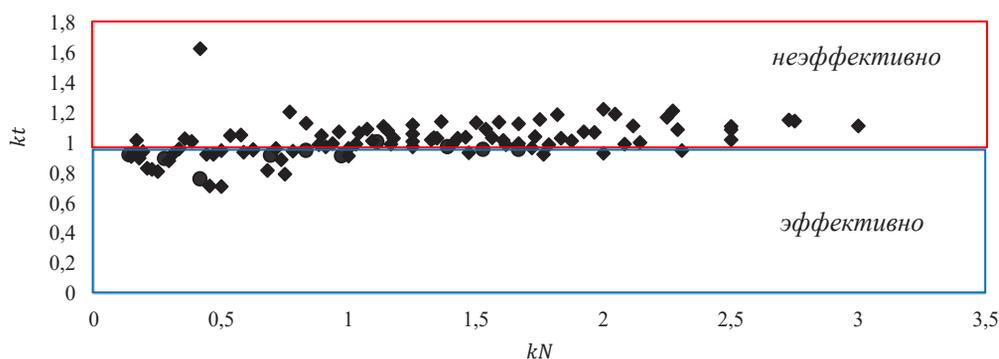


Рисунок 8 – Точечный график соотношения коэффициентов интенсивности и задержки и области эффективного и неэффективного применения координированного типа управления
 Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Dot plot of intensity and delay ratios and areas of effective and ineffective application of coordinated type of management
 Source: compiled by the authors.

Таблица 6
 Режимы применения координированного типа управления на ул. 40 лет Октября в г. Павловске
 Источник: составлено авторами.

Table 6
 Modes of use of coordinated type of control on 40 Let Oktjabria St. in Pavlovsk city
 Source: compiled by the authors.

Время \ День недели	00:00-05:00	05:00-07:00	07:00-11:00	11:00-14:00	14:00-18:00	18:00-20:00	20:00-00:00
Понедельник	Red	Blue	Blue	Red	Blue	Blue	Red
Вторник	Red	Blue	Blue	Red	Blue	Blue	Blue
Среда	Red	Red	Blue	Red	Blue	Blue	Red
Четверг	Red	Red	Blue	Red	Blue	Blue	Blue
Пятница	Red	Blue	Blue	Blue	Blue	Red	Blue
Суббота	Red	Blue	Red	Blue	Red	Red	Blue
Воскресенье	Red	Blue	Blue	Blue	Blue	Red	Blue

При $k_t < 1$ применение координированного типа управления является эффективным, т.к. средняя задержка на магистральной улице выше средней задержки на смежных участках, в таком случае надо минимизировать преднамеренные остановки на основном направлении и обеспечить координацию (синяя область) (см. рисунок 8).

ОБСУЖДЕНИЕ

В связи с тем, что транспортная система в рассматриваемом городе малой численности населения является устоявшейся, т.е. интенсивность в течение недели изменяется в определенном пределе и периоде, для рас-

сматриваемой магистральной улицы с учетом полученных результатов и разработанного графического способа оценки эффективности применения координированного типа управления (см. рисунок 8) была получена новая программа координации, согласно которой в определенные периоды времени не рекомендуется использовать координированный тип управления (красные ячейки) и рекомендуется (синие ячейки) (таблица 6).

ВЫВОД

В ходе выполненного исследования был сделан анализ существующих методов установления координированного типа управле-

ния. Установлено, что в основном данные методы позволяют определить необходимость включения нового светофорного объекта в существующую систему координации, но проверить эффективность уже существующего режима координации на магистральных улицах, особенно при отсутствии специализированного оборудования, что характерно для малых и средних городов, не представляется возможным. В связи с этим в рамках данного исследования был разработан способ оценки эффективности координированного типа управления на основании сопоставления средней величины интенсивности смежных и магистрального участка и соответствующим им средним величинам задержки. В результате выполненного моделирования и обработки полученных результатов был разработан графический способ оценки эффективности применения координированного типа управления. Использование полученных результатов на объекте исследования позволило установить временные периоды применения координации и жёсткого некоординированного управления.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пильгейкина И. А., Власов А. А. Критерии формирования зон координированного управления координированными объектами // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2017. № 2(9). С. 202 – 208.
2. Власов А. А., Горелов А. М. Координированное управление въездами на автомагистраль // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. № 2(21). 100 с.
3. Кадасев Д. А., Полоцкий Д. В. Координированное светофорное управление автотранспортными потоками на магистрали г. Липецка // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2016. Т. 3, № 1 (4). С. 413 – 416.
4. Бирюков В. К., Власов А. В., Демченко К. Н. Инструменты для уменьшения нагрузок на улично-дорожную сеть крупных городов // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 2-1(33). С. 29 – 30.
5. Филиппова Д. М., Черняго А. Б., Слободчикова Н. А. Уточнение характеристик транспортного потока при организации координированного управления движением // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2013. № 2(5). С. 122 – 125.
6. Пильгейкина И. А. Влияние эффекта координации на задержку транспортных средств // Мир транспорта и технологических машин. 2020. № 1(68). С. 59–64. DOI 10.33979/2073-7432-2020-68-1-59-64.
7. Development of a method for evaluation of the efficiency of the coordinated type of management as referred to main streets / S. V. Dorokhin, V. A. Ivannikov, D. V. Likhachev, A. Yu. Artemov // E3S Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference “Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering” (ERSME-2023), Rostov-on-Don, Russia, 01–03 March 2023 года. Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2023. P. 04016.
8. Li, L. H. Study on coordinated control of urban regional traffic system based on copula function / L. H. Li, W. H. Wang, Y. J. Xue // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Zhengzhou, 19–21 November 2021. Zhengzhou, 2022. P. 121650T.
9. Lyapin, S. Coordinated Control of Traffic Lights on the Main Road with Intelligent Traffic Management / S. Lyapin, D. Kadasev, N. Voronin // Proceedings - 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021: 3, Lipetsk, 10–12 November 2021 года. Lipetsk, 2021. P. 964–967.
10. Новиков А. Н., Еремин С. В., Шевцова А. Г. Основные принципы расчета программы светофорного регулирования на основе управляемых сетей и потока насыщения. *Вестник СибАДИ*. 2019;16(6):680–691. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-680-691>
11. Шевцова А. Г., Мочалина Ю. А. Обзор новых технических средств организации дорожного движения // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. 2015. Т. 2, № 2(3). С. 672–677.
12. Моделирование процесса движения на магистральной улице г. Воронежа в программной среде AnyLogic / С. В. Дорохин, Д. В. Лихачев, А. Ю. Артемов, А. В. Марусин // Воронежский научно-технический вестник. 2022. Т. 4, № 4(42). С. 73 – 84.
13. Басков В. Н., Исаева Е. И. Энтропия как модель прогноза загруженности транспортной сети // Мир транспорта и технологических машин. 2016. № 4(55). С. 111–117.
14. Фатхутдинов А. Ф. Применение имитационного моделирования для оптимизации дорожного движения // Вестник современных исследований. 2018. № 12.15(27). С. 265 – 271.
15. Novikov A. Modeling of traffic-light signalization depending on the quality of traffic flow in the city / A. Novikov, I. Novikov, A. Shevtsova // Journal of Applied Engineering Science. 2019. Vol. 17. No 2. P. 175 – 181.
16. Definition of perspective scheme of organization of traffic using methods of forecasting and modeling / V. M. Vlasov, A. N. Novikov, I. A. Novikov, A. G. Shevtsova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment, Tomsk, 04–06 December 2017. Vol. 327, 4. Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. P. 042116.
17. Information technologies and management of transport systems development of the approach to assessing adaptation of the intersection transport model / A. Novikov, S. Glagolev, I. Novikov, A. Shevtsova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2019 International

Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering, ICIAE 2019, Irkutsk, 27 May – 01 2019. Vol. 632. – Irkutsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012052.

18. The Dynamic Traffic Modelling System / S. V. Dorokhin, D. V. Likhachev, A. Yu. Artemov [et al.] // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 402 LNNS.P. 1586 – 1594.

19. Зырянов В. В. Методы оценки адекватности результатов моделирования // *Инженерный вестник Дона*. 2013. № 2(25). 132 с.

20. Зырянов В. В. Моделирование при транспортном обслуживании мега-событий // *Инженерный вестник Дона*. 2011. № 4(18). С. 548–551.

21. Зырянов В. В., Семчугова Е. Ю., Скрынник А. М. Применение информационных технологий при повышении мобильности и обеспечении транспортной безопасности // *Инженерный вестник Дона*. 2012. № 4 – 1(22). 118 с.

22. Новиков И. А., Шевцова А. Г. Влияние изменения задержек транспортных средств на количество режимов работы светофорного объекта // *Мир транспорта и технологических машин*. 2011. № 4(35). С. 62–68.

23. Mathematical Modeling of Working Operations for the Road-Building Machines Based on Performance Factors / E. A. Volkov, I. A. Novikov, N. A. Shchetinin [et al.] // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. Vol. 13. No 6. P. 2353–2357.

24. Improvement of the current version of road traffic regulations of the Russian federation as a promising approach to road safety / V. A. Zelikov, G. A. Denisov, S. V. Dorokhin [et al.] // *Studies in Computational Intelligence*. 2019. Vol. 826. P. 1081–1088.

25. Novikov A. Study of the impact of type and condition of the road surface on parameters of signalized intersection / A. Novikov, I. Novikov, A. Shevtsova // *Transportation Research Procedia*, Saint Petersburg, 27–29 September 2018. Vol. 36. Saint Petersburg: Elsevier B.V., 2018. P. 548 – 555.

REFERENCES

1. Pil'gejkina I. A., Vlasov A. A. Kriteriai formirovaniya zon koordinirovannogo upravleniya koordinirovannyimi obe'ktami [Criteria for the formation of coordinated management zones for coordinated objects]. *Obrazovanie i nauka v sovremennom mire. Innovacii*. 2017; 2 (9): 202 – 208. (In Russ.)

2. Vlasov A. A., Gorelov A. M. Koordinirovannoe upravlenie v'ezdami na avtomagistral' [Coordinated management of motorway entrances]. *Internet-zhurnal Naukovedenie*. 2014; 2 (21): 100. (In Russ.)

3. Kadasev D. A., Polockij D. V. Koordinirovannoe svetofornoe upravlenie avtotransportnymi potokami na magistrali g. Lipecka [Coordinated traffic light control on the Lipetsk highway]. *Al'ternativnye istochniki jenergii v transportno-tehnologicheskom komplekse: problemy i perspektivy racional'nogo ispol'zovanija*. 2016; T. 3, № 1 (4): 413 – 416. (In Russ.)

4. Birjukov V. K., Vlasov A. V., Demchenko K. N. Instrumenty dlja umen'shenija nagruzok na

ulichno-dorozhnyju set' krupnyh gorodov [Tools to reduce loads on the road network of large cities]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. 2015; 2-1(33): 29 – 30. (In Russ.)

5. Filippova D. M., Chernjago A. B., Slobodchikova N. A. Utochnenie harakteristik transportnogo potoka pri organizacii koordinirovannogo upravlenija dvizheniem [Clarification of transport flow characteristics in the organization of coordinated traffic control]. *Izvestija vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2013; 2(5): 122 – 125. (In Russ.)

6. Pil'gejkina I. A. Vlijanie jeffekta koordinacii na zaderzhku transportnyh sredstv [Effect of coordination effect on vehicle delay]. *Mir transporta i tehnologicheskij mashin*. 2020; 1(68): 59 – 64. DOI 10.33979/2073-7432-2020-68-1-59-64. (In Russ.)

7. Dorokhin S. V., Ivannikov V. A., Likhachev D. V., Artemov A. Yu. Development of a method for evaluation of the efficiency of the coordinated type of management as referred to main streets. *E3S Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference "Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering" (ERSME-2023)*, Rostov-on-Don, Russia, 01 – 03 March 2023. Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2023. P. 04016.

8. Li, L. H, Wang W. H., Xue Y. J. Study on coordinated control of urban regional traffic system based on copula function. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Zhengzhou*, 19 – 21 November 2021. Zhengzhou, 2022. P. 121650T.

9. Lyapin S., Kadasev D., Voronin N. Coordinated Control of Traffic Lights on the Main Road with Intelligent Traffic Management. *Proceedings - 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021*: 3, Lipetsk, 10 – 12 November 2021. Lipetsk, 2021. P. 964 – 967.

10. Novikov A. N., Eremin S. V., Shevtsova A. G. Program of light-format regulation on the basis of controlled networks and the saturations' flow: basic principles of calculation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019; 16(6): 680-691. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-680-691>

11. Shevcova A. G., Mochalina Ju. A. Obzor novykh tehnicheskijh sredstv organizacii dorozhnogo dvizhenija [Review of new technical means of traffic management]. *Al'ternativnye istochniki jenergii v transportno-tehnologicheskom komplekse: problemy i perspektivy racional'nogo ispol'zovanija*. 2015; T. 2, № 2(3): 672 – 677. (In Russ.)

12. Dorohin S. V., Lihachev D. V., Artemov A. Ju., Marusin A. V. Modelirovanie processa dvizhenija na magistral'noj ulice G. Voronezh v programnoj srede Any Logic [Modeling of the traffic process on the main street G. Voronezh in the software environment Any Logic]. *Voronezhskij nauchno-tehnicheskij Vestnik*. 2022; T. 4, № 4(42): 73 – 84. (In Russ.)

13. Baskov V. N., Isaeva E. I. Jentropija kak model' prognoza zagruzhenosti transportnoj seti [Entropy as a model for predicting traffic congestion]. *Mir transporta i tehnologicheskij mashin*. 2016; № 4(55): 111 – 117. (In Russ.)

14. Fathutdinov A. F. Primenenie imitacionnogo modelirovaniya dlja optimizacii dorozhnogo dvizhenija [Using Simulation to Optimize Traffic]. *Vestnik sovremennyh issledovanij*. 2018; 12.15(27): 265 – 271. (In Russ.)

15. Novikov A., Novikov I., Shevtsova A. Modeling of traffic-light signalization depending on the quality of traffic flow in the city. *Journal of Applied Engineering Science*. 2019; Vol. 17. No 2: 175 – 181.

16. Vlasov V. M., Novikov A. N., Novikov I. A., Shevtsova A. G. Definition of perspective scheme of organization of traffic using methods of forecasting and modeling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment*, Tomsk, 04 – 06 December 2017. Vol. 327, 4. Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. P. 042116.

17. Novikov A., Glagolev S., Novikov I., Shevtsova A. Information technologies and management of transport systems development of the approach to assessing adaptation of the intersection transport model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2019 International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering, IC12AE 2019*, Irkutsk, 27 may – 01 2019. Vol. 632. Irkutsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012052.

18. Dorokhin S. V., Likhachev D. V., Artemov A. Yu. [et al.] The Dynamic Traffic Modelling System. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 402 LNNS. P. 1586 – 1594.

19. Zyrjanov V. V. Metody ocenki adekvatnosti rezultatov modelirovaniya [Methods for assessing the adequacy of modeling results]. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2013; 2(25): 132. (In Russ.)

20. Zyrjanov V. V. Modelirovanie pri transportnom obsluzhivanii mega-sobytij [Modeling during transport maintenance of mega-events]. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2011; 4(18): 548 – 551. (In Russ.)

21. Zyrjanov V. V., Semchugova E. Ju., Skrynnik A. M. Primenenie informacionnyh tehnologij pri povyshenii mobil'nosti i obespechenii transportnoj bezopasnosti [Application of information technologies in improving mobility and ensuring transport security]. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2012; 4 – 1(22): 118. (In Russ.)

22. Novikov I. A., Shevcova A. G. Vlijanie izmeneniya zaderzhek transportnyh sredstv na kolichestvo re-

zhimov raboty svetofornogo ob'ekta [Effect of changes in vehicle delays on the number of traffic lights operating modes]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. 2011; № 4(35): 62 – 68. (In Russ.)

23. Volkov E. A., Novikov I. A., Shchetinin N. A. [et al.] Mathematical Modeling of Working Operations for the Road-Building Machines Based on Performance Factors. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018; Vol. 13. No 6: 2353 – 2357.

24. Zelikov V. A., Denisov G. A., Dorokhin S. V. [et al.] Improvement of the current version of road traffic regulations of the Russian federation as a promising approach to road safety. *Studies in Computational Intelligence*. 2019; Vol. 826: 1081 – 1088.

25. Novikov A., Novikov I., Shevtsova A. Study of the impact of type and condition of the road surface on parameters of signalized intersection. *Transportation Research Procedia*. Saint Petersburg, 27–29 September 2018. Vol. 36. Saint Petersburg: Elsevier B. V., 2018: P. 548 – 555.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Дорохин С.В. Постановка цели и задач исследования.

Артемов А.Ю. Проведение натурных исследований, выполнение эксперимента, анализ результатов.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Sergei V. Dorokhin. Purposes and objectives of the study statement

Aleksandr Yu. Artemov. Studies conducting, experiments carry out, results analyzing.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дорохин Сергей Владимирович – д-р техн. наук, доц., декан автомобильного факультета, SPIN-код: 9913-0381.

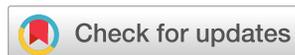
Артемов Александр Юрьевич – аспирант автомобильного факультета, SPIN-код: 1302-7788.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergei V. Dorokhin – Dr. of Sci., Associate Professor, Dean of the Automobile Faculty, SPIN-код: 9913-0381.

Alexander Yu. Artemov – Postgraduate student of the Automobile Faculty, SPIN-код: 1302-7788.

Научная статья
УДК 656.13
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-600-617>
EDN: SSWLJU



РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ МНОГОПОЛОСНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ПЕРЕСЕЧЕНИЙ С ПРИОРИТЕТОМ ДВИЖЕНИЯ НА КОЛЬЦЕ

Н. М. Каримов, А. Ю. Михайлов*

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

newday-87@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9607-4201>,
89148701840@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1946-0659>
*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. В последние годы в Российской Федерации для кольцевых пересечений дорог общего пользования разработан целый ряд методических и нормативных документов. В частности, предложено оценивать качество организации дорожного движения на кольцевых пересечениях показателем «уровень обслуживания», измеряемым величиной средней задержки на входах на кольцевые пересечения. Распространение критерия «средняя задержка» на проектирование кольцевых пересечений требует разработки методики оценки пропускной способности полос движения на входах на многополосные кольца.

Цель исследования. Разработка метода оценки пропускной способности многополосных кольцевых пересечений.

Объект исследования. Процесс функционирования многополосных кольцевых пересечений.

Предмет исследования. Значения параметров, характеризующих взаимодействие транспортных потоков в конфликтных точках многополосных кольцевых пересечений.

Теоретические основы исследования. Научно обоснованная адаптация модели оценки пропускной способности многополосных кольцевых пересечений, основанная на использовании конфликтных точек и функции принятия интервалов к условиям дорожного движения в городах Российской Федерации.

Методика исследования. Обработывалась видеосъемка многополосных кольцевых пересечений в городах Братск, Владивосток, Иркутск, Липецк, Находка, Оренбург, Петрозаводск, Псков. На каждой полосе кольцевой проезжей части фиксировались интервалы в потоке, измеряемые между передними бамперами транспортных средств. Отмечались принятые и отвергнутые интервалы, а также количество транспортных средств, использовавших принятые интервалы. Определение значений критических интервалов и интервалов следования из очереди выполнено с использованием метода Сиглоха, основанного на линейной регрессии.

Результаты. Обоснована модель оценки пропускной способности на входе на многополосное кольцевое пересечение. Установлены значения критических интервалов, интервалов следования из очереди каждой из полос входа на 2- и 3-полосные кольцевые пересечения. Определены значения минимальных интервалов в потоках, движущихся на кольцевой проезжей части, также установлены зависимости влияния интенсивности движения на свободную долю транспортного потока.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: многополосные кольцевые пересечения, пропускная способность, конфликтные точки, функция принятия интервалов, критические интервалы, интервалы следования из очереди

Статья поступила в редакцию 07.08.2023; одобрена после рецензирования 06.10.2023; принята к публикации 24.10.2023.

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: Каримов Н. М., Михайлов А. Ю. Разработка метода оценки пропускной способности многополосных кольцевых пересечений с приоритетом движения на кольце // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 5 (93). С. 600-617. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-600-617>

© Каримов Н. М., Михайлов А. Ю., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-600-617>
EDN: SSWLJU

DEVELOPING A METHOD OF MULTI-LANE ROUNDABOUTS CAPACITY

Navruz M. Karimov, Aleksandr Yu. Mikhailov*

*Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia*

*newday-87@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9607-4201>,
89148701840@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1946-0659>*

**corresponding author*

ABSTRACT

Introduction. In recent years a number of methodological and regulatory documents have been developed for public road roundabouts in the Russian Federation. In particular it was proposed to evaluate the quality of traffic management at roundabouts by the level of service measured by the average delay at roundabout entrances. The extension of the average delay criterion to the design of roundabouts requires the development of a methodology for estimating the capacity of traffic lanes at multi-lane roundabout entrances.

The aim of the study. Is to develop a methodology for estimating the capacity of multi-lane roundabouts.

The object of the study. Is the functioning of multilane roundabouts.

Subject of the research. Are the regularities of influence of traffic volume on the values of characteristics of transport streams interaction in the conflict points of multilane roundabouts.

Theoretical foundations of the research. The model for estimation of carrying capacity of multilane roundabouts based on the use of conflict points and function of acceptance of intervals is offered.

Research Methodology. The video footage of multi-lane roundabouts in the cities of Bratsk, Vladivostok, Irkutsk, Lipetsk, Nakhodka, Orenburg, Petrozavodsk and Pskov was processed. On each lane of the circular carriageway, intervals in the flow, measured between the front bumpers of vehicles, were recorded. The accepted and rejected headways were registered, as well as the number of vehicles using accepted intervals. The determination of the values of critical headways and follow-up time was performed using the Siegloch's method based on linear regression.

Results. A model for estimating capacity at the entrance to a multi-lane roundabout was validated. The values of critical intervals, queuing intervals of each of the entrance lanes to 2-lane and 3-lane roundabouts were determined. The values of the minimum headways in the flows moving on the circular carriageway are determined, also the dependences of the influence of traffic intensity on the free share of the traffic flow are established.

KEYWORDS: multi-lane roundabouts, capacity, conflict points, gap acceptance function, critical headway, follow up time

The article was submitted 07.08.2023; approved after reviewing 06.10.2023; accepted for publication 24.10.2023.

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. Karimov N. M., Mikhailov A. Yu. Developing a method of multi-lane roundabouts capacity. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (5): 600-617. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-600-617>

© Karimov N. M., Mikhailov A. Yu., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в Российской Федерации совершенствуется методическое обеспечение проектирования транспортной инфраструктуры и оценки качества организации дорожного движения (ОДД). Вместе с тем необходимо дальнейшее развитие методов расчетов пропускной способности, задержек и длин очередей транспортных средств. Исследование по разработке метода расчета многополосных кольцевых пересечений с приоритетным движением на кольце вызвано целым рядом причин.

Последние три десятилетия мировая проектная практика (страны Европы, США, Канада, Австралия, Япония) сосредоточена на исключительном применении кольцевых пересечений, обозначаемых термином roundabout. Основными особенностями пересечений типа roundabout указываются^{1,2}:

- приоритет движения на кольцевой проезжей части;
- компактность – внешний диаметр кольцевой проезжей части не более 70 м;
- скорость движения на кольцевой проезжей части не более 50 км/ч;
- в силу компактности на кольцевой проезжей части отсутствуют зоны переплетения потоков.

Введенный недавно ГОСТ Р 70555–2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Пересечения кольцевые. Правила проектирования»³ учел многие особенности проектирования современных кольцевых пересечений и рекомендует:

- максимальный внешний радиус кольцевой проезжей части – 70 м;
- максимальное количество полос на кольцевой проезжей части – 2;
- 3-полосные кольцевые проезжие части применять в случаях устройства спиралевидной разметки или светофорного регулирования.

Разработанный несколько ранее для городских улично-дорожных сетей документ СП 396.1325800.2018 «Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования»⁴ также предлагает ограниченные количества полос на кольцевых пересечениях:

- количество полос движения кольцевой проезжей части следует назначать в зависимости от интенсивности движения;
- при числе полос движения на кольцевом пересечении более двух следует провести оценку необходимости организации светофорного регулирования на кольцевом пересечении.

СП 396.1325800.2018 не формулирует процедуру оценки необходимости организации светофорного регулирования, но очевидно, что сравнение нерегулируемого и регулируемого кольца должно основываться на использовании критериев: пропускная способность, средние и суммарные задержки транспортных средств, длины очередей. При этом сами методы расчета этих критериев для нерегулируемых и регулируемых кольцевых пересечений имеют существенные различия [1].

В рассматриваемом контексте принципиально важно, что распоряжением Минтранса России от 27.12.2022 № АК-337-р «Методические рекомендации по проведению мониторинга дорожного движения»⁵ критерием оценки уровня обслуживания транспортных потоков на кольцевых пересечениях утверждена средняя задержка транспортных средств (таблица 1).

Очевидно, что критерий «средняя задержка транспортных средств» должен быть распространен на случай проектирования кольцевых пересечений или выполнения проектов ОДД, включающих в своем составе кольцевые пересечения. Для этого можно применять формулу расчета средней (с) руководства HCM 2000, которую предлагает использовать действующий ГОСТ «Дороги автомобильные общего пользования. Пересечения и примыкания.

¹ Режим доступа: <https://www.roundaboutresources.org/roundabout-vs.-traffic-circle.html> (дата обращения: 04.09.2023).

² Режим доступа: <https://www.co.washington.mn.us/DocumentCenter/View/2296/Traffic-Circles-vs-Roundabouts> (дата обращения: 05.02.2022).

³ ГОСТ Р 70555–2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Пересечения кольцевые. Правила проектирования». URL: <https://gostassistant.ru/doc/7c6c4759-d414-424d-824f-5485fd86c554> (дата обращения: 28.03.2023).

⁴ СП 396.1325800.2018 «Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования». URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293732/4293732357.pdf> (дата обращения: 08.02.2023).

⁵ «Методические рекомендации по проведению мониторинга дорожного движения» утверждены распоряжением Минтранса России от 27.12.2022 № АК-337-р. URL: <https://mintrans.gov.ru/file/489281> (дата обращения: 28.03.2023).

Технические требования» (приложение В)⁶

Таблица 1
Шкала уровней обслуживания
для кольцевых пересечений

Источник: методические рекомендации по проведению мониторинга дорожного движения.

Table 1
Service level scale for roundabouts
Source: Methodological Recommendations
on Traffic Monitoring.

Уровень обслуживания	Средняя задержка, с/прив.ед.
A	0–10
B	10–15
C	15–25
D	25–35
E	35–50
F	> 50

$$d = \frac{3600}{c_i} +$$

$$+ 900T \left[\frac{q_i}{c_i} - 1 + \sqrt{\left(\frac{q_i}{c_i} - 1\right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_i}\right)\left(\frac{q_i}{c_i}\right)}{450T}} \right] + 5, \quad (1)$$

где c_i – пропускная способность рассматриваемого второстепенного направления движения, авт/ч; T – продолжительность анализа (например, продолжительность анализа 15 мин, $T = 0,25$ ч), ч; q_i – интенсивность движения рассматриваемого второстепенного направления движения, авт/ч.

Формула (1) содержит всего лишь один предварительно рассчитываемый параметр – пропускную способность полосы движения второстепенного направления движения. Следует отметить, что сложилась практика рассмотрения каждой полосы движения (показатели: пропускная способность, средняя задержка, длина очереди) при детальном анализе всех видов пересечений [1]. Этим объясняется необходимость разработки методики

расчета пропускной способности, рассматривающей в отдельности каждую полосу входа на кольцевое пересечение.

Действующий в настоящее время документ ОДМ 218.2.020–2012 «Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог»⁷ содержит расчет пропускной способности, изложенный ранее в документе «Методические указания по проектированию кольцевых пересечений автомобильных дорог», утвержденном в 1980 г. Последний документ основан на характеристиках транспортных потоков, установленных исследованиями кольцевых пересечений на автомобильных дорогах общего пользования, выполненными в 70-е годы. В целом оценка пропускной способности многополосных кольцевых пересечений рассматривалась лишь в нескольких российских публикациях [2, 3].

В этой связи становится актуальной задачей развитие методов расчета пропускной способности всех видов городских кольцевых пересечений (однополосных, многополосных, включая случаи со спиралевидной разметкой, турбоколец). Актуальность этого исследования можно подтвердить примером структуры методики оценки показателей качества функционирования кольцевого пересечения руководства Highway Capacity Manual 2010⁸. Шаг 5 (рисунок 1) – расчет пропускной способности предваряет расчет значений средней задержки и длины очереди транспортных средств 95% обеспеченности.

Цель выполняемого исследования – разработка метода оценки пропускной способности входов на 2- и 3-полосные кольцевые пересечения с приоритетом движения на кольце [4, 5]. Изучение трехполосных колец вызвано тем, что они эксплуатируются во многих городах Российской Федерации и продолжают вводиться в эксплуатацию (например, в составе развязки КАД г. Санкт-Петербург). На данном этапе не рассматривалось влияние пешеходного движения на пропускную способность, что должно быть объектом отдельного специального исследования.

⁶ ГОСТ Р 58653–2019. Дороги автомобильные общего пользования. Пересечения и примыкания. Технические требования. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200169423> (дата обращения: 28.03.2023).

⁷ ОДМ 218.2.020–2012 Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог // РОСАВТОДОР. URL: <https://rosavtdor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/22-odm-2182020-2012.pdf> (дата обращения: 28.02.2023).

⁸ Highway Capacity Manual 2010. URL: <https://www.jpautoceste.ba/wp-content/uploads/2022/05/Highway-Capacity-Manual-2010-PDFDrive-.pdf> (дата обращения: 23.03.2023).

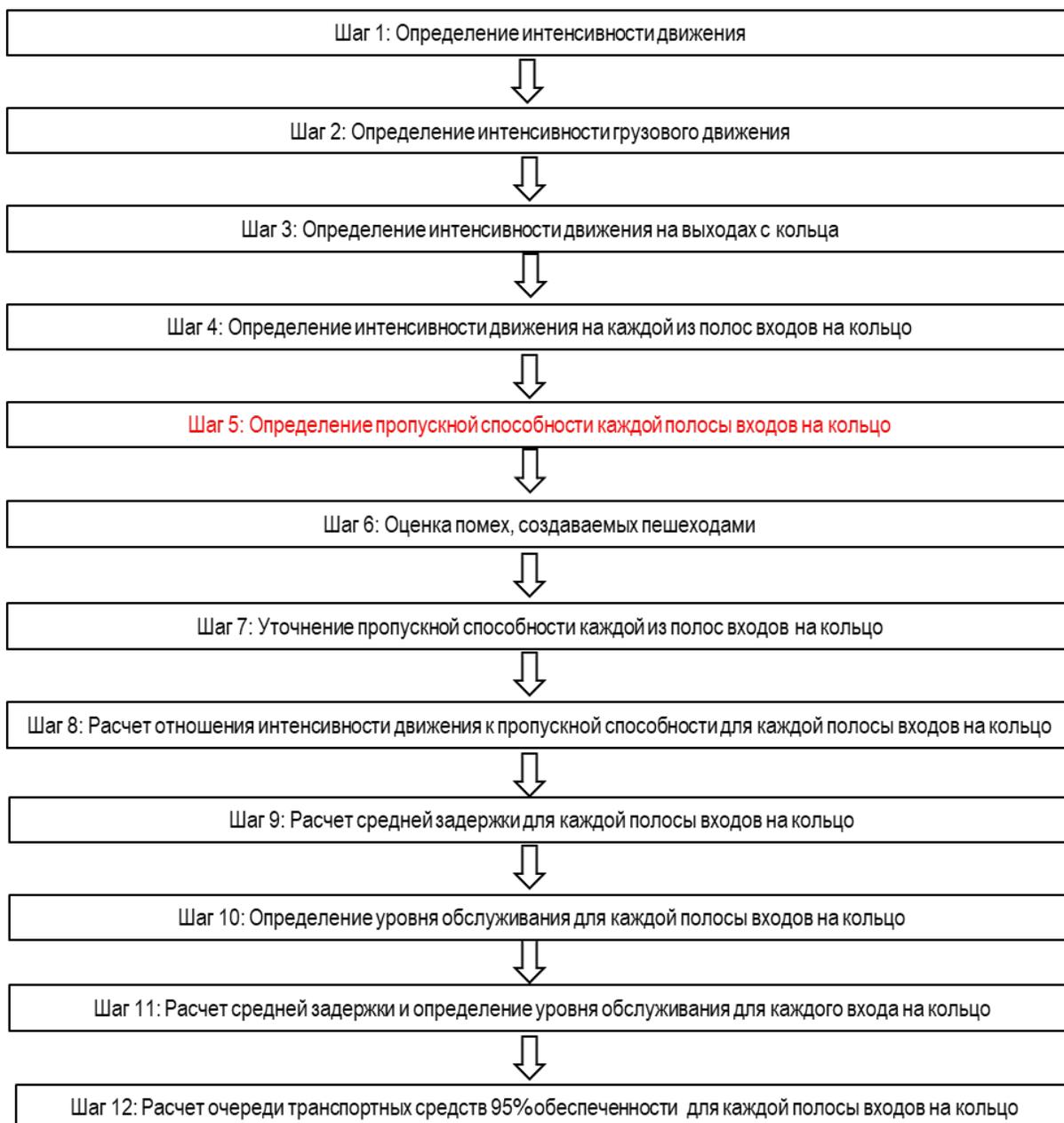


Рисунок 1 – Методика оценки показателей качества функционирования кольцевого пересечения руководства Highway Capacity Manual
Источник: Highway Capacity Manual 2010⁹.

Figure 1 – Methodology for assessing Highway Capacity Manual roundabout performance indicators
Source: Highway Capacity Manual 2010⁹.

⁹ Highway Capacity Manual 2010. URL: <https://www.jpautoceste.ba/wp-content/uploads/2022/05/Highway-Capacity-Manual-2010-PDFDrive-.pdf> (дата обращения: 23.03.2023)

ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОЛОСЫ НА ВХОДЕ НА МНОГОПОЛОСНОЕ КОЛЬЦЕВОЕ ПЕРЕСЕЧЕНИЕ

За последние два десятилетия оценка пропускной способности входов на кольцевые пересечения рассмотрена во многих публикациях [6, 7, 8, 9]. При этом в основном исследовались 2-полосные кольцевые пересечения, 3-полосные кольца представлены лишь в нескольких работах [10,11].

В целом модели оценки пропускной способности полосы движения на входе кольцевое пересечение разделяют на две принципиально разные группы [3]:

- статистические модели, основанные на уравнениях регрессии;
- модели, основанные на использовании функции принятия интервалов (gap acceptance function) [12,13,14,15].

Наиболее гибким инструментом формализованного представления кольцевых пересечений всех типов (1-, 2- и 3-полосных, со спиралевидной разметкой, турбоколец) являются модели, основанные на конфликтных

точках [16, 17, 18]. Теорию конфликтов (conflict technique) для оценки взаимодействия транспортных потоков на нерегулируемых и кольцевых пересечениях предложили N.Wu и W.Brilon [16, 17]. Важно подчеркнуть, что при изучении одно- и двухполосных кольцевых пересечений эти авторы установили, что при суммарной интенсивности движения более 1600 авт./ч на 2-полосном кольце транспортные средства, совершающие левый поворот, используют для входа на кольцо только левую полосу. Модель, предложенная немецкими авторами, была использована в описании входов на 2- и 3-полосные кольца (рисунок 2).

В последние три десятилетия для описания распределения интервалов в потоках главных направлений движения на нерегулируемых и кольцевых пересечениях широко используется дихотомическое распределение интервалов (часто обозначаемое как 3M Cowan's Distribution) [19, 20, 21, 22, 23, 24]. Рассматриваемая функция распределения $F(h)$ и ее плотность $f(h)$ имеют вид

$$F(h) = \begin{cases} 0 & \text{если } h < \Delta \\ 1 - \varphi e^{-\lambda(h-\Delta)} & \text{если } h \geq \Delta \end{cases} \quad (2)$$

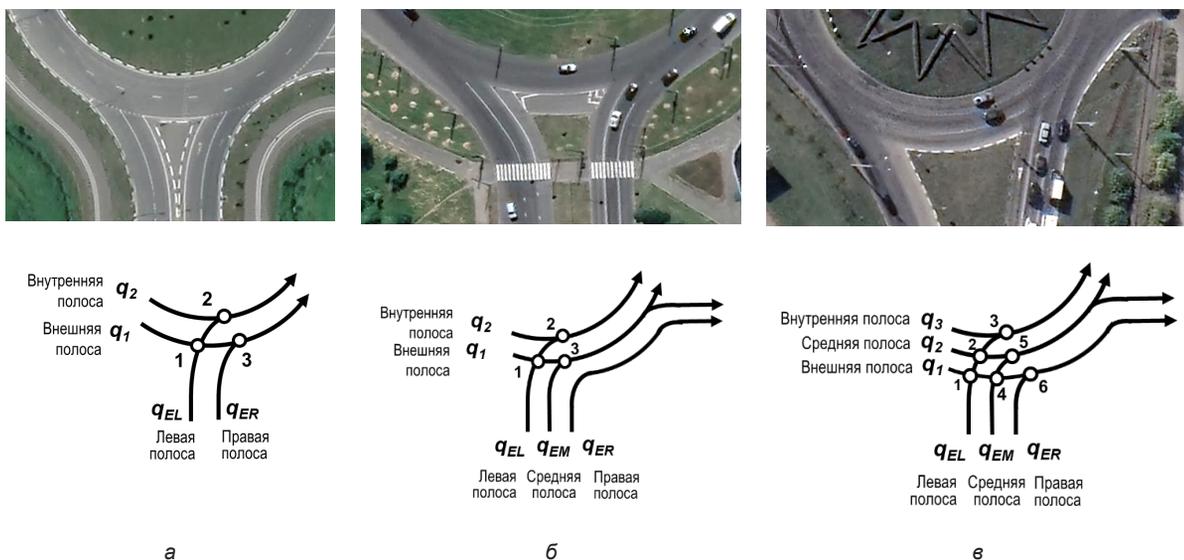


Рисунок 2 – Конфликтные точки на входах на многополосные кольцевые пересечения: а – вход на двухполосное кольцо; б – вход на кольцо с дополнительной полосой для правых поворотов (Древлянское кольцо г. Петрозаводск); в – вход на трехполосное кольцо
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Conflict points at multi-lane roundabout entrances, а – entrance to a two-lane roundabout; б – entrance to a two-lane roundabout with an additional right-turn lane; с – entrance to a three-lane roundabout
Source: compiled by the authors.

$$f(h) = \begin{cases} 0 & \text{если } h < \Delta \\ \varphi \lambda \exp[-\lambda(h - \Delta)] & \text{если } h \geq \Delta \end{cases}, \quad (3)$$

где h – интервал в потоке (headway), измеряемый (в зависимости от задачи исследования) между передними или задними бамперами автомобилей, c ; φ – свободная доля транспортного потока, $0 < \varphi \leq 1$; λ – параметр распределения интервалов главного потока в конфликтной точке, $\lambda = \varphi q / (1 - \Delta q)$; Δ – минимальный интервал в потоке, c .

По выводам, приводимым Е. Macioszek [9], при интенсивности больше 100 авт./ч на полосу кольцевой проезжей части следует применять дихотомическое распределение, поэтому оно рассматривалось в данной работе.

Теоретическая модель взаимодействия второстепенного потока с главным потоком, движущимся по нескольким полосам и описываемым дихотомическим распределением, представлена в работе О. Nagring [25]. Теория включает в рассмотрение случай, когда часть водителей снижает скорость движения под воздействием второстепенного потока (limited priority) [26,27]. В рамках теории limited priority пропускную способность полосы на входе на многополосное кольцевое пересечение c предлагается оценивать с использованием уравнения [15]

$$c = \sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i \prod_{i=1}^{i=n} \left(\frac{C_i \varphi_i q_i}{\lambda_i} \right) * \frac{e^{-(\sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i)(t_c - \Delta)}}{1 - e^{-(\sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i) t_f}}, \quad (4)$$

где λ_i – параметр распределения интервалов на полосе i ; C_i – параметр, учитывающий, что часть водителей главного потока снижает скорость движения под воздействием второстепенного потока и являющийся функцией λ_i , $0 \leq C_i \leq 1$; φ_i – свободная доля потока на полосе i ; q_i – интенсивность движения на полосе i , авт/с; n – количество полос движения главного направления; t_c – критический интервал, с; t_f – интервал следования из очереди, с; Δ – минимальный интервал в потоке, с.

В формуле (4) интервалы t_c , t_f и Δ приняты одинаковыми для всех конфликтных точек второстепенного потока, поступающего с рассматриваемой полосы входа на кольцо. При этом для каждой полосы i кольцевой проезжей части рассматриваются ее интенсивность

движения q_i , значение параметра λ_i и доля свободной части транспортного потока φ_i .

При условии, что не нарушается движение на кольцевой проезжей части, т.е. все водители главного направления используют свой приоритет ($C_i = 1$), уравнение (4) получает следующий вид

$$c = \sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i \prod_{i=1}^{i=n} \left(\frac{\varphi_i q_i}{\lambda_i} \right) * \frac{e^{-(\sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i)(t_c - \Delta)}}{1 - e^{-(\sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i) t_f}}, \quad (5)$$

Частные формы уравнения оценки пропускной способности (5) для правых, средних и левых полос входа на многополосное кольцо представлены ниже:

правая полоса входа на 2-х и 3-х полосное кольцо

$$C_{ER} = q_c \frac{\varphi e^{-\lambda(t_c - \Delta)}}{1 - e^{-\lambda t_f}}. \quad (6)$$

правая полоса входа на 2-х полосное кольцо и средняя полоса входа на 3-х полосное кольцо

$$C_{EL} \text{ или } C_{EM} = (\lambda_1 + \lambda_2) \frac{\varphi_1 \varphi_2 q_1 q_2}{\lambda_1 \lambda_2} * \frac{e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)(t_c - \Delta)}}{1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) t_f}}. \quad (7)$$

левая полоса входа на 3-х полосное кольцо

$$C_{EL} = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \frac{\varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 q_1 q_2 q_3}{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3} * \frac{e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)(t_c - \Delta)}}{1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) t_f}}. \quad (8)$$

Локализация моделей оценки пропускной способности (6), (7), (8) к условиям дорожного движения городов Российской Федерации требовала установления значений следующих параметров и зависимостей для 2- и 3-полосных кольцевых пересечений:

- критического интервала (critical headway)¹⁰ – минимального интервала времени в транспортном потоке главного направления, который позволяет въехать на перекресток одному автомобилю с второстепенного направления;
- интервала следования из очереди (follow-up time)¹¹ – времени между выездом одного транспортного средства с второсте-

¹⁰ Highway Capacity Manual 2010. Режим доступа: URL: <https://www.jpautoceste.ba/wp-content/uploads/2022/05/Highway-Capacity-Manual-2010-PDFDrive-.pdf> (дата обращения: 23.03.2023).

¹¹ Highway Capacity Manual 2010. Режим доступа: URL: <https://www.jpautoceste.ba/wp-content/uploads/2022/05/Highway-Capacity-Manual-2010-PDFDrive-.pdf> (дата обращения: 23.03.2023).

пенного направления и выездом следующего транспортного средства, использующего тот же самый интервал в потоке главного направления;

- минимального интервала в потоке, движущемся на кольцевой проезжей части;
- зависимостей, характеризующих влияние интенсивности движения на свободную долю транспортного потока, движущегося на многополосной кольцевой проезжей части.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поскольку в функции принятия интервалов (gap acceptance function) рассматривается интервал в главном потоке, измеряемый между передними бамперами автомобилей, интервалы рассчитывались как разница между фиксируемыми моментами пересечения створа передними бамперами (рисунок 3). На внешней полосе кольцевой проезжей части отмечались принятые и отвергнутые интервалы, а также количество транспортных средств второстепенного потока, использовавших принятые интервалы.

Для оценки значений критических интервалов применяются методы, основанные на принципиально разных математических моделях [28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35]. В данной работе применен метод Сиглоха (Siegloch's method) [36], позволяющий одновременно оценить критический интервал и интервал следования из очереди. Метод использует регрессионную зависимость между продол-

жительностью принятого интервала и количеством транспортных средств, принявших его

$$\hat{h}(n) = t_0 + nt_f, \quad (9)$$

где $\hat{h}(n)$ – длительность интервала h , который приняло n транспортных средств, с; t_0 – длительность минимального принятого интервала, с; t_f – интервал следования из очереди, с.

Свободный член регрессионного уравнения (9) является длительностью минимального принятого интервала t_0 , а интервал следования из очереди t_f – угловым коэффициентом линейного уравнения регрессии. Соответственно критический интервал t_c определяется как

$$t_c = t_0 + t_f/2. \quad (10)$$

Метода Сиглоха является специфическим случаем регрессионного анализа, поскольку независимая переменная n имеет целочисленные значения, соответственно распределения ее значений описываются геометрическим распределением (рис. 4а). Поэтому регрессионный анализ выполнялся с использованием средних значений интервалов h , рассчитанных для каждого значения независимой переменной n (рис.4б), а также с включением в рассмотрение среднего значения отклоненных интервалов ($n = 0$). Во всех изучаемых случаях при применении регрессии средних отмечались высокие значения коэффициентов детерминации и критерия Фишера.



Рисунок 3 – Определение интервалов в потоке на кольцевой проезжей части
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Headways determining in the traffic flow on a circular carriageway
Source: compiled by the authors.

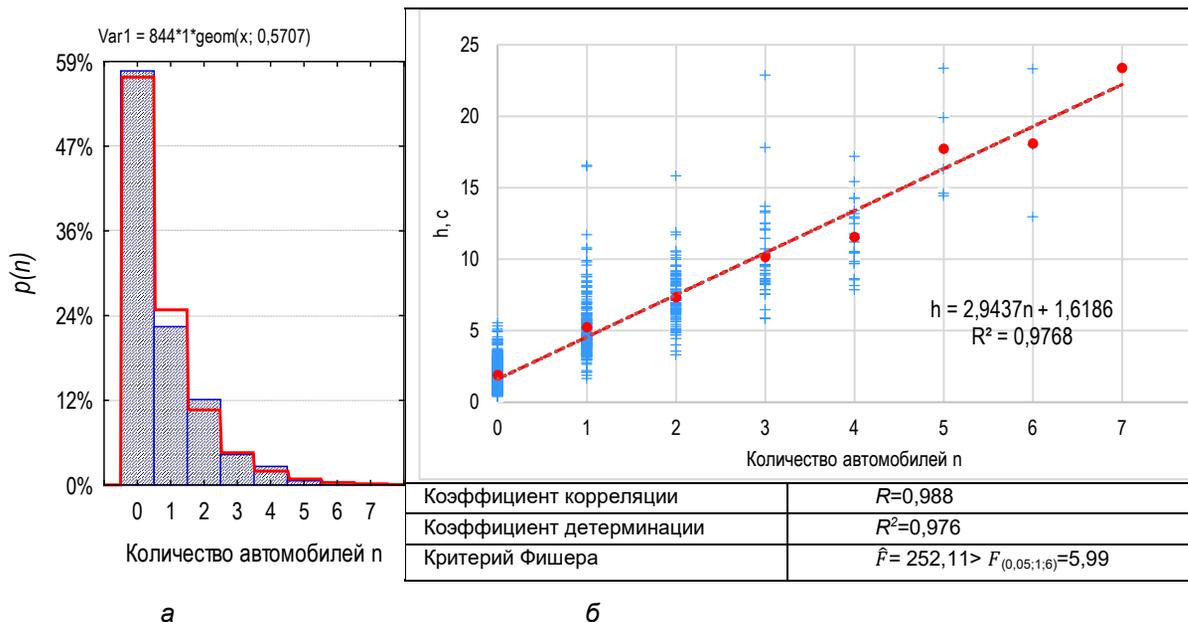


Рисунок 4 – Оценка критических интервалов и интервалов следования из очереди методом Сиглоха: средняя полоса на 3-х полосном входе на Древлянское кольцо (г Петрозаводск)
 а – распределение значений количества автомобилей, использовавших интервал;
 б – диаграмма рассеяния и регрессия с использованием средних значений интервалов
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Estimation of critical intervals and queuing intervals using the Sigloch's method: middle lane at the 3-lane entrance to the Drevlyanskoye Ring (Petrozavodsk)
 a – distribution of the number of vehicles that used the headway;
 b – scatter diagram and regression of averages
 Source: compiled by the authors.

Следует подчеркнуть, что метод Сиглоха уже применялся в исследованиях, выполняемых в ИРНТУ¹² для оценки критических интервалов на мини и компактных кольцевых пересечениях.

Кроме оценки значений критических интервалов и интервалов следования, из очереди было важным установить зависимости влияния интенсивности движения на величину минимального интервала Δ в потоке и свободную долю потока ϕ .

Минимальный интервал Δ определялся экспериментально при каждой обработке данных для каждой из полос кольцевой проезжей части 2- и 3-кольцевых пересечений. При этом минимальный интервал Δ оценивался как порядковая статистика – минимальное значение в рассматриваемой выборке. В этой связи было важным обеспечить максимально возможное количество выборок, поэтому об-

рабатывались данные видеосъемки длительностью 5–10 мин на кольцевых пересечениях:

- 2-полосных (Братск, Владивосток, Душанбе, Липецк, Находка, Оренбург, Петрозаводск, Псков);
- 3-полосных (Владивосток, Иркутск, Липецк, Нижневартовск, Новокузнецк).

При обследовании городских УДС получаемые выборки значений интенсивности, имеют, как правило, распределения с положительной асимметрией. Выполнение обследований кольцевых пересечений в разные часы суток позволило получить приблизительно нормальные выборки значений интенсивностей движения, поскольку модули коэффициентов асимметрии имеют значения близкие к 0 (таблица 2). Полученные выборки значений минимальных интервалов Δ имеют выраженную положительную асимметрию, что подтверждается значением коэффициентов асимметрии (см. таблицу 2).

¹² Липницкий А. С. Повышение эффективности организации дорожного движения на основе применения компактных кольцевых пересечений: автореф. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук. Иркутск, 2010. 20 с. URL: http://www.transport.istu.edu/downloads/auto_lipnickiy.pdf (дата обращения: 03.03.2023).

Таблица 2
Характеристики выборок интенсивности движения и минимальных интервалов Δ
Источник: составлено авторами.

Table 2
Characteristics of traffic volumes and minimum interval samples
Source: compiled by the authors

Статистики выборки	Интенсивность движения		Минимальный интервал	
	2-полосные кольца	3-полосные кольца	2-полосные кольца	3-полосные кольца
Среднее	560	501	1,18	1,09
Медиана	574	532	1,15	1,01
Мода	578	Несколько случаев	Несколько случаев	1,00
Минимум	171	93	0,56	0,50
Максимум	1034	1302	3,56	3,58
Стандартное отклонение	199	232	0,43	0,42
Коэффициент асимметрии	-0,03	0,48	2,16	3,83

Определение доли свободной части потока φ выполняется с применением разных линейных и нелинейных функций [28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35]. Из всего их многообразия были выбраны две функции, в которых без включения дополнительных коэффициентов используются значения интенсивности движения и минимального интервала: модель, предложенная R. Luttinen [20]

$$\varphi = \frac{2}{1+s^2\left(\frac{q}{1-\Delta q}\right)^2}, \quad (10)$$

часто применяемая в практике линейная зависимость [21,38]

$$\varphi = 1 - \frac{\Delta q}{3600}, \quad (11)$$

где s^2 – дисперсия интервалов в потоке; q – интенсивность движения на рассматриваемой полосе кольцевой проезжей части, авт/ч; Δ – минимальный интервал в потоке, с.

При установлении регрессионных зависимостей влияния интенсивности движения на минимальный интервал Δ и свободную долю потока φ не применялась многоступенчатая регрессия с отсевом выбросов на основе анализа остатков. На распределение интервалов в потоке, движущемся по кольцевой проезжей части, также влияют близко расположенные светофорные объекты (регулируемые перекрестки и переходы). Поэтому выбросы будут в дальнейшем анализироваться как результат влияния особенностей участков УДС, прилегающих к обследованному кольцевому пересечению.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Значения критических интервалов и интервалов следования очереди 2-полосных колец (таблица 3) были установлены исследованием кольцевых пересечений в городах Братск, Псков, Петрозаводск.

Таблица 3
Значения критических интервалов и интервалов следования из очереди на 2-полосных кольцах
Источник: составлено авторами.

Table 3
Values of critical headway and follow-up time on 2-lane roundabouts
Source: compiled by the authors.

Вход на кольцевое пересечение	Полоса на входе	Диапазон значений			Средние значения, с	
		t_c	t_f	t_f/t_c	t_c	t_f
2-х полосный на 2-х полосное	левая	3,34 – 4,50	2,52 – 3,08	0,73	3,72	2,72
	правая	3,26 – 3,79	2,24 – 3,18	0,79	3,44	2,73
3-х полосный на 2-х полосное с дополнительной правой полосой (рис. 26)	левая	3,52 – 3,96	2,54 – 3,17	0,75	3,75	2,80
	средняя	3,25 – 3,62	2,53 – 2,96	0,83	3,33	2,77
	правая	3,13 – 3,71	3,02 – 2,63	0,82	3,46	2,84

Таблица 4
Значения критических интервалов и интервалов следования из очереди на 3-полосных кольцах
Источник: составлено авторами.

Table 4
Values of critical headway and follow-up time on 3-lane roundabouts
Source: compiled by the authors.

Вход на 3-х полосное кольцевое пересечение	Полоса на входе	Диапазон значений			Средние значения, с	
		t_c	t_f	t_f/t_c	t_c	t_f
2-х полосный	левая	2,32 – 2,43	1,92 – 1,78	0,78	2,38	1,86
	правая	2,15 – 1,83	1,94 – 2,41	1,09	1,99	2,18
3-х полосный	левая	3,68 – 6,50	2,82 – 3,27	0,63	5,01	3,17
	средняя	3,45 – 5,92	2,89 – 3,56	0,70	4,68	3,27
	правая	3,05 – 4,98	2,8 – 4,1	0,89	3,94	3,52
4-х полосный (рис. 2в)	левая	3,70 – 3,00	2,87 – 3,36	0,87	3,39	3,01
	левая средняя	3,03 – 3,44	2,68 – 3,6	0,88	3,31	2,92
	правая средняя	2,91 – 3,46	2,4 – 2,68	0,77	3,18	2,46
	правая	2,79 – 3,32	2,19 – 2,66	0,79	3,03	2,4

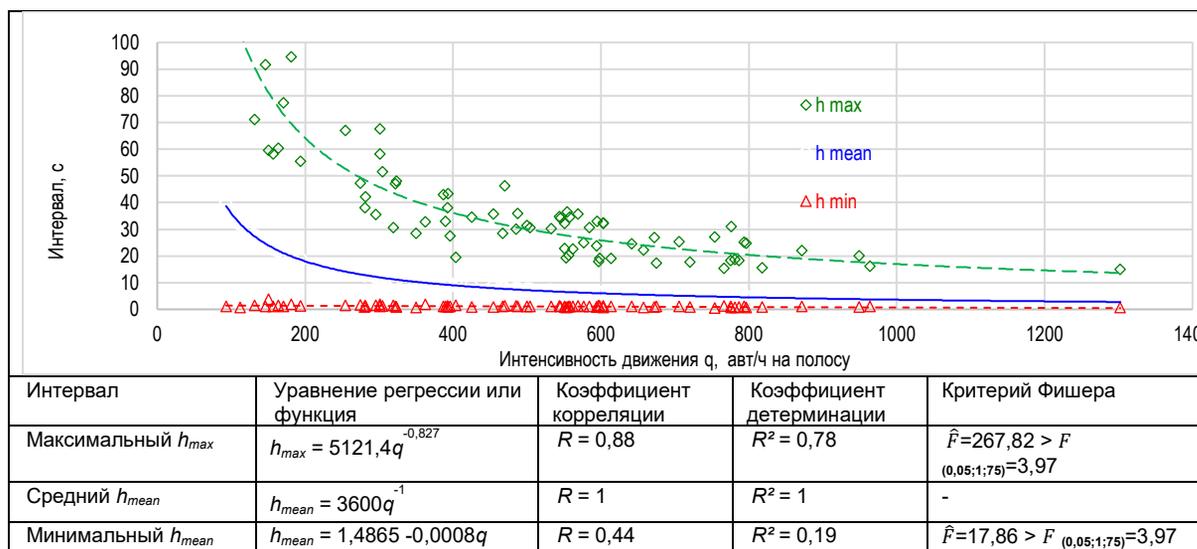


Рисунок 5 – Графики зависимости влияния интенсивности движения на максимальный h_{max} , средний h_{mean} и минимальный Δ интервалы (3-полосные кольца)
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Plots of traffic volume influence on the maximum h_{max} , average h_{mean} and minimum Δ headways (3-lane roundabouts)
Source: compiled by the authors.

Критические интервалы и интервалы следования из очереди 3-полосных колец (таблица 4) были установлены исследованием кольцевых пересечений в городах Иркутск и Липецк. В случае трехполосных колец были рассмотрены входы на кольцевую проезжую часть:

2 полосы на входе (ул. Ширямова, кольцо Плотина ГЭС, г. Иркутск)

4 полосы на входе (ул. Байкальская, кольцо Плотина ГЭС, г. Иркутск)

3 полосы на входе (2 кольцевых пересечения, г. Липецк)

Влияние интенсивности движения на величины максимального h_{max} и среднего h_{mean} интервалов в потоке отображает степенная функция (рисунок 5). В отличие от h_{max} и h_{mean} величина минимального интервала Δ испыты-

вает слабое влияние интенсивности движения (рисунки 5, 6). Такой вывод делается на основании полученных значений коэффициентов корреляции (рисунок 6, а, б), попадающих в разряд значений $R = 0,4-0,5$ шкалы Чеддока¹³.

В этой связи значения минимальных интервалов для практического использования

оценены как средние выборочные (таблица 5). Учитывая, что расчеты пропускной способности предполагают рассмотрение случаев высокой интенсивности движения на кольцевой проезжей части, были также оценены значения минимальных интервалов при интенсивности более 500 авт./ч на полосу.

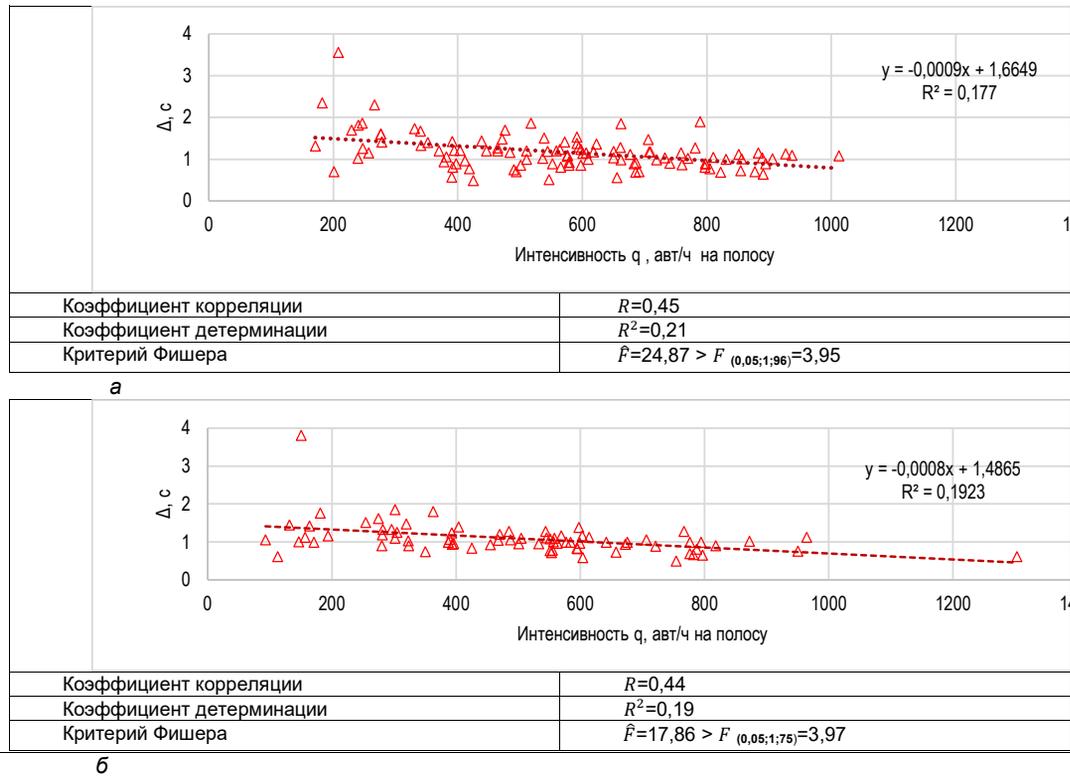


Рисунок 6 – Зависимость «интенсивность на полосе движения q – минимальный интервал Δ»: а – двухполосные кольца; б – трехполосные кольца
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Traffic volume q – minimum headway Δ dependence: а – two-lane roundabouts; б – three-lane roundabouts
Source: compiled by the authors.

Таблица 5
Значения минимальных интервалов в потоке
Источник: составлено авторами.

Table 5
Values of minimum headways
Source: compiled by the authors.

Кольцо	Интенсивность на полосе авт/ч	Количество случаев	Доверительный интервал, с		Средне значение Δ, с	Ошибка оценки среднего, с
			- 95%	+ 95%		
2-х полосное	200 – 1030	96	1,09	1,27	1,18	0,04
	500 – 1030	62	0,99	1,14	1,07	0,04
3-х полосное	90 – 1300	75	1,00	1,19	1,09	0,05
	500 – 1300	41	0,88	1,00	0,94	0,03

¹³ Режим доступа: <https://statpsy.ru/correlation/velicina> (дата обращения: 03.09.2023).

В соответствии с полученными данными (табл. 4) для практического применения рекомендуются значения минимального интервала (смещения экспоненциального распределения):

- 2-х полосные кольца $\Delta = 1,07$ с;
- 3-х полосные кольца $\Delta = 0,94$ с.

Тестирование формул (10,11) характеризующих влияния интенсивности движения на долю свободного потока φ с использованием наблюдаемых значений q и Δ , дало следующие результаты:

- рассчитанные по формуле (10) отдельные значения φ превышают 1, также от-

сутствует статистически значимая корреляция между q и φ ;

- рассчитанные по формуле (11) значения φ имеют более высокую корреляцию с интенсивностью движения (рис. 6).

Для практического применения представляется удобным использовать функцию $\varphi = f(q)$. Полученные уравнения регрессии для 2-х полосных (рис. 7а) и 3-х полосных кольцевых пересечений (рис. 7б) имеют близкие значения сводных членов и угловых коэффициентов. Поэтому были совместно обработаны данные обеих выборок 2-х и 3-х полосных колец (рис. 7в).

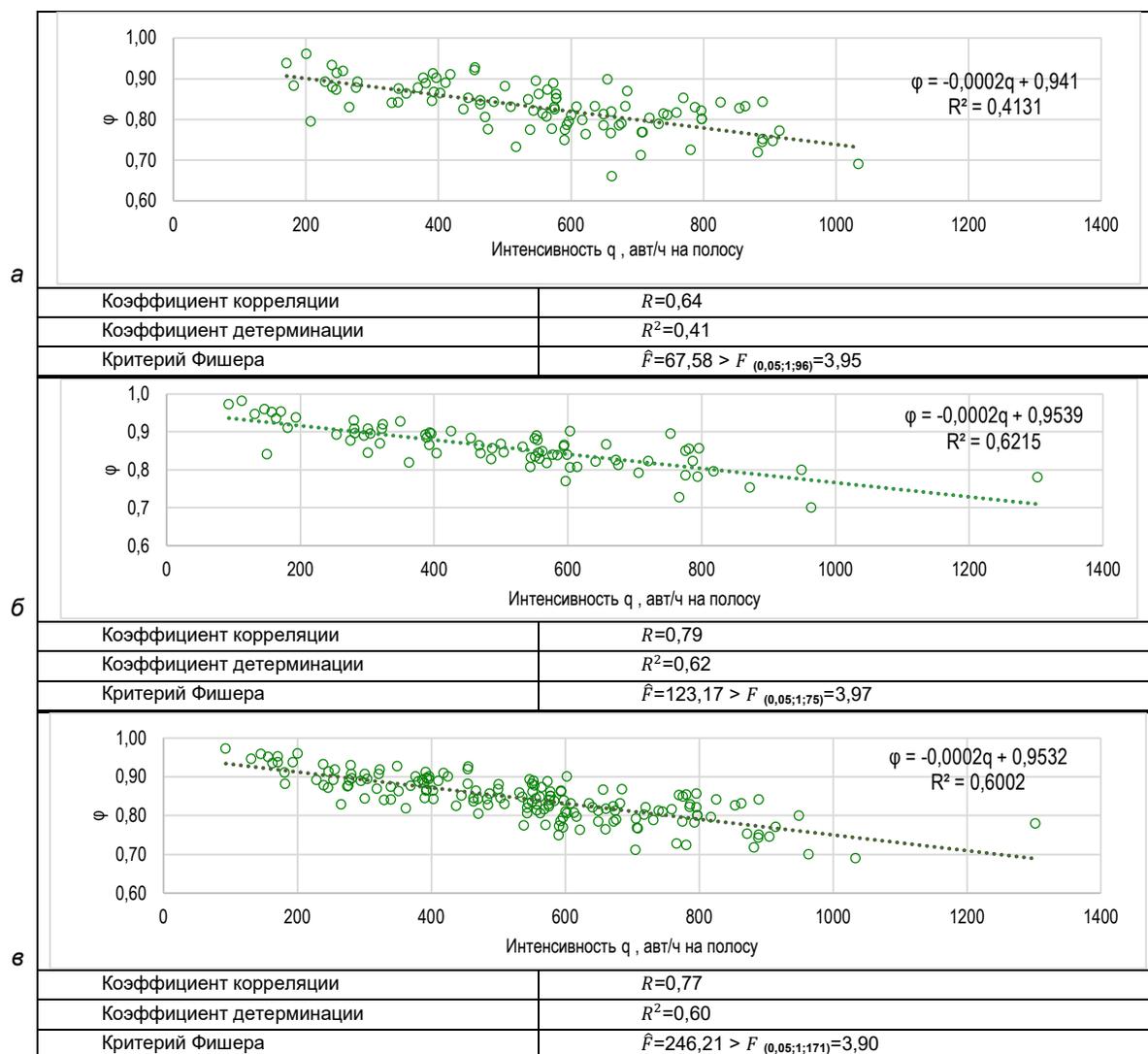


Рисунок 7 – Влияние интенсивности движения на свободную долю транспортного потока φ : а – двухполосные кольца; б – трехполосные кольца; в – двух- и трехполосные кольца совместно
Источник: составлено авторами.

Figure 7 - Influence of traffic intensity on the free share of φ traffic flow: а – two-lane rings; б – three-lane rings; в – two and three-lane rings together
Source: compiled by the authors.

С учетом преобразования уравнения регрессии, полученного при обработке совместных данных 2- и 3-полосных колец (см. рисунок 7, в), свободную долю потока можно также определять, используя упрощенную зависимость

$$\varphi = 0,96 - 0,77 (q/3600), \quad (11)$$

где q – интенсивность движения, авт/ч на полосу.

ОБСУЖДЕНИЕ

Важнейший результат исследования – установлено, что полосы входа на многополосное кольцо имеют разные значения критических интервалов и интервалов следования из очереди. Это доказывает, что расчет пропускной должен выполняться в отдельности для каждой полосы на входе с учетом всех конфликтных точек, в которых поступающий на кольцо второстепенный поток взаимодействует с потоком, движущимся на многополосной кольцевой проезжей части. Полученные данные не противоречат результатам других исследований многополосных кольцевых пересечений¹⁴.

Следует также указать на выявленную особенность функционирования 3-полосных кольцевых пересечений. По результатам обследований внешняя (правая полоса) кольцевой

проезжей между выходом с кольца и входом на него (рисунок 8) начинает активно использоваться при интенсивности движения на кольцевой проезжей части более 1500 авт./ч.

Рост доли потока, использующего правую полосу 3-полосного кольца (рисунок 8, б), при суммарной интенсивности движения более 1400–1500 авт./ч объясняется, в том числе возрастающим использованием этой полосы для сквозного движения. Это приводит к увеличению интенсивности движения сразу во всех трех первых конфликтных точках, через которые поступает по левой, средней и правой полосе поток второстепенного направления (рисунок 8, а).

Критическим элементом многополосных кольцевых пересечений являются левые полосы входов на кольцевую проезжую часть. Поток, поступающий с левых полос и совершающий левый поворот, проходит максимальное количество конфликтных точек (соответственно, 2 на 2-полосных кольцах и 3 на 3-полосных).

Интенсивность движения на кольцевой проезжей части не оказывает статистически значимого влияния на величину минимального интервала. Поэтому величину минимального интервала можно интерпретировать как характеристику водителей с наиболее агрессивной манерой вождения.

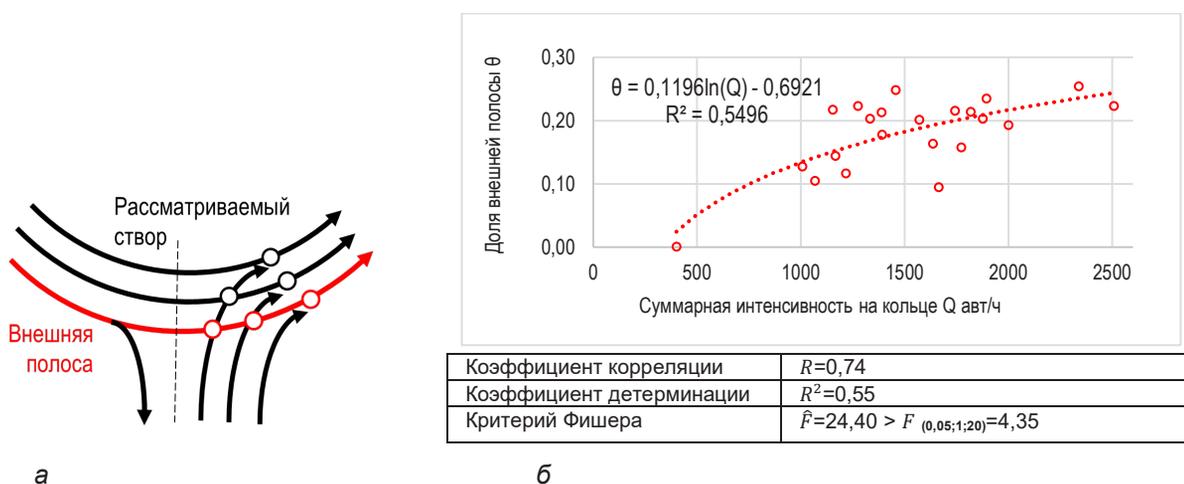


Рисунок 8 – Влияние интенсивности движения на использование внешней полосы:
а – рассматриваемый участок 3-полосного кольца; б – зависимость «интенсивность – доля внешней полосы»
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Influence of traffic volume on the external lane use
а – considered section of a 3-lane ring; б – traffic volume – share of external lane dependence
Source: compiled by the authors.

¹⁴ Alcelik R. A comparative analysis of exponential and liner roundabout capacity models using HCM research data. URL: <https://www.sidrasolutions.com/media/523/download> (дата обращения: 03.03.2023).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного исследования установлены значения характеристик, необходимых для выполнения расчетов пропускной способности входов на многополосные кольцевые пересечения при отсутствии помех пешеходов.

Для расчетов рекомендуется использовать следующие значения критических интервалов t_c и интервалов следования из очереди t_f :

2-х полосные кольца:

- левая полоса $t_c = 3,72$, $t_f = 2,72$;
- правая полоса $t_c = 3,44$, $t_f = 2,73$.

3-х полосные кольца:

- левая полоса $t_c = 5,01$, $t_f = 3,17$;
- средняя полоса $t_c = 4,68$, $t_f = 3,27$;
- правая полоса $t_c = 3,94$, $t_f = 3,52$.

Рекомендуемые для использования значения минимального интервала в потоке на кольцевой проезжей части: 2-х полосные кольца $\Delta = 1,07$ с; 3-х полосные кольца $\Delta = 0,94$ с.

Для определения доли свободной части транспортного потока предлагается использовать зависимость $\varphi = 1 - \Delta q / 3600$, где Δ – минимальный интервал в потоке на рассматриваемой полосе кольцевой проезжей части, с; q – интенсивность движения на рассматриваемой полосе кольцевой проезжей части, авт/ч.

Для дальнейшего развития методического обеспечения оценки пропускной способности многополосных кольцевых пересечений, задержек и очередей транспортных средств на них необходимо:

установить закономерности влияния пешеходных потоков на пропускную способность входов на кольцевые пересечения и выходов с них;

установить сочетания значений интенсивностей движения на многополосных кольцевых пересечениях, при которых наблюдается ограниченный приоритет (т.е. когда часть водителей приоритетного потока уступает второстепенному потоку), что нужно рассматривать как признак исчерпания пропускной способности входа на кольцо;

на основе оценки соотношений интервалов следования очереди основных типов транспортных средств [37] определить для кольцевых пересечений коэффициенты приведения к легковому автомобилю;

изучить особенности функционирования кольцевых пересечений в условиях влияния близко расположенных светофорных объектов, а также возможность применения в расчетах аналогии с регулируемыми пересечениями, рассмотренной в работах R. Akçelik [38].

Дальнейшее накопление данных о функционировании кольцевых пересечений и их систематизация позволят сформировать базу справочных данных, на основе которых можно развивать методическое обеспечение оценки пропускной способности, а также разрабатывать программное обеспечение.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Akçelik R. Lane-by-lane modelling of unequal lane use and flares at roundabouts and signalised intersections: the SIDRA solution // *Traffic Engineering and Control*. 1997. Vol. 38 (7/8). P. 388–399.
2. Косцов А. В. Современные кольцевые пересечения: зарубежный опыт / А. В. Косцов, А. Ю. Михайлов // монография. М.: А-проджект, 2018. 106 с.
3. Рассоха В. И. Обзор методов оценки пропускной способности кольцевых пересечений / В. И. Рассоха, Н. А. Никитин // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2020. № 3 (53). С. 31–37. EDN: OUSSHJ.
4. Каримов Н.М. Обоснование модели оценки пропускной способности городских трехполосных кольцевых пересечений / Н.М. Каримов, А.Ю. Михайлов // *Мир транспорта и технологических машин* 2022 4-2 (79). С. 68-74. EDN: ZDTPYY
5. Каримов Н. М. Критические интервалы и интервалы следования из очереди на двухполосных кольцевых пересечениях / Н.М. Каримов, А.Ю. Михайлов // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. 2023. № 4. С.44–57. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-4-44>.
6. Ahmad A., Regression model for entry capacity of a roundabout under mixed traffic condition- an Indian case study. / A. Ahmad, R. Rastogi // *The International Journal of Transportation Research*. 2017. Volume 9, Issue 5. P. 243-257. URL: DOI: 10.1080/19427867.2016.1203603.
7. Patnaik A. K., Krishna Y., Rao et al S. Development of Roundabout Entry Capacity Model Using INAGA Method for Heterogeneous Traffic Flow Conditions // *Arab J Sci Eng*. 2017. 42, P. 4181 – 4199. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2677-x>.
8. Ahmad A., Rastogi R. Calibrating HCM model for roundabout entry capacity under heterogeneous traffic // *Mod. Transport*. 2019. 27. P. 293–305. <https://doi.org/10.1007/s40534-019-00194-7>
9. Macioszek E. Roundabout Entry Capacity Calculation—A Case Study Based on Roundabouts in Tokyo, Japan, and Tokyo Surroundings // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Is. 4, 1533, <https://doi.org/10.3390/su12041533>
10. Al-Madani M. N. Capacity of large dual and triple lanes roundabouts during heavy demand conditions // *Arabian Journal for Science and Engineering*. vol. 38, no. 3. pp. 491–505, 2013.
11. Shaaban K., Hamad H. Critical Gap Comparison between One-, Two-, and Three-Lane Roundabouts in Qatar // *Sustainability*. 2020. 12(10). 4232. 14 p. DOI:10.3390/su12104232

12. Giuffrè O., Granà A., Tumminello M. Gap-acceptance parameters for roundabouts: a systematic review // *European Transport Research Review*. 2016. Vol. 8, 2. <https://doi.org/10.1007/s12544-015-0190-4>
13. Guo R., Liu L., Wang W. Review of Roundabout Capacity Based on Gap Acceptance // *Journal of Advanced Transportation*. Vol. 2019, Article ID 4971479, <https://doi.org/10.1155/2019/4971479>.
14. Kusuma A., Koutsopoulos H. N. Critical Gap Analysis of Dual Lane Roundabouts // *Procedia Social and Behavioral Sciences*. Vol. (2011) 16. pp. 709 – 717, <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.04.490>.
15. Qu Z., Duan Y., Song X., Hu H., Liu H., Guan K. Capacity Prediction Model Based on Limited Priority Gap-Acceptance Theory at Multilane Roundabouts // *Mathematical Problems in Engineering*. Volume 2014, Article ID 490280 |, 11 pages <https://doi.org/10.1155/2014/490280>
16. Wu N., Brilon W. Total capacity of roundabouts analyzed by a conflict technique // *Transportation Research Record*. 2018. 2672 (15): 9-22. doi: 10.1177/0361198118788171.
17. Wu N., Brilon W. Roundabout Capacity Based on conflict Technique // Paper presented at the 5th International Roundabout Conference Green Bay, TRB Committee on Roundabouts (ANB75), Wisconsin, May 8–10, 2017. 25 p. URL: http://teachamerica.com/RAB17/RAB17papers/RAB175C_BrilonPaper.pdf (accessed: 17.01.2023).
18. Qu Z., Duan Y., Hu H., Song X. Capacity and delay estimation for roundabouts using conflict theory // *The Scientific World Journal*, vol.2014, ArticleID7 10938,12pages,2014. <https://doi.org/10.1155/2014/710938>
19. Cowan R. J. Useful headway models / R. J. Cowan // *Transportation Research Volume 9, Issue 6, December 1975, Pages 371-375* [https://doi.org/10.1016/0041-1647\(75\)90008-8](https://doi.org/10.1016/0041-1647(75)90008-8)
20. Luttinen R. T. Properties of Cowan's M3 headway distribution // *Transportation Research Record*. vol. 1678. no. 1. pp. 189–196, 1999. <https://doi.org/10.3141/1678>
21. Akçelik R., Chung E. Calibration of the bunched exponential distribution of arrival headways // *Road and Transport Research*. (1994) 3 (1). pp. 42–59.
22. Tanyel S., Yayla N. A discussion on the parameters of Cowan M3 distribution for Turkey // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2003. vol. 37, issue 2: 129-143 [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(02\)00009-5](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(02)00009-5)
23. Luis V., Ana B.S., Alvaro S., Joao S. Estimating The Parameters Of Cowan's M3 Headway distribution For Roundabout Capacity Analyses // *The Baltic Journal Of Road And Bridge Engineering*. 2012; 7(4): 261–268.
24. Giuffrè O., Granà A., Marino S. Turbo-roundabouts vs Roundabouts Performance Level // *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2014; 53: 590 – 600 <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.909>
25. Hagring O. A further generalization of Tanner's formula // *Transportation Research B: Methodological*. 1998; vol. 32, no. 6: 423–429, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(98\)00010-1](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(98)00010-1)
26. Troutbeck R. Capacity of limited-priority merge // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1999; vol. 1678, pp. 269–276. <https://doi.org/10.3141/1678-32>
27. Troutbeck R., Kako S. Limited priority merge at unsignalized intersections // *Transportation Research A: Policy and Practice*. 1999; vol. 33, no. 3-4: 291–304. DOI:10.1016/S0965-8564(98)00046-9
28. Vasconcelos L. P., Seco, Silva C. B. Comparison of Procedures to Estimate Critical Headways at Roundabouts // *Promet – Traffic & Transportation*. 2013; Vol. 25, No. 1: 43-53 <https://doi.org/10.7307/ptt.v25i1.1246>
29. Brilon W., Koenig R., Troutbeck R. Useful estimation procedures for critical gap // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 1999. 33 (3–4): 161-186. doi: 10.1016/s0965-8564(98)00048-2.
30. Kang N., Nakamura H., Asano M. An empirical analysis on critical gap and follow-up time at roundabout considering geometry effect // *Proc., 46th Infrastructure Planning Conference (2012)*. URL: http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00039/201211_no46/pdf/129.pdf. (Accessed: 03.02.2023).
31. Maslač D., Cvitanic D., Lovric I. Estimation of Critical Headway at Small Urban Roundabout // *Promet – Traffic & Transportation*. 2020; Vol. 32. Is. 1: 103–117, <https://doi.org/10.7307/ptt.v32i1.3155>.
32. Vikram D., Agarwal S. Methodology to Estimate Parameters of Critical Gap Distribution // *Transportation Science. Research Procedia*. 2020; Vol. 48: 665–672, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.067>.
33. Barchanski A., Zochowska R. Estimation of critical gaps and follow-up times at median uncontrolled t-intersection // *Archives of Transport*. 2021; Vol. 60, (2021) Is. 4:105–123, <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.6030>
34. Faye F. R. Estimation of Critical Gap Using Maximum Likelihood Method at Unsignalized Intersection: A Case Study in Adama City, Ethiopia // *International Journal of Transportation Engineering and Technology*. 2021; Vol. 7. Is. 2: 48–59, <https://doi.org/10.11648/j.ijtet.20210702.12>.
35. Radović D. Critical headway at unsignalized intersections - literature review / D. Radović, V. Bogdanović, B. Marić // *International Journal for Traffic and Transport Engineering*. 2022; Vol. 12(1): 61–77, [https://dx.doi.org/10.7708/ijtte2022.12\(1\).05](https://dx.doi.org/10.7708/ijtte2022.12(1).05).
36. Siegloch W. Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalsteuerung; Bundesminister für Verkehr: Strassenbau, Germany, 1973; pp. 1–173.
37. Al-Kaisy A., Hall F. L., Reisman E. S. Developing passenger car equivalents for heavy vehicles on freeways during queue discharge flow // *Transport. Res. Part A* 36. 2002: 725–742. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(01\)00032-5](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(01)00032-5)
38. Akçelik R. Gap acceptance modelling by traffic signal analogy // *Traffic Engineering and Control*. 1994; 35 (9): 498-506.

REFERENCES

1. Akçelik R. Lane-by-lane modelling of unequal lane use and flares at roundabouts and signalised intersections: the SIDRA solution. *Traffic Engineering and Control*. 1997; Vol. 38 (7/8): 388–399
2. Koscov A. V., Mihajlov A. Ju. Sovremennye kol'cevye peresechenija: zarubezhnyj opyt [Modern roundabouts: foreign experience]. Moscow, A-prodzhekt, 2018. 106 p. (in Russ.)
3. Rassooha V. I., Nikitin N. A. Obzor metodov ocenki propusknoj sposobnosti kol'cevyh peresechenij [Review of the methods for assessing the capacity of roundabouts]. *Tehniko-tehnologicheskie problemy servisa*. 2020; 3 (53): 31–37. EDN: OUSSHJ. (in Russ.)
4. Karimov N.M., Mihajlov A.Ju. Obosnovanie modeli ocenki propusknoj sposobnosti gorodskih trehpolosnyh kol'cevyh peresechenij [Justification of the model for estimating the capacity of urban three-lane roundabouts]. *Mir transporta i tehnologicheskij mashin*. 2022; 4-2 (79): 68-74. EDN: ZDTPYY (in Russ.)
5. Karimov N. M., Mihajlov A. Ju. Kriticheskie intervaly i intervaly sledovaniya iz ocheredi na dvuh-polosnyh kol'cevyh peresechenijah [Critical headways and follow up time on two-lane roundabouts]. *Intellekt. Innovacii. Investicii*. 2023; 4: 44–57. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-4-44>. (in Russ.)
6. Ahmad A., Rastogi R. Regression model for entry capacity of a roundabout under mixed traffic condition—an Indian case study. *The International Journal of Transportation Research*. 2017; Volume 9, Issue 5: 243-257. URL: DOI: 10.1080/19427867.2016.1203603.
7. Patnaik, A.K., Krishna, Y., Rao S. Development of Roundabout Entry Capacity Model Using IN-AGA Method for Heterogeneous Traffic Flow Conditions. *Arab J Sci Eng*. 2017; 42: 4181–4199. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2677-x>.
8. Ahmad A., Rastogi R., Calibrating HCM model for roundabout entry capacity under heterogeneous traffic. *Mod. Transport*. 2019; 27: 293–305. <https://doi.org/10.1007/s40534-019-00194-7>
9. Macioszek E. Roundabout Entry Capacity Calculation—A Case Study Based on Roundabouts in Tokyo, Japan, and Tokyo Surroundings. *Sustainability*. 2020; Vol. 12. Is. 4, 1533, <https://doi.org/10.3390/su12041533>
10. Al-Madani M. N. Capacity of large dual and triple lanes roundabouts during heavy demand conditions. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2013; vol. 38, no. 3: 491–505, 2013.
11. Shaaban K., Hamad H. Critical Gap Comparison between One-, Two-, and Three-Lane Roundabouts in Qatar. *Sustainability*. 2020; 12(10). 4232: 14. DOI:10.3390/su12104232
12. Giuffrè O., Granà A., Tumminello M. Gap-acceptance parameters for roundabouts: a systematic review. *European Transport Research Review*. 2016; Vol. 8, 2. <https://doi.org/10.1007/s12544-015-0190-4>
13. Guo R., Liu L., Wang W. Review of Roundabout Capacity Based on Gap Acceptance. *Journal of Advanced Transportation*. Vol. 2019. Article ID 4971479, <https://doi.org/10.1155/2019/4971479>.
14. Kusuma A., Koutsopoulos H. N. Critical Gap Analysis of Dual Lane Roundabouts. *Procedia Social and Behavioral Sciences*. Vol. (2011) 16: 709–717, <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.04.490>.
15. Qu Z. Z. Qu, Y. Duan, X. Song, H. Hu, H. Liu, K. Guan Capacity Prediction Model Based on Limited Priority Gap-Acceptance Theory at Multilane Roundabouts. *Mathematical Problems in Engineering* Volume. 2014., Article ID 490280. 11 p. URL: <https://doi.org/10.1155/2014/490280>
16. Wu N., Brilon W. Roundabout Capacity Based on conflict Technique. *Paper presented at the 5th International Roundabout Conference Green Bay* URL http://teachamerica.com/RAB17/RAB17papers/RAB175C_BrilonPaper.pdf (accessed: 13.05.2023).
17. Wu N, Brilon W. Total capacity of roundabouts analyzed by a conflict technique // *Transportation Research Record*. Transportation Research Record, Vol 2672 (Preprint No. 18-00849), Issue 15, 2018. pp. 9–22. <https://doi.org/10.1177/0361198118788171>
18. Qu Z., Duan Y., Hu H., Song X. Capacity and delay estimation for roundabouts using conflict theory/ *The Scientific World Journal*, 2014. vol.2014, ArticleID710938/ 12 pages. <https://doi.org/10.1155/2014/710938>
19. Cowan R. J. Useful headway models. *Transportation Research Volume 9*, Issue 6, December 1975, Pages 371-375 [https://doi.org/10.1016/0041-1647\(75\)90008-8](https://doi.org/10.1016/0041-1647(75)90008-8)
20. Luttinen R. T. Properties of Cowan's M3 headway distribution. *Transportation Research Record*. 1999; vol. 1678, no. 1: 189–196, 1999. <https://doi.org/10.3141/1678>
21. Akçelik R., Chung E. Calibration of the bunched exponential distribution of arrival headways. *Road and Transport Research*. 1994; 3 (1): 42–59.
22. Tanyel S., Yayla N. A discussion on the parameters of Cowan M3 distribution for Turkey. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2003; vol. 37, issue 2: 129-143. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(02\)00009-5](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(02)00009-5)
23. Luis V., Ana B.S., Alvaro S. Joao S. Estimating The Parameters Of Cowan's M3 Headway distribution For Roundabout Capacity Analyses. *The Baltic Journal Of Road And Bridge Engineering*. 2012; 7(4): 261–268.
24. Giuffrè O., Granà A., Marino S. Turbo-roundabouts vs Roundabouts Performance Level. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 53 (2012) 590 – 600. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.909>
25. Hagring O. A further generalization of Tanner's formula. *Transportation Research B: Methodological*. 1998; vol. 32, no. 6: 423–429, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(98\)00010-1](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(98)00010-1).
26. Troutbeck R. Capacity of limited-priority merge. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1678: 269–276, 1999. <https://doi.org/10.3141/1678-32>.
27. Troutbeck R., Kako S. Limited priority merge at unsignalized intersection. *Transportation Research A: Policy and Practice*; vol. 33, no. 3-4: 291–304, 1999. DOI:10.1016/S0965-8564(98)00046-9.

28. Vasconcelos L. P., Seco Á. J., Silva C. B. Comparison of Procedures to Estimate Critical Headways at Roundabouts. *Promet – Traffic & Transportation*. 2013; Vol. 25, No. 1: 43-53 <https://doi.org/10.7307/ptt.v25i1.1246>

29. Brilon W, Koenig R, Troutbeck R.J. Useful estimation procedures for critical gaps. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 1999;33(3–4): 161-186. doi: 10.1016/S0965-8564(98)00048-2.

30. Kang N., Nakamura H., Asano M. An empirical analysis on critical gap and follow-up time at roundabout considering geometry effect. *Proc., 46th Infrastructure Planning Conference*. (2012) URL: http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00039/201211_no46/pdf/129.pdf. (accessed: 03.02.2023).

31. Maslač D., Cvitančić D., Lovrić I. Estimation of Critical Headway at Small Urban Roundabout. *Promet – Traffic & Transportation*. 2020; Vol. 32. Is. 1: 103–117, <https://doi.org/10.7307/ptt.v32i1.3155>.

32. Vikram D., Agarwal S. Methodology to Estimate Parameters of Critical Gap Distribution. *Transportation Science. Research Procedia*. 2020; Vol. 48: 665–672, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.067>.

33. Barchański A., Żochowska R. Estimation of critical gaps and follow-up times at median uncontrolled t-intersection. *Archives of Transport*. 2021; Vol. 60, Is. 4: 105–123, <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.6030>

34. Faye F. R. Estimation of Critical Gap Using Maximum Likelihood Method at Unsignalized Intersection: A Case Study in Adama City, Ethiopia. *International Journal of Transportation Engineering and Technology*. 2021; Vol. 7. Is. 2: 48–59/ <https://doi.org/10.11648/j.ijtet.20210702.12>.

35. Radović D., Bogdanović V., Marić B. Critical headway at unsignalized intersections - literature review. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*. 2022; Vol. 12(1), (2022): 61–77, [https://dx.doi.org/10.7708/ijtte2022.12\(1\).05](https://dx.doi.org/10.7708/ijtte2022.12(1).05).

36. Sieglöcher, W. Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalsteuerung; Bundesminister für Verkehr. Strassenbau, Germany. 1973: 1–173

37. Al-Kaisy, A., Hall, F. L., and Reisman, E. S. Developing passenger car equivalents for heavy vehicles on freeways during queue discharge flow. *Transport. Res. Part A* 36. 2002: 725–742. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(01\)00032-5](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(01)00032-5)

38. AKÇELİK, R. Gap acceptance modelling by traffic signal analogy. *Traffic Engineering and Control*. 1994; 35 (9), (1994): 498-506.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Каримов Н. М. Выполнение экспериментальных исследований. Математическая обработка данных.

Михайлов А. Ю. Формулирование цели и задач исследования. Научное руководство исследованием.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Navruz M. Karimov. *Experimental studies fulfillment. Mathematical data processing.*

Aleksandr Yu. Mikhailov. *Aim and objectives of the research statement. Scientific research management.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каримов Навруз Мирозоракимович – аспирант, научная специальность 2.9.5 «Эксплуатация автомобильного транспорта», SPIN-код: 3369-1225.

Михайлов Александр Юрьевич – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры автомобильного транспорта, SPIN-код: 2498-7773.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Navruz M. Karimov – *Postgraduate student, 2.9.5 Operation of road transport scientific major, SPIN-код: 3369-1225.*

Alexander Yu. Mikhailov – *Dr. of Sci., Professor, Professor of Automobile Transport Department, SPIN-код: 2498-7773.*

Научная статья
УДК 656.13:614.84
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-618-631>
EDN: TZEKJM



О ВОЗМОЖНОСТИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ БЕНЗИНА НА ПОВЕРХНОСТИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО НЕЙТРАЛИЗАТОРА АВТОМОБИЛЯ КАТЕГОРИЙ M_1 , M_1G

А. И. Недобитков*, В. С. Яковлев

Восточно-Казахстанский технический университет,
г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан
a.nedobitkov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4605-9668>
vel1051@yandex.kz, <http://orcid.org/0000-0002-7315-4719>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Судебная пожарно-техническая экспертиза автомобиля – одна из наиболее востребованных и одновременно сложных экспертиз, поскольку носит комплексный характер и требует взаимодействия экспертов различных специальностей. Конструкция автотранспортных средств и их компонентов непрерывно совершенствуется, что требует адаптации методического аппарата пожарно-технической экспертизы к современным реалиям. Анализируются требования безопасности по предотвращению воспламенения топлива в моторном отсеке легкового автомобиля.

Материалы и методы. В условиях аккредитованной лаборатории по испытаниям автомобильных топлив и масел проведены эксперименты по капельному и струйному воспламенению бензина класса K4 на горячей поверхности. Проведены экспериментальные исследования по определению фактической температуры элементов системы выпуска отработавших газов автомобилей категорий M_1 и M_1G различных моделей в реальных условиях эксплуатации. При измерении температуры поверхности деталей системы выпуска использовались тепловизор и термопара. При помощи растрового электронного микроскопа с приставкой энергодисперсионного анализа определен элементный состав пленки, образующейся на горячей стальной поверхности при попадании бензина.

Результаты. Получены фактические результаты о температуре элементов системы выпуска легковых автомобилей в различных условиях эксплуатации. Приведены результаты экспериментов по капельному и струйному истечению бензина на нагретую поверхность. Проанализирован элементный состав пленки, образующейся на горячей стальной поверхности при попадании бензина, и показана вторичность образования пленки по отношению к причине пожара.

Заключение. Результаты исследования могут быть использованы при проведении пожарно-технической экспертизы автотранспортных средств категорий M_1 и M_1G , что позволит повысить достоверность и обоснованность ее выводов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система выпуска, каталитический нейтрализатор, пожарно-техническая экспертиза, автомобиль, бензин, растровая электронная микроскопия

Статья поступила в редакцию 12.09.2023; одобрена после рецензирования 02.10.2023; принята к публикации 24.10.2023.

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: Недобитков А. И., Яковлев В. С. О возможности воспламенения бензина на поверхности каталитического нейтрализатора автомобиля категорий M_1 , M_1G // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 5 (93). С. 618-631. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-618-631>

© Недобитков А. И., Яковлев В. С., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-618-631>
EDN: TZEKJM

ON POSSIBLE PETROL IGNITION ON OF M₁, M₁G CAR CATALYST CONVERTERS SURFACE

Aleksander I. Nedobitkov*, **Vladimir S. Yakovlev**

East Kazakhstan Technical University,
Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan
a.nedobitkov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4605-9668>
vel1051@yandex.kz, <http://orcid.org/0000-0002-7315-4719>
*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Forensic fire and technical examination of a car is of high demand, and at the same time it is one of the most complicated examinations, because of its complicated nature and need in involvement of experts of various specialties. The design of automobiles and their components is continually improving. In this connection the methodological base of fire and technical examination should be duly adapted to present-day requirement. The safety requirements for prevention of fuel ignitions in a motor cabinet of a car have been analyzed during the research.

Materials and Methods. Under the conditions of an accredited laboratory specializing in testing automobile fuels and oils, we have carried out the experiments in ignition of K4-class petrol being fed in drops and stream-like fed on a hot surface. We have also undertaken the experimental studies in order to find out an actual temperature of elements of engine exhaust systems of M₁ and M₁G automobiles of various models under the actual operating conditions. A thermal imaging camera and a thermocouple have been used to measure the surface temperature of the engine exhaust system parts. An elemental composition of a film formed on a hot steel surface upon contact with petrol has been determined with the use of a scanning electron microscope.

Results. We have received the actual results on the temperature of the elements of light car exhaust systems under the various operating conditions. There are the results of experiments on the discharge of the petrol in the form of drops and stream on a hot surface presented in the article. An elemental composition of a film formed on a hot steel surface upon contact with petrol has been analyzed, and secondariness of film formation towards the fire cause has been proved.

Conclusion. The results of the research could be used in the conduct of fire and technical examination of vehicles of M₁ and M₁G categories, what could increase reliability and validity of its conclusions.

KEY WORDS: engine exhaust system, catalyst converter, fire and technical examination, automobile, petrol, scanning electron microscope

The article was submitted 12.09.2023; approved after reviewing 02.10.2023; accepted for publication 24.10.2023.

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. Alexander I. Nedobitkov, Vladimir S. Yakovlev On possible petrol ignition on M₁, M₁G car catalyst converters surface. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (5): 618-631. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-618-631>

© Nedobitkov A. I., Yakovlev V. S., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

По данным¹ в 2021 г. в США было зарегистрировано 174 тыс. пожаров на дорогах, в результате которых погибло 650 чел. Следует отметить, что в 2020 г. в США погибло в результате пожаров автотранспортных средств 580 человек, что свидетельствует о тенденции роста тяжести последствий пожаров.

Ряд исследователей² [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26] говорят о том, что пожары в автотранспортных средствах по их числу и материальным потерям сегодня постоянно занимают вторую строчку после пожаров, произошедших в жилом секторе.

В частности, в работе [4] отмечается, что при некотором снижении общего числа пожаров в Российской Федерации материальный ущерб по пожарам в автотранспортных средствах, наоборот, растёт.

Как следует из статьи [23], в настоящее время по-прежнему научное обеспечение исследования пожаров на автотранспортных средствах является недостаточно сформированным и в значительной степени затрудняет работу пожарно-технических экспертов при исследовании пожаров на данном виде транспорта.

Автором [25] показано, что состояние проблемы пожарной безопасности транспортных средств, во-первых, указывает на необходимость объединения усилий специалистов в области общей безопасности транспорта, а во-вторых, снижения рисков возгорания автомобилей до социально приемлемого уровня.

По данным [25], снижение рисков осуществляется посредством достижения соответствия требованиям безопасности как на стадии производства в отношении вводимых в эксплуатацию транспортных средств и выпускаемых в обращение компонентов, так и на стадии эксплуатации в отношении транспортных средств, находящихся в эксплуатации, в том числе при выполнении их технического обслуживания и ремонта, а также при внесении изменений в конструкцию. Например, Технический регламент таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» ввел термин «безопасность

транспортного средства» – состояние, характеризующее совокупностью параметров конструкции и технического состояния транспортного средства, обеспечивающих недопустимость или минимизацию риска причинения вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических и юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде.

В целях обеспечения безопасности конструкции транспортные средства проходят сертификационные испытания, и в случае их успешного завершения получают сообщение об официальном утверждении типа. Согласно ТР ТС 018/2011 сообщение об официальном утверждении типа – документ, выдаваемый на основании Соглашения 1958 г., удостоверяющий соответствие транспортного средства или его компонента требованиям Правил ЕЭК ООН.

В целях обеспечения безопасности автомобилей в отношении возникновения пожара Комитетом по внутреннему транспорту Европейской экономической комиссии ООН (ЕЭК ООН) разработано Правило 34 «Единые предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении предотвращения опасности возникновения пожара», а в Российской Федерации введен ГОСТ Р 41.34–2001, гармонизированный с ним. В частности, указанные Правила и ГОСТ Р 41.34–2001 устанавливают, что если после столкновения транспортного средства из топливной системы происходит безостановочная утечка топлива, то она не должна превышать 30 г/мин. Конструктивно это реализуется следующим образом: во-первых, применяется аварийный выключатель топливного насоса, который отключает подачу топлива в случае дорожно-транспортного происшествия; во-вторых, при случайной разгерметизации топливной системы падает давление, двигатель останавливается, и блок управления двигателем или контроллер электрического топливного насоса автоматически отключает топливный насос. Необходимо подчеркнуть, что в отношении машин имеется ГОСТ Р 55153–2012 «Машины погрузочно-доставочные шахтные», согласно которому конструкцией должно быть предусмотрено автоматическое отключение дизельного двигателя путем перекрытия пода-

¹ Total number of reported highway vehicle fires in the U.S. from 1980 to 2021, (in) <https://www.statista.com/statistics/377009/us-highway-vehicle-fires-civilian-deaths/> (access on 01/02/2023)

² Чешко И. Д., Плотников В. Г. Анализ экспертных версий возникновения пожара. СПбФ ФГУ ВНИИПО МЧС России. Кн.1. Санкт-Петербург: ООО «Типография «Береста», 2010. 708 с.

чи топлива в случае повышения температуры выхлопных газов перед выходом в атмосферу свыше 70 °С, а топливопроводы необходимо размещать на расстоянии не менее 25 мм от неохлаждаемых и вращающихся частей двигателя. При этом топливопроводы должны быть защищены от повреждений и расположены так, чтобы топливо в результате негерметичности не могло попасть на неохлаждаемые или вращающиеся части двигателя.

К сожалению, некоторые авторы и эксперты, исследующие пожары автомобилей, не принимают во внимание эти конструктивные особенности, в частности, в диссертации Ю. Н. Елисеева «Экспертная дифференциация причин возникновения пожара легкового автомобиля в результате поджога и технической неисправности, связанной с разливом горючих жидкостей» отмечается, что при разгерметизации топливной системы последующему пожару способствует большая скорость выгорания бензина 3–6 л/мин. Аналогичный подход продемонстрирован Г. А. Сикоровой в диссертационной работе «Комплексная методика оценки степени термического поражения стальных изделий кузова автомобиля для обеспечения пожарной безопасности» и в статье [21].

Вполне очевидно, что, во-первых, это конструктивно невозможно согласно Правилу 34 ЕЭК ООН, а во-вторых, автомобиль, не прошедший сертификационные испытания и не получивший сообщение об официальном утверждении типа не будет выпущен на рынок любой страны мира.

Также V. Babrauskas, проанализировав ряд исследований, в работе [26] приходит к вводу, что тема воспламенения жидкого топлива на горячих поверхностях недостаточно изучена. В свою очередь, в работах [27, 28] по результатам численного анализа получен вывод, что возгорание пленки жидкого топлива на массивной подложке возможно только при достаточно высоких температурах ($T > 1100\text{K}$ или 826 °С) и тонких пленках 1–5 мм топлива. Для реализации условий зажигания пленки горючей или легковоспламеняющейся жидкости на разогретой подложке при температурах

($T < 1100\text{K}$ или 826 °С) необходим подвод дополнительной энергии к смеси окислителя с парами жидкого вещества. При этом авторы [27, 28] подчеркивают, что, во-первых, такие высокие температуры рабочих поверхностей различных агрегатов редки на производствах, а во-вторых, вероятность формирования реакционноспособной смеси паров разлитой жидкости может быть существенно снижена за счет вынужденной вентиляции и охлаждения воздушных масс вблизи рабочих поверхностей различных агрегатов и устройств. Кроме того, в работе³ подчеркивается, что число назначаемых судебных пожарно-технических экспертиз (СПТЭ), исследующих наличие причинной связи между нарушениями требований пожарной безопасности и развитием и последствиями пожара, неуклонно растет. При этом авторы констатируют, что в экспертной практике имеются случаи неправильного установления причинно-следственной связи между наступившими последствиями и выявленными нарушениями требований пожарной безопасности. Нередко это обусловлено сложностью СПТЭ, а также значительным объемом подготавливаемых экспертами заключений. Необходимо подчеркнуть, что, по мнению⁴, для исключения случаев неправильного установления причинно-следственной связи необходимо поддержание на высоком уровне профессионализма эксперта, постоянной теоретической и практической его подготовки, а при расследовании наиболее сложных дел целесообразно проведение комиссионных судебных пожарно-технических экспертиз. Выводы⁵ хорошо согласуются с ГОСТ Р 58197 – 2018 «Порядок проведения экспертизы качества автотранспортных средств». Необходимо отметить, что в данном нормативном документе перечислены квалификационные требования к лицам, проводящим данный вид исследования, и дано определение таким терминам, как пожарно-техническая экспертиза и причина пожара.

В работе [29] указывается, что повышение качества судебных экспертиз, в том числе и судебной пожарно-технической экспертизы, как одной из основных форм использования

³ Гайдено А.Г., Шеков А.А. Об ошибках при судебно-экспертном исследовании нарушений требований пожарной безопасности и их причинной связи с возникновением, развитием и последствиями пожара. Судебная экспертиза: прошлое, настоящее и взгляд в будущее [Электронный ресурс]: материалы Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 14–15 мая 2020 года / сост. Дубовик Е. С. Электрон. дан (3,97 Мб). Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет МВД России, 2018.

⁴ Там же.

⁵ Там же.

специальных знаний в судопроизводстве по делам о пожарах, является первостепенной задачей всех судебно-экспертных учреждений. При этом автором [29] подчеркивается, что эксперты часто слепо следуют справочным данным, не задумываясь, насколько физико-химические свойства вещества (материала), указанные в справочниках, адекватны свойствам вещества (материала) на сгоревшем объекте.

На основании вышеизложенного были сформулированы цель и задачи исследования.

Целью работы является оценка возможности воспламенения бензина на поверхности каталитического нейтрализатора с позиции требований послеаварийной безопасности.

В статье поставлены следующие задачи:

- провести замеры реальной температуры элементов выпускной системы автомобилей категорий M₁ и M₁G;
- дать анализ потоков движения воздуха в моторном отсеке автомобилей категорий M₁ и M₁G;
- провести эксперименты по капельному и струйному воспламенению бензина на нагретой стальной поверхности;
- исследовать элементный состав пленки, образующейся на стальной нагретой поверхности при капельном и струйном истечении бензина;
- установить первичность-вторичность образования пленки по отношению к пожару автомобиля.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились в Центре преемственности Veritas, а также в Научно-производственном центре по сертификационным испытаниям автомобильных топлив и масел Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева. В процессе исследования использовались растровый электронный микроскоп JSM-6390LV с приставкой энергодисперсионного микроанализа, тепловизор Fluke Ti400, цифровой мультиметр MASTERDMM-250 (ROBITON) с термопарой в комплекте, печь муфельная SNOL 8,2/1100 E5CN, бюретка с 2-ходовым краном 2-го клас-

са, 25 мл 1-4-2-25-0,1 по ГОСТ 29253–91, фарфоровый тигель № 3 по ГОСТ 9147–80, штатив лабораторный Бунзена ШЛ-03, тигель металлический 25 мл, стакан мерный стеклянный 100 мл по ГОСТ 1770–74. Объектами исследования являлись автомобили категорий M₁ и M₁G различных моделей (Toyota, Mercedes, Reno, Lada) и образцы автомобильного бензина класса K4 по ГОСТ 32513–2013.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Необходимо отметить, что исследования по воспламенению бензинов А-76 и АИ-93 описаны в работе⁶. Следует уточнить, что в данной работе 1987 г. издания испытуемый бензин содержал тетраэтилсвинец и не соответствовал стандарту ЕВРО 0, который был введен на территории большинства стран Европы в 1988 г. В настоящее время требования к автомобильным бензинам регламентируются ТР ТС 013/2011 «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту», согласно которому на территории стран Евразийского союза с 2016 г. допускается бензин классов K4 и K5.

Необходимо напомнить, что отличия в физических параметрах стандартов ЕВРО или классов бензина обусловлены неуклонным снижением содержания серы, бензола и непредельных углеводородов с двойной связью.

По методике, изложенной⁷, в нагретый до 500 °С металлический тигель, находящийся на электроплите, наливали 10 г бензина, имевшего комнатную температуру. Бензин нагревался и начинал интенсивно кипеть при температуре около 70 °С и полностью испарялся при достижении температуры 188 °С, что меньше температуры самовоспламенения бензина, которая превышает 255 °С. (рисунок 1). Соответственно, пары бензина в тигле не воспламенялись.

Необходимо подчеркнуть, что авторский коллектив во главе с И. Д. Чешко в работе [30] обосновал применение тигельного метода взамен сложного и дорогого метода термического анализа для оценки количественного выделения при нагревании из вещества летучих компонентов, которые обеспечивают его пламенное горение.

⁶ Исхаков Х.И., Пахомов А.В., Каминский Я.Н. Пожарная безопасность автомобиля. М.: Транспорт, 1987. 87 с.

⁷ Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов, и средства их тушения: справочник: в 2 ч.; 2-е изд., перераб. и доп. М.: Асс. «Пожнаука», 2004. 713 с.



а

б

Рисунок 1 – Кипение бензина в тигле: а – интенсивное кипение при 70°C; б – полное выкипание при 188°C
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Boiling petrol in a crucible, a - intensive boiling at 70°C, b-complete boiling at 188°C
Source: compiled by the authors

И. С Таубкин в статье [31] аргументированно уточнил, что пожаровзрывобезопасность любой горючей жидкости связана с ее нагревом выше температуры вспышки. Ниже этой температуры жидкость не представляет пожарной опасности в случае кратковременного воздействия источника зажигания.

Для того чтобы воспламенить жидкость при температуре ниже ее температуры вспышки, нужен не кратковременный, а сравнительно длительно действующий источник зажигания с энергией, достаточной для нагрева жидкости до температуры воспламенения, и температурой, которая была бы выше температуры самовоспламенения смеси паров этой жидкости с воздухом. Исключение составляет воспламенение жидкости с помощью фитиля, так называемого «фитильного эффекта» [31].

Дальнейший ход экспериментальных исследований можно увидеть по ссылке <https://youtu.be/dlSVyGdv2eM>. Следует отметить, что

данный видеоролик получил положительный отзыв Департамента надзорной деятельности и профилактической работы МЧС РФ (письмо № ИГ-19-585 от 17.03.2023 г.).

В процессе экспериментов осуществлялась капельная и струйная подача бензина на нагретую металлическую поверхность. При температуре металлической поверхности около 200°C бензин растекался, смачивая поверхность, и испарялся без воспламенения. При температуре металлической поверхности в диапазоне 500–750°C капли бензина, благодаря эффекту Лейденфроста, первоначально дробятся на более мелкие капли, интенсивно испаряются, левитируют и с треском взрываются. В результате время жизни капли весьма незначительно и воспламенение паров бензина также не происходит.

По методу, описанному в работе², а также автором⁸ бензин капельно и струйно подавался на нагретую до 750 °C металлическую трубу,

⁸ Иванов А.В. Оценка температуры самовоспламенения в реальных условиях. Сб. «Пожарная профилактика». М.: ВНИИПО, 1983. С. 134–141.

установленную с наклоном, соответствующим конструктивному расположению каталитического нейтрализатора. Результаты эксперимента можно увидеть по ссылке <https://youtu.be/dlSVyGdv2eM>. Капли бензина дробились, левитировали и испарялись без воспламенения. Струя топлива также дробилась на капли, часть из которых испарялась, а часть стекала с поверхности трубы без воспламенения. Поскольку время нахождения капель бензина на поверхности нагретой трубы очень мало, то воспламенение не происходило. Необходимо отметить, что при испарении бензина с поверхности трубы ее температура существенно понижалась, делая воспламенение бензина невозможным. В реальных условиях при утечке топлива двигатель автомобиля прекращает работу, и температура каталитического нейтрализатора автоматически падает, делая воспламенение бензина маловероятным.

Полученные результаты хорошо согласуются с работой [32], в которой указано:

- самым слабым из всех источников воспламенения является горячая поверхность;
- одно и то же топливо на цилиндрической поверхности имеет более высокую температуру зажигания по сравнению с плоской поверхностью;

- менее летучие виды топлива воспламеняются при более низких температурах поверхности, так как горючая паровая смесь образуется медленнее и остается ближе к источнику воспламенения.

Результаты эксперимента соответствуют редакции NFPA 921 от 2004 г. (параграф 25.4.3.2), где говорится: «Обычно бензин не воспламеняется от горячей поверхности, но для воспламенения требуется дуга, искра или открытое пламя», что наглядно показано в ролике <https://youtu.be/dlSVyGdv2eM>.

Далее у автомобилей ряда моделей (Toyota, Mercedes, Reno, Lada) на различных режимах была измерена температура элементов системы выпуска отработавших газов. Измерение фактической температуры производилось как тепловизором на неподвижном автомобиле, так и термопарами при движении транспортного средства. Результаты измерений следующие:

- выпускной коллектор может иметь температуру 300–700 °С;

- тепловой экран первого катализатора может иметь температуру 215–350 °С;

- наружная поверхность второго катализатора может иметь температуру 155– 315 °С;

- поверхность выхлопной трубы перед глу-

шителем может иметь температуру 100–270 °С;

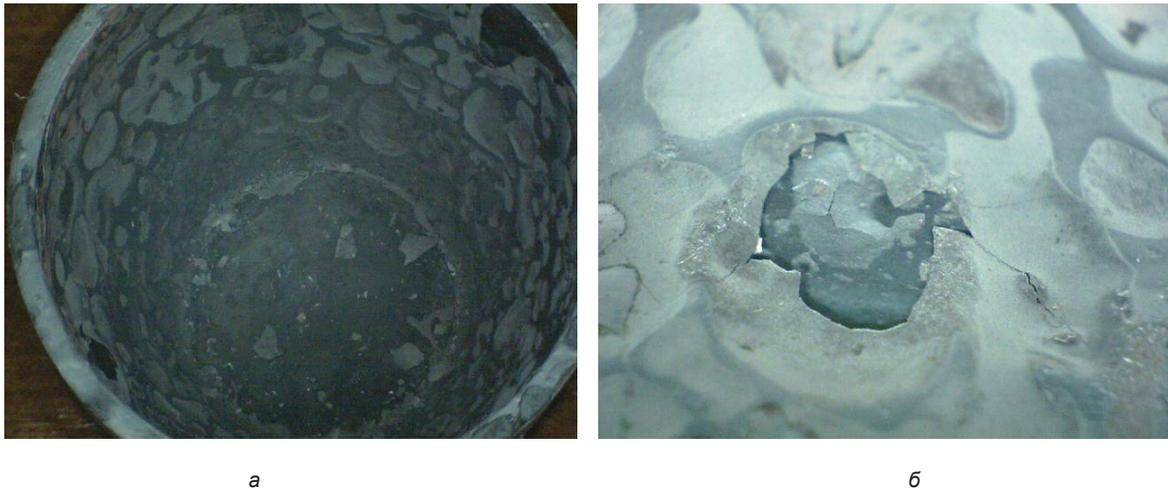
- наружная поверхность глушителя может иметь температуру 40–100 °С.

Необходимо отметить, что в целом результаты измерений соответствуют данным, полученным авторами статей [33, 34, 35].

Следует отметить, что в работах [36, 37] показано наличие мощных конвективных потоков в моторном отсеке легкового автомобиля. При этом подчеркивается, что из-за высокой температуры каталитических нейтрализаторов в области их расположения возникают большие встречные вращающиеся вихри, сопровождающиеся всасыванием более холодного окружающего воздуха через вентиляционные щели [35,36,37]. Авторами [36,37] экспериментально и теоретически установлено, что скорость воздуха в моторном отсеке может достигать от 2 до 6 м/с в зависимости от режима движения, причем в области расположения каталитического нейтрализатора в силу конструктивных особенностей автомобиля в целях реализации требований Правил № 34 ЕЭК ООН, она близка к максимальной для данного режима движения.

Резюмируя изложенное, необходимо подчеркнуть, что для того, чтобы выполнить требования правил № 34 ЕЭК ООН тепловой экран каталитического нейтрализатора конструктивно имеет обтекаемую форму, а сам каталитический нейтрализатор расположен под углом к горизонтальной плоскости, что минимизирует время нахождения капель жидкости на его поверхности, поскольку они стекают под действием силы тяжести. Кроме того, каталитический нейтрализатор конструктивно располагается в зоне интенсивного воздушного и конвективного потока.

Следует отметить, что в настоящее время многие эксперты-пожаротехники используют упрощенную схему классического треугольника пожара². Но многие исследователи, в том числе И. М. Абдурагимов, отмечали, что такая упрощенная схема дает лишь качественное представление об условиях пожара [38]. В работе [38] наглядно продемонстрировано, что для количественного представления необходимо вместо комплекса горючее-окислитель ввести понятие «горючая среда». Общеизвестно, что пожаро- и взрывоопасной является не всякая смесь паров горючих жидкостей с воздухом, а только смесь определенного состава, находящегося в концентрационных переделах воспламенения данного вида горючего с воздухом [38].



а

б

Рисунок 2 – Следы выгорания бензина в тигле: а – общий вид; б – увеличение 5^х
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Traces of burning petrol in the crucible, a-general view, b- 5^x magnification
Source: compiled by the authors.

В работе [38] подчеркивается, что вероятность образования горючей системы при транспортировке горючей жидкости определяется температурой и газодинамическими условиями смесеобразования, при этом фактическая вероятность воспламенения зависит от мощности источника поджигания.

Авторами [39] указывается, что каждая причинно-следственная ситуация соответствует конкретному периоду и конкретному набору условий и обстоятельств. Вполне очевидно, что попадание бензина на нагретую поверхность защитного кожуха каталитического нейтрализатора, являющегося самым слабым источником зажигания [26, 32] и находящегося в зоне интенсивного воздушного и конвективного потока [36, 37], не может являться причиной пожара легкового автомобиля. Данный вывод совпадает с мнением Vabauskas V., который в работе [26] отмечает: «В моторном отсеке автомобиля бензин обычно является веществом, которое меньше всего имеет вероятность возгорания от горячей поверхности, так как он будет, безусловно, самым летучим веществом, которое там можно найти».

Следует отметить, что очень многие эксперты-пожаротехники, указывая на утечку топлива, как вероятную причину пожара легкового автомобиля, в своих заключениях ссылаются на работу Б. В. Мегорского⁹. Но они пропускают следующую цитату этого автора:

«Возможность возникновения пожара по определенной причине еще не означает, что пожар неминуемо произойдет. Возможность возникновения пожара по определенной причине и даже факт возникновения пожара еще не означают, что пожар произошел именно по этой причине. Возможность нельзя смешивать с действительностью»⁹.

Ряд экспертов-пожаротехников, в том числе и специалисты АО «АВТОВАЗ», указывают на такой признак истечения легковоспламеняющихся жидкостей в моторном отсеке автомобиля, как «яблочность» или локальное выгорание капли на металле. Сложилось мнение, что поскольку горят пары, то непосредственно под расположением капли легковоспламеняющейся жидкости остается светлая область. Для проверки этого признака в металлический тигель, нагретый до 500–750 °С, осуществлялась как капельная, так и струйная подача топлива. Тигель был выбран для предотвращения разбрызгивания капель в окружающее пространство. Капли бензина, попадая на дно тигля, дробились, левитировали и попадали на его стенки, где окончательно испарялись без воспламенения. На внутренней поверхности тигля сформировалась окалина, локализованная пятнами (рисунок 2). Окалина была собрана и исследована на растровом электронном микроскопе JSM-6390LV с приставкой энергодисперсионного анализа (рисунок 3).

⁹ Мегорский Б.В. Методика установления причин пожаров. М.: Стройиздат, 1966. 347 с.

Под рисунком

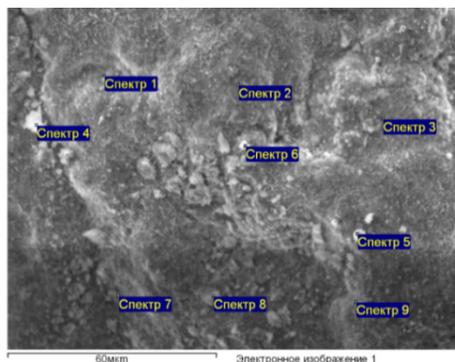


Рисунок 3 – Точки микроанализа
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Microanalysis points
Source: compiled by the authors.

Как следует из таблицы, окалина представляет продукт окисления железа с примесями, содержащимися в бензине, а также привнесенной пылью.

Таким образом, наглядно продемонстрировано, что если в моторном отсеке сгоревшего автомобиля имеется окалина, расположенная пятнами, то это является признаком попадания легковоспламеняющейся жидкости на предварительно нагретую металлическую поверхность. В противном случае капли стекнут и выгорят вместе с лакокрасочным покрытием, и окалина в виде пятен наблюдаться не

будет ввиду нивелировки под воздействием общей температуры пожара, достигающей в моторном отсеке 800–950 °С [11,12, 15, 16,17]. Резюмируя изложенное, следует вывод, что образование «пятнистой» окалины является следствием пожара, а не его причиной, поскольку следовоспринимающая поверхность уже нагрета.

Результаты проведенных экспериментальных исследований относятся только к технически исправным автомобилям. В таком нормативном документе, как ГОСТ Р 59483–2021 «Колесные транспортные средства» дается следующее определение: «исправность транспортного средства – состояние транспортного средства, находящегося в эксплуатации, при котором выполнены все нормативные требования, предъявляемые к конструкции и техническому состоянию такого транспортного средства». В свою очередь ГОСТ Р 58197–2018 «Порядок проведения экспертизы качества автотранспортных средств» конкретизирует данный термин, указывая, что исправное состояние – это состояние объекта, в котором он соответствует всем требованиям, установленным в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. Также действует ГОСТ 18322–2016 «Система технического обслуживания и ремонта техники», в котором регламентированы виды технического обслуживания.

Таблица
Результаты микроанализа участка на рисунке 3
Источник: составлено авторами.

Table
The results of the microanalysis for the section shown in Fig.3
Source: compiled by the authors.

Номер точки измерения Measurement point number	Содержание химического элемента, % масс. Content of chemical element, % by mass									
	O	Mn	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe
Спектр 1 / Range 1	3.18	1.21								95.37
Спектр 2 / Range 2	27.78	0.18						0.25		72.04
Спектр 3 / Range 3	35.00	0.15								64.85
Спектр 4 / Range 4	47.49	0.24	1.83	8.88	15.14					22.75
Спектр 5 / Range 5	27.66	0.00			0.40		2.49	0.83	0.34	71.94
Спектр 6 / Range 6	30.63	0.83		0.34		0.42				67.13
Спектр 7 / Range 7	3.97	0.00						0.65		95.32
Спектр 8 / Range 8	34.59	0.34						0.71		65.07
Спектр 9 / Range 9	3.01	0.57								96.41

Таким образом, автомобиль, имеющий сервисную книжку, в которой отмечены все виды регламентного технического обслуживания или ремонтных воздействий, автоматически считается технически исправным. И, соответственно, если нет подтверждения выполнения регламентных работ, то автомобиль может считаться работоспособным. Согласно ТР ТС «Безопасность колесных транспортных средств», «работоспособность» – состояние, при котором транспортное средство или его компоненты могут выполнять свои функции в соответствии с эксплуатационной документацией. Таким образом, автотранспортное средство может быть технически неисправным, но работоспособным, иначе говоря «на ходу». В свою очередь, необходимо отметить, что постановление пленума Верховного суда РФ № 25 от 9.12.2008 г. прямо указывает, что при рассмотрении дел о недоброкачественном ремонте транспортных средств и выпуске их в эксплуатацию с техническими неисправностями надлежит устанавливать причинную связь между недоброкачественным ремонтом отдельных систем, узлов транспортного средства, а также нарушением технологического процесса при их установке или замене и выпуском его в эксплуатацию и наступившими последствиями. Под недоброкачественным ремонтом транспортного средства следует понимать неустранение всех неисправностей в соответствии с технологическими правилами и нормативами либо установку недоброкачественных или нестандартных запасных частей (например, узлов и деталей, не обеспечивающих безопасную эксплуатацию транспортного средства). В связи с этим необходимо выяснить, нарушение каких конкретно правил и нормативов повлекло наступление опасных последствий.

Резюмируя изложенное, делаем два вывода:

- пожар технически исправного легкового автомобиля по причине случайной разгерметизации топливной системы и попадания бензина на поверхность каталитического нейтрализатора объективно невозможен ввиду конструктивных особенностей;

- в случае неисправного, но работоспособного состояния легкового автомобиля необходимо устанавливать причинную связь между неисправностью и пожаром с указанием того, нарушение каких конкретно правил и нормативов повлекло наступление опасных последствий. Более того, ГОСТ Р 58197–2018 прямо отмечает, что вероятностный вывод без указа-

ния оценки вероятности того или иного обстоятельства не допускается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально доказано и подтверждено результатами других авторов, что температура элементов выпускной системы автомобилей категорий M_1 и M_1G может находиться в следующих пределах:

- выпускной коллектор может иметь температуру 300–700 °С;

- тепловой экран первого катализатора может иметь температуру 215–350 °С;

- наружная поверхность второго катализатора может иметь температуру 155–315 °С;

- поверхность выхлопной трубы перед глушителем может иметь температуру 100–270 °С;

- наружная поверхность глушителя может иметь температуру 40–100 °С.

Показано, что в моторном отсеке автомобилей категорий M_1 и M_1G скорость потоков воздуха может достигать от 2 до 6 м/с в зависимости от режима движения, причем в области расположения каталитического нейтрализатора в силу конструктивных особенностей автомобиля, в целях реализации требований Правил № 34 ЕЭК ООН она близка к максимальной для данного режима движения.

Наглядно подтверждено, что при капельной и струйной подаче бензина классов K4 и K5 на нагретую в пределах 500–750 °С металлическую поверхность капли бензина, благодаря эффекту Лейденфроста первоначально дробятся на более мелкие капли, интенсивно испаряются, левитируют и с треском взрываются. В результате время жизни капли весьма незначительно и воспламенение паров бензина не происходит.

Установлен элементный состав пленки, образующейся на стальной нагретой поверхности при капельном и струйном истечении бензина. Окалина представляет продукт окисления железа с примесями, содержащимися в бензине, а также привнесенной пылью.

На примере падения капель бензина на нагретую металлическую поверхность продемонстрировано, что если в моторном отсеке сгоревшего автомобиля имеется окалина, расположенная пятнами, то это является признаком попадания легковоспламеняющейся жидкости на предварительно нагретую металлическую поверхность. Значит, образование окислы вследствие истечения легковоспламеняющейся жидкости является вторичным относительно момента и причины пожара.

Результатами литературного обзора и экспериментально подтверждено, что пожар технически исправного легкового автомобиля по причине случайной разгерметизации топливной системы и попадания бензина классов К4 и К5 на поверхность каталитического нейтрализатора объективно невозможен ввиду конструктивных особенностей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пасовец В. Н., Ковтун В. В., Тагиев Ш. Ш. Пожары на автотранспортных средствах: причины возникновения // Вестник Ун-та гражданской защиты МЧС Беларуси. 2022. Т 6, № 2. С. 228–238. DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2022.6-2.228>.
2. Zhang D. L., et al. Study on vehicle fire safety: Statistic, investigation methods and experimental analysis. *Safety Science*. 117 (2019). 194–204 <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.03.030>
3. Khodadadizadeh A, Jahangiri K, Khorasani Zavareh D, Vazirinejad R. Epidemiology of Vehicle Fire Fatalities of Road Traffic Injuries in Kerman Province, Iran: A Cross-Sectional Study. *Open Access Maced J Med Sci*. 2019 Jun 30; 7(12):2036–2043. <https://doi.org/10.3889/oamjms.2019.483>
4. Харченко И. В., Гераськин М. Ю., Шеков А. А. Использование метода зонирования термических повреждений для установления очага пожара в автотранспортных средствах // Вестник Восточно-Сибирского института МВД России. 2022. № 3 (102). С. 241–252. DOI: 10.55001/2312-3184.2022.11.75.021
5. Dorsz A, Lewandowski M. Analysis of Fire Hazards Associated with the Operation of Electric Vehicles in Enclosed Structures. *Energies*. 2022; 15(1):11. <https://doi.org/10.3390/en15010011>
6. Gudym V. et al. The effect of short circuits and flame temperature modes on the change in the microstructure of copper in automotive wiring. *Engineering Failure Analysis* 136 (2022) <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106198>
7. Brzezinska, D., Ollesz, R. and Bryant, P., Design car fire size based on fire statistics and experimental data, *Fire and Materials*, 44, 1099–1107, <https://doi.org/10.1002/fam.2913>, 2020.
8. Hui Zhu, Yunji Gao, Haidong Guo. Experimental investigation of burning behavior of a running vehicle Case Studies in Thermal Engineering Volume 22 22 (2020) <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100795>
9. Park Y, Ryu J, Ryou H.S. Experimental Study on the Fire-Spreading Characteristics and Heat Release Rates of Burning Vehicles Using a Large-Scale Calorimeter. *Energies*. 2019; 12(8):1465. <https://doi.org/10.3390/en12081465>
10. Hyeongho Choi, Lee Eui-Pyeong. Analysis of a Fire in a Parked Camping Car. *Korean Soc. Hazard Mitig* 2019; J. 19(1): 217–223. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.1.217>
11. Dayan Li, Guoqing Zhu, Hui Zhu, Zhichao Yu, Yunji Gao and Xiaohui Jiang. Flame Spread and Smoke Temperature of Full-Scale Fire Test of Car Fire, Case Studies in Thermal Engineering, Volume 10, Pages 315 – 324 <http://dx.doi.org/10.1016/j.csite.2017.08.001>
12. Xiao-hui Jiang et al. Full-scale Experimental Study of Fire Spread Behavior of Cars // *Procedia Engineering*. 211; (2018): 297–305
13. Lee, Eui-Pyeong. Analysis of a Car Fire Caused by a Fuel Leakage from the Common Rail. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.* 2018; vol.18:4. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2018.18.4.225>
14. Kruger S., Hofmann, A., Berger, A., et al., 2016. Investigation of smoke gases and temperatures during car fire- large-scale and small-scale tests and numerical investigations, *Fire and Materials*. 40(6): 785-799.
15. Okamoto K., Otake T., Miyamoto H., Honma M., and Watanabe N., Burning behavior of minivan passenger cars. *Fire Safety Journal*. 62, 272–280. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.07.001>, 2013.
16. Okamoto K., Watanabe N., Hagimoto Y., Chigira, T., Masano R., Miura H., Ochiai S., Satoh H., Tamura Y., Hayano K., Maeda Y., and Suzuki J., Burning behavior of sedan passenger cars. *Fire Safety Journal*. 44. 301-310. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.07.001>, 2009.
17. Xioa-hui J., Guo-qing Z., Hui Z., and Dayan L., Full-scale experimental study to fire spread behavior of cars, *Procedia Engineering*. 211. 297–305. 2018.
18. Ferrone C.W. Commercial vehicle fire, cause and origin analysis (Mechanical, electrical and forensic methods), in: 2nd int. conf., Fires in Vehicles, Chicago, USA, 2012, pp. 83–93.
19. Скодтаев С. В., Чешко И. Д., Теплякова Т. Д. Классификация аварийных пожароопасных режимов работы электросетей автомобилей и схема выявления их следов после пожара // Проблемы управления рисками в техносфере. 2019. № 1. С. 107–115.
20. Johnsson E.L., Yang J.C. Experimental study on hardening a motorcoach against tire fire penetration. *Fire Mater.* 2016;40(3):416-426. <https://doi.org/10.1002/fam.2295>.
21. Моторыгин Ю. Д., Сикорова Г. А. Комплексная методика исследования степени термического поражения стальных элементов транспортных средств с помощью полевых методов // Технологии техносферной безопасности. 2021. Вып. 3 (93). С. 137–151. <https://doi.org/10.25257/TTS.2021.3.93.137-151>.
22. Ложкин В. Н. Теория и практика диагностики пожароопасных режимов эксплуатации каталитических нейтрализаторов // Пожаровзрывобезопасность / *Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):65-74. <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.03.65-74>.
23. Ворошилов Р. Ф., Мурашкевич Е. А. Исследование поврежденного огнем легкового автомобиля после воздействия тепла пожара при разгерметизации топливной системы // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2020; 18 (3):38–41. doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2020.18.3.006.
24. Недобитков А.И., Абдеев Б.М. Оценка несущей способности контактного соединения полюсного вывода свинцовой аккумуляторной батареи // Пожаровзрывобезопасность / *Fire and Explosion Safety*. 2023. Т. 32, № 2. С. 18–32. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.18-32.

25. Кисуленко Б. В. Оценка рисков причинения вреда автомобильной техникой в целях технического нормирования // Стандарты и качество. 2007. № 6. С. 80–82.

26. Babrauskas V. Ignition of Gases, Vapors, and Liquids by Hot Surfaces. *Fire Technol* 58, 281–310 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10694-021-01144-8>

27. Высокоморная О. В., Стрижак П. А. Зажигание жидкого топлива при растекании по разогретой до высоких температур подложке // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21, № 4. С. 17–22.

28. Стрижак П. А. Численный анализ возможности возгорания пленки жидкого топлива на нагретой до высоких температур подложке // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21, № 3. С. 25–30.

29. Таубкин И. С. О повышении качества судебных пожарно-технических экспертиз // Теория и практика судебной экспертизы. 2019. Т. 14, № 4. С. 98–116. <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2019-14-4-98-116>

30. Чешко И. Д., Принцева М. Ю., Теплякова Т. Д. Альтернатива термогравиметрического и дифференциально-термического анализа в исследовании и экспертизе пожаров // Проблемы управления рисками в техносфере. 2022. № 3 (63). С. 95–103.

31. Таубкин И. С. О специальном понятийном аппарате судебной пожарно-технической экспертизы // Теория и практика судебной экспертизы. 2020. Т. 15, № 3. С. 76–88. <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2020-3-76-88>

32. Adams, Jesse Filmore, “Minimum Hot Surface Ignition Temperature Diagnostics Including Infrared Imagery” (2015). Open Access Theses.1043.https://docs.lib.purdue.edu/open_access_theses/1043

33. Бояршинов М. Г., Кузнецов Н. И. Температурный режим системы выпуска автомобиля при пониженных температурах // Мир транспорта. 2019;17(4):48–67. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-48-67>

34. Fournier, E. and Bayne, T., “Underhood Temperature Measurements of Four Vehicles”, Prepared for Motor Vehicle Fire Research Institute, by Biokinetics and Associates, Ltd., Report R04-13, September 2004. www.mvfri.org

35. Worsztynowicz B., Uhrynski A. The analysis of heating process of catalytic converter using thermovision. *Combustion Engines*. 2015. 162(3). 41-51. ISSN 2300-9896.

36. Merati P. Davis C. Chen K.H. Johnson J.P. Underhood Buoyancy Driven Flow – An Experimental Study. *J. Heat Transf.* 2011. 133. 1–9.

37. Y.Y.Xie *etal* 2019 *IOPConf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 562 012056 DOI 10.1088/1757-899X/562/1/012056

38. Абдурагимов И. М. Предельные явления в горении как научно-теоретическая основа пожаровзрывобезопасности // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2012; 21(11):18–26.

39. Аминев Ф. Г., Замятин С. А. Частный методический прием установления и верификации причины при производстве судебной экспертизы // Теория и практика судебной экспертизы. 2023. Т. 18, № 2. С. 45–53. <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2023-2-45-53>

REFERENCES

1. Pasovets B. H., Kovtun B. A., Tagiev Sh. Sh. (2022) Fire on vehicles: causes of their appearance, *Journal of Civil Protection*. 2022; 6(2): 228–238. (In Russ.) doi: 10.33408/2519-237X.2022.6-2.228.

2. Zhang D. L., et al. Study on vehicle fire safety: Statistic, investigation methods and experimental analysis. *Safety Science*. 2019; 117:194–204 <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.03.030>

3. Khodadadizadeh A., Jahangiri K., Khorasani Zavareh D., Vazirinejad R. Epidemiology of Vehicle Fire Fatalities of Road Traffic Injuries in Kerman Province, Iran: A Cross-Sectional Study. *Open Access Maced J Med Sci*. 2019 Jun 30; 7.

4. Kharchenko I. V., Geraskin M. Yu., Shekov A. A. Ispol'zovanie metoda zonirovaniya termicheskikh povrezhdenij dlja ustanovleniya ochaga pozhara v avtotransportnykh sredstvakh [The use of the method of zoning thermal damage to establish the seat of fire in the moto vehicle]. *Vestnik Vostochno-Sibirskogo instituta MVD Rossii / Vestnik of the East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2022; 3 (102): 241–252. (in Russ.) DOI: 10.55001/2312-3184.2022.11.75.021.

5. Dorsz A., Lewandowski M. Analysis of Fire Hazards Associated with the Operation of Electric Vehicles in Enclosed Structures. *Energies*. 2022; 15(1):11. <https://doi.org/10.3390/en15010011>

6. Gudym V. et al. The effect of short circuits and flame temperature modes on the change in the microstructure of copper in automotive wiring. *Engineering Failure Analysis* 136 (2022) <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106198>

7. Brzezinska D., Ollesz R., and Bryant. P. Design car fire size based on fire statistics and experimental data, *Fire and Materials*. 2020; 44:1099–1107, <https://doi.org/10.1002/fam.2913>, 2020.

8. Hui Zhu, Yunji Gao, Haidong Guo. Experimental investigation of burning behavior of a running vehicle Case Studies in Thermal Engineering. 2020; Volume 22 22. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100795>

9. Park Y., Ryu J., Ryu H.S. Experimental Study on the Fire-Spreading Characteristics and Heat Release Rates of Burning Vehicles Using a Large-Scale Calorimeter. *Energies*. 2019; 12(8):1465. <https://doi.org/10.3390/en12081465>

10. Hyeongho Choi, Lee Eui-Pyeong Analysis of a Fire in a Parked Camping Car. *Korean Soc. Hazard Mitig* 2019; J. 19(1): 217-223. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.1.217>

11. Dayan Li, Guoqing Zhu, Hui Zhu, Zhichao Yu, Yunji Gao and Xiaohui Jiang. Flame Spread and Smoke Temperature of Full-Scale Fire Test of Car Fire. *Case Studies in Thermal Engineering*. Volume 10: 315-324 <http://dx.doi.org/10.1016/j.csite.2017.08.001>

12. Xiao-hui Jiang et al. Full-scale Experimental Study of Fire Spread Behavior of Cars. *Procedia Engineering*. 2018; 211: 297–305.

13. Lee, Eui-Pyeong. Analysis of a Car Fire Caused by a Fuel Leakage from the Common Rail. *J. Korean Soc. Hazard Mitig*. 2018; vol.18: pp. 4. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2018.18.4.225>

14. Kruger S., Hofmann A., Berger A. et al., 2016. Investigation of smoke gases and temperatures during car fire- large-scale and small-scale tests and numerical investigations. *Fire and Materials*. 40(6): 785-799.
15. Okamoto K., Otake T., Miyamoto H., Honma M., and Watanabe N. Burning behavior of minivan passenger cars. *Fire Safety Journal*. 2013; 62: 272–280. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.07.001>.
16. Okamoto K., Watanabe N., Hagimoto Y., Chigira T., Masano R., Miura H., Ochiai S., Satoh H., Tamura Y., Hayano K., Maeda Y., and Suzuki J. Burning behavior of sedan passenger cars. *Fire Safety Journal*. 2009; 44: 301-310. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.07.001>.
17. Xioa-hui J., Guo-qing Z., Hui Z. and Dayan L. Full-scale experimental study to fire spread behavior of cars. *Procedia Engineering*. 2018; 211: 297-305.
18. Ferrone C. W. Commercial vehicle fire, cause and origin analysis (Mechanical, electrical and forensic methods), in: 2nd int. conf., Fires in Vehicles, Chicago, USA, 2012: 83–93.
19. Cheshko I. D., Skodtaye V. Teplyakova T. D. Classification of emergency fire-hazardous operations of electric networks of cars and the scheme of identifying their trails after the fire. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere* [Problems of technosphere risk management]. 2019; 1 (64):107-115. (In Russ.)
20. Johnsson E. L., Yang J. C. Experimental study on hardening a motorcoach against tire fire penetration. *Fire Mater*. 2016;40(3):416-426. <https://doi.org/10.1002/fam.2295>.
21. Motorygin Yu. D., Sikorova G. A. A comprehensive method for studying the degree of thermal damage to steel elements of vehicles using field methods. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti* [Technology of technosphere safety]. 2021; 3 (93):137-151. (In Russ.) <https://doi.org/10.25257/TTS.2021.3.93.137-151>.
22. Lozhkin V. N. Theory and practice of diagnostics of fire hazardous modes of operation of catalytic converters. *Pozharovzryvobezopasnost* [Fire and Explosion Safety]. 2022;31(3):65-74. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.03.65-74>.
23. Voroshilov R. F., Murashkevich E. A. Investigation of a car damaged by fire after exposure to the heat of a fire during depressurization of the fuel system. *Sibirskiy pozharo-spasatel'nyy vestnik* [Siberian Fire and Rescue Bulletin]. 2020; 18 (3):38-41. (In Russ.) doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2020.18.3.006
24. Nedobitkov A. I., Abdeev B. M. Assessment of bearing capacity of pole connection of lead-acid storage battery terminal. *Pozharovzryvobezopasnost* [Fire and Explosion Safety]. 2023; 32(2):18-32. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.18-32 (in Russ.)
25. Kisulenko B.V. Assessment of the risks of causing harm to automotive equipment for the purpose of technical regulation. *Standarty i kachestvo* [Standards and quality]. 2007: 6. 80-82(in Russ.)
26. Babrauskas V. Ignition of Gases, Vapors, and Liquids by Hot Surfaces. *Fire Technol*. 2022; 58, 281–310 <https://doi.org/10.1007/s10694-021-01144-8>
27. Vysokomornaya O. V., Strizhak P. A. Ignition of liquid fuel when spreading over a substrate heated to high temperatures. *Pozharovzryvobezopasnost* / Fire and Explosion Safety. 2012; 21(4):17-22. (in Russ.)
28. Strizhak P. A Numerical analysis of the possibility of ignition of a liquid fuel film on a substrate heated to high temperatures. *Pozharovzryvobezopasnost* / Fire and Explosion Safety. 2012; 21(3):25-30. (in Russ.)
29. Taubkin I. S. On Improvement of the Quality of Forensic Fire Investigations. *Theory and Practice of Forensic Science*. 2019. Vol. 14. No. 4. P. 98 –116. (In Russ.) <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2019-14-4-98-116>.
30. Cheshko I. D., Printseva M. Yu., Teplyakova T. D. Alternative to thermogravimetric and differential thermal analysis in the study and examination of fires. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere* / Problems of risk management in the technosphere. 2022; 3 (63): 95 – 103. (In Russ.)
31. Taubkin I. S. On the Special Conceptual Framework for the Fire Forensics. *Theory and Practice of Forensic Science*. 2020. Vol. 15. No. 3. P. 76–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2020-3-76-88>
32. Adams, Jesse Filmore, Minimum Hot Surface Ignition Temperature Diagnostics Including Infrared Imagery (2015). Open Access Theses.1043.https://docs.lib.purdue.edu/open_access_theses/1043
33. Boyarshinov M.G., Kuznetsov N.I. Thermal Regime of Automobile Exhaust System at Low Temperature. *World of Transport and Transportation*. 2019;17(4):48-67. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-48-67>
34. Fournier, E. and Bayne, T., Underhood Temperature Measurements of Four Vehicles, Prepared for Motor Vehicle Fire Research Institute, by Biokinetics and Associates, Ltd., Report R04-13, September 2004. www.mvfri.org
35. Worsztynowicz B., Uhrynski A. The analysis of heating process of catalytic converter using thermo-vision. *Combustion Engines*. 2015. 162 (3), 41-51. ISSN 2300-9896.
36. Merati P. Davis C. Chen K.H. Johnson J.P. Underhood Buoyancy Driven Flow – An Experimental Study. *J. Heat Transf*. 2011, 133, 1–9.
37. Y Y Xie et al 2019 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*. 562 012056 DOI 10.1088/1757-899X/562/1/012056
38. Abduragimov I. M. Limiting phenomena in combustion as a scientific and theoretical basis for fire and explosion safety. *Pozharovzryvobezopasnost* / Fire and Explosion Safety. 2012;21(11):18-26. (In Russ.)
39. Aminev F.G., Zamyatin S.A. Specific Methodological Approach for Establishing and Verifying Cause in Forensic Examination. *Theory and Practice of Forensic Science*. 2023. Vol. 18. No. 2. P. 45–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2023-2-45-53>

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

The authors contributed equally to this article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Недобитков Александр Игнатьевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Центра превосходства Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева, SPIN-код: 5662-5180.

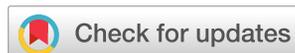
Яковлев Владимир Сергеевич – главный специалист по техническим вопросам научно-производственного центра по сертификационным испытаниям автомобильных топлив и масел (НПЦ «САТuM»).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksander I. Nedobitkov – Cand. of Sci., Senior scientist of the Excellence Research Center at D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, SPIN-код: 5662-5180.

Vladimir S. Yakovlev – Chief Technical Specialist of the Scientific and Production Center for automotive fuels and oils certification testing (NPTs SATuM).

Научная статья
УДК 656.02
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-632-648>
EDN: WMBMDI



УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫМ ПРЕДЛОЖЕНИЕМ НА РЕГУЛЯРНЫХ МЕЖДУГОРОДНЫХ АВТОБУСНЫХ ЛИНИЯХ

А. И. Фадеев*, А. М. Ильянков

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>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Междугородный общественный транспорт обеспечивает удовлетворение мобильности не только пассажиров дальнего следования, но и жителей малых населенных пунктов, расположенных на регулярной линии. Между такими пунктами зачастую отсутствуют другие виды регулярного сообщения общественного транспорта. Особая роль общественного транспорта заключается в обслуживании населения, не владеющего личным автомобилем. Растущий спрос на междугородные автобусные линии усиливает потребность в эффективном проектировании перевозок, чтобы обеспечить конкурентоспособные услуги общественного транспорта и минимизировать расходы перевозчиков.

Материалы и методы. В статье приведена математическая модель планирования перевозок по междугородной регулярной автобусной линии, проходящей через населенные пункты с различным числом жителей. Целевая функция направлена на формирование транспортного предложения, удовлетворяющего потенциальный спрос, для определения которого применен гравитационный метод.

Проведенный анализ пассажирских потоков показывает, что на большинстве рейсов вместимость подвижного состава используется недостаточно эффективно.

Результаты. Путем сравнения потенциального числа пассажиров рейсов с фактическим показано, что регулирование транспортного предложения с учетом спроса позволит существенно повысить качество и эффективность транспортного обслуживания населения.

Обсуждение и заключение. На основании данных за 2022 г., полученных из системы бронирования, обслуживающей регулярную автобусную линию, показано, что при введении регулирования ожидаемое повышение эффективности транспортного предложения составляет до 25%.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: общественный транспорт, планирование общественного транспорта, междугородная автобусная линия, транспортный спрос, матрица пассажирских корреспонденций, транспортное предложение

Статья поступила в редакцию 18.07.2023; одобрена после рецензирования 04.10.2023; принята к публикации 24.10.2023.

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: А. И. Фадеев, А. М. Ильянков Управление транспортным предложением на регулярных междугородных автобусных линиях // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 5 (93). С. 632-648. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-632-648>

© Фадеев А. И., Ильянков А. М., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-632-648>
EDN: WMBMDI

TRANSPORT SUPPLY MANAGEMENT ON REGULAR INTERCITY BUS LINES

Aleksandr I. Fadeyev*, **Aleksei M. Ilyankov**

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>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Intercity public transport ensures the satisfaction of mobility not only for long-distance passengers, but also for residents of small settlements located on a regular line. There are often no other types of regular public transport between such settlements. The growing demand for intercity bus transportation increases the need for efficient transportation design in order to provide competitive public transport services and minimize the costs of carriers.

Materials and methods. The article presents a mathematical model of transportation planning on an intercity regular bus line passing through settlements with different numbers of inhabitants. The objective function is aimed at forming a transport supply that satisfies potential demand, for which the gravitational method is used to determine. The analysis of the unevenness of passenger flows by months of the year, days of the week and flights shows that on most flights the capacity of the rolling stock is not used efficiently enough.

Results. By comparing the potential number of passengers on flights with the actual one, it is shown that flexible regulation of transport supply taking into account demand will significantly improve the quality and efficiency of public transport services.

Discussion and conclusion. Based on the data for 2022 of the booking system serving the regular bus line, it is shown that with the introduction of flexible regulation of the transport offer, the expected increase in passenger turnover will be about 25%.

KEYWORDS: public transport, public transport planning, intercity bus line, transport demand, passenger correspondence matrix, transport supply

The article was submitted 18.07.2023; approved after reviewing 04.10.2023; accepted for publication 24.10.2023.

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. Transport supply management on regular intercity bus lines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (5): 632-648. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-632-648>

© Fadeyev A. I., Ilyankov A. M., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время общественный транспорт в целом и междугородный в частности имеет большое социально-экономическое значение: он обеспечивает удовлетворение мобильности населения, снижение использования личных автомобилей и отрицательного воздействия на окружающую среду. Особая роль общественного транспорта (в том числе междугородного) заключается в обслуживании населения, не имеющего личного автомобиля [1].

Растущий спрос на междугородные автобусные перевозки усиливает потребность в эффективном управлении транспортным процессом, чтобы повысить качество услуг общественного транспорта и минимизировать операторские расходы.

В общих чертах роль транспортного планирования и управления заключается в обеспечении удовлетворения определенного пассажирского спроса, характеризующегося пространственной и временной неравномерностью¹[2]. Используемая транспортная система имеет конечную пропускную способность.

Междугородные регулярные автобусные линии проходят через населенные пункты с различным числом жителей, в которых оборудованы остановочные пункты для посадки-высадки пассажиров. На автобусной линии организовывается определенное число междугородных маршрутов, которые пересекаются с некоторыми пригородными и городскими маршрутами через общие остановочные пункты или остановочные пункты, расположенные в пешеходной доступности. Городские и пригородные перевозки общественным транспортом осуществляются при наличии определенного уровня спроса, необходимого для функционирования соответствующего маршрута. В малых населенных пунктах из-за низкой интенсивности пассажирских потоков зачастую отсутствует общественный транспорт, кроме междугородных маршрутов автобусной линии.

Междугородные автобусные линии конкурируют с другими видами магистрального

транспорта, например, железнодорожным. Кроме этого, мобильность населения может быть удовлетворена личным транспортом и посредством карпулинга². Конкуренция ограничивает возможность перевозчиков максимизировать прибыль через повышение тарифов, актуальной является задача сохранения доли рынка³.

Предложение транспортных услуг должно быть сформировано таким образом, чтобы оно в наибольшей степени соответствовало спросу [2]. В данной работе под транспортным предложением понимаются условия транспортного обслуживания, доступные пассажиру для удовлетворения определенного транспортного спроса.

Целью перевозчиков автобусной линии является выполнение максимально возможной транспортной работы, объем которой определяет доходы (пассажирские тарифы устанавливаются в зависимости от расстояния перевозки).

В работе [3] рассматривается задача распределения транспортной работы между перевозчиками междугородной маршрутной сети, решение которой предлагается осуществлять путем создания единой системы эксплуатации. Очевидно, что данное предложение не вполне реализуемо даже на междугородной сети. Кроме этого, следует учитывать взаимное влияние пригородных, междугородных и городских маршрутов. Зачастую пригородные пассажиры предпочитают более комфортабельные поездки на междугородном автобусе. Для перевозчиков это не всегда приемлемо, потому что заполнение междугородных автобусов на коротких участках может ограничить обслуживание междугородных пассажиров и сделать нерентабельной работу маршрута.

С другой стороны, в настоящее время существует тенденция использования междугородного общественного транспорта для удовлетворения мобильности жителей малых населенных пунктов, расположенных на регулярной линии, независимо от расстояния поездок [4, 5]. В сельских районах весь общественный транспорт (за исключением специального

¹ Копылова Е. В. Оптимизация пригородных пассажирских перевозок на основе организации пассажиропотока: дис. ... д-ра техн. наук: 2.9.4. М., 2022.

² Карпулинг (англ. car «автомобиль» + pool «объединение») или райдшеринг (англ. ride «поездка» + share «делиться») – совместное использование частного автомобиля с помощью онлайн-сервисов поиска полутчиков. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki> (дата обращения: 05:10:2023)

³ Постников В. П. Управление тарифообразованием пригородного железнодорожного транспорта на основе многокритериальной оптимизации: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2019. 24 с.

обслуживания, например, перевозок школьников) зачастую базируется на региональных автобусных линиях [6]. На практике вместо расширения маршрутов между небольшими сельскими районами транспортное обслуживание населения все больше переключается на развитие междугородных маршрутов [7]. Перевозчики могут быть заинтересованы в таких пассажирах, исходя из соображения сохранения доли рынка или через договорные отношения с органами государственного управления или местного самоуправления.

Планирование междугороднего общественного транспорта требует оценки различных факторов, оказывающих влияние на транспортную систему, предпочтений пассажиров, операторов и общества в целом [5]. Для решения данной задачи большое значение имеет прогнозирование пассажирских потоков и определение спроса на рынке⁴ [8]. В данном аспекте в работе [9] рассмотрена задача расчета на базе АСУ «Экспресс» перспективных объемов отправок пассажиров и величин недостатка (избытка), предложенных к продаже мест в сегменте железнодорожного сообщения дальнего сообщения.

В области совершенствования перевозок пассажиров широкий круг исследований проводится по проектированию маршрутов различных видов транспорта, определению интервалов (частоты) движения и формированию расписаний перевозок [10, 11, 12, 13]. В большинстве работ эти исследования выполняются, как правило, в контексте городских перевозок (например, [14]), в то время как, несмотря на наличие общих аспектов, данная задача для междугороднего транспорта имеет существенные отличия.

Кроме перечисленных вопросов для междугородних линий актуальным является планирование транспортного предложения с учетом параметров спроса, а также взаимодействия междугородних, городских и пригородных маршрутов. Данная задача решается посредством разработки оперативных стратегий управления транспортным предложением [15, 16]. При этом применяются следующие подходы:

– разделение остановочных пунктов маршрутов разных видов перевозок (городских, пригородных и междугородних), таким образом,

чтобы сегментировать транспортный спрос; при этом следует учитывать взаимное влияние маршрутов через остановочные пункты, находящиеся в пешеходной доступности;

– исключение транспортного предложения для перевозок между определенными остановочными пунктами (например, для перевозок по междугородному маршруту в пределах городской черты);

– варьирование остановочными пунктами рейса в зависимости от транспортного спроса (неодинаковый перечень остановочных пунктов разных рейсов маршрута);

– варьирование пассажирскими тарифами в зависимости от загрузки рейсов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Постановка задачи. Междугородная регулярная автобусная линия проходит через населенные пункты с различным числом жителей. По маршрутам линии выполняется рейсов в прямом и обратном направлениях. Условия задачи:

$$\sum_s \sum_{ij} p_{ij}^s T_{ij} l_{ij} \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$Q_i^s \leq q^s; \forall s = \overline{1, r}; \forall i \in W, \quad (2)$$

где: T_{ij} – потенциальный транспортный спрос между пунктами ij ;

l_{ij} – расстояние между пунктами ij ;

p_{ij}^s – вероятность обслуживания пассажирской корреспонденции ij s -м рейсом;

Q_i^s – число пассажиров s -го рейса при отправлении из пункта i ;

q^s – номинальная вместимость транспортного средства, выполняющего s -й рейс;

W – множество остановочных пунктов автобусной линии.

Выражение (1) обуславливает получение максимальной транспортной работы, что обеспечивает наибольшую эффективность перевозок и позволяет обслуживать пассажиров по конкурентоспособным тарифам, которые, как упоминалось выше, зависят от расстояния перевозки.

⁴ Корягин М. Е., Чистяков А. С. Определение параметров основных факторов логит-функции, влияющих на вероятность выбора пассажиром способа передвижения // Транспорт: наука, образование, производство: сб. науч. тр. / Ростовский государственный университет путей сообщения. Ростов н/д, 2019. С. 157–160.

2. Для определения потенциального транспортного спроса широко используется гравитационная модель, в соответствии с которой степень взаимодействия населенных пунктов или транспортных районов пропорциональна произведению численности населения и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними⁵. Вероятно, первое строгое использование гравитационной модели было дано в работе [17] для описания поездок за покупками и зон водосбора между городами в регионе. В простейшей формулировке модель имеет следующий вид:

$$T_{ij} = \frac{\alpha P_i P_j}{l_{ij}^2}, \quad (3)$$

где P_i, P_j – численность жителей населенного пункта i, j соответственно;

l_{ij} – расстояние между населенными пунктами ij ;

α – постоянная, определяемая в результате калибровки.

В дальнейшем модель была усовершенствована [2]: вместо числа жителей введены параметры числа прибытия-отправления (O_i и D_j), вместо квадрата расстояния применен показатель степени n , который может быть как целым, так и дробным числом; в различных исследованиях тестировались его значения от 0,6 до 3,5 [18, 19]. Модель была дополнительно обобщена путем использования функции транспортных расходов C_{ij} , отражающей не только расстояние, но и стоимость проезда между транспортными районами (или населенными пунктами) [2]. Модель формулируется как:

$$T_{ij} = \alpha O_i D_j f(c_{ij}), \quad (4)$$

где: $f(c_{ij})$ – обобщенная функция транспортных расходов с одним или несколькими параметрами. Данную функцию часто называют «функцией сдерживания»: она описывает снижение степени привлекательности поездок по мере увеличения расстояния, времени или стоимости. Популярными версиями этой функции:

$$f(c_{ij}) = \exp(-\beta c_{ij}) \quad (5)$$

экспоненциальная;

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^{-n} \quad (6)$$

степенная;

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^n \exp(-\beta c_{ij}) \quad (7)$$

комбинированная,

где: β, n , – параметры калибровки функции сдерживания.

При этом должны быть соблюдены следующие ограничения [2]:

$$\sum_i T_{ij} = D_j; \sum_j T_{ij} = O_i. \quad (8)$$

Для выполнения ограничения (8) единый коэффициент пропорциональности α заменен на два набора уравнивающих коэффициентов A_i и B_j , т.е. [2, 20]:

$$T_{ij} = A_i O_i B_j D_j f(c_{ij}). \quad (9)$$

Гравитационная модель применялась для расчета транспортного спроса на междугородных и пригородных линиях в работах⁶ [21, 22, 23].

Число отправок и прибытий определяется в рамках общей четырехэтапной транспортной модели: генерация поездок, распределение поездок, выбор вида транспорта и назначение поездок [2]. В работе [24] для междугородных поездок применена транспортная модель, состоящая из двух последовательных шагов. Во-первых, прогнозируется общий объем междугородных поездок для всех пар населенных пунктов. Во-вторых, пассажирские корреспонденции посредством логит-модели распределяются между видами перевозок.

Как правило, при определении количества поездок учитываются социально-экономические характеристики городов и комплексные показатели уровня обслуживания. Например, такой подход используют для прогнозирования пассажиропотока на высокоскоростных железных дорогах [25].

⁵ Власов М. П., Шимко П. Д. Моделирование экономических процессов: учеб. пособие для студентов, обучающихся по специальности 080502 – Экономика и управление на предприятии (по отраслям) / СПб.: С.-Петербург. гос. инженер.-экон. ун-т, 2006. 386 с. ISBN 5-88996-566-2.

⁶ Чистяков А. С. Гравитационная модель пассажиропотоков направления Красноярск-Ачинск // Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах: труды V Международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 14 апреля 2021 года. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2021. С. 112–117.

При генерации поездок часто принимаемыми во внимание переменными являются характеристики пассажиров, привлекательность поездки, а также атрибуты альтернатив [26, 27, 28]. Модели генерации поездок делятся на агрегированные и дезагрегированные. Модели, основанные на агрегированных данных, позволяют рассчитать общее количество поездок между парами населенных пунктов⁷. Методы моделирования обычно включают регрессионные модели, кросс-классификационный анализ или комбинацию первого и второго. Эти методы отличаются математической простотой и доступностью данных⁸.

Дезагрегированные модели формирования поездок были разработаны для согласования с моделями выбора вида транспорта или пункта назначения. Эти модели основаны на данных индивидуального уровня: предполагается, что формирование поездки представляет собой процесс выбора из следующих альтернатив: не совершать поездку, одна поездка, две поездки и так далее. Модели предсказывают вероятность того, что человек совершит определенное количество поездок за определенный период⁹.

Фактическое количество перевезенных пассажиров между остановочными пунктами автобусной линии известно из системы бронирования, посредством которой осуществляется реализация пассажирских билетов¹⁰. Данные из системы бронирования будем применять для калибровки математической модели. При этом следует учитывать, что между некоторыми остановочными пунктами перевозчики используют ограничения транспортного предложения: устанавливают предельное число мест, время начала реализации или билеты могут не продаваться вовсе. Для калибровки будем использовать остановочные пункты, между которыми нет ограничений транспортного предложения.

3. Задачу планирования перевозок рассмотрим на примере автобусной линии Красноярск – Енисейск (рисунок 1). На данном направлении нет других видов магистрального

транспорта (например, железнодорожного). Кроме междугородного автобуса удовлетворение транспортного спроса обеспечивается пригородными маршрутами, организованными из крупных населенных пунктов, личным транспортом и посредством карпулинга. Линия проходит через 38 населенных пунктов, в которых организовано 48 остановочных пунктов. Расстояние от Красноярска до Енисейска около 360 км. На рисунке 1 даны наименования наиболее крупных населенных пунктов. Размер окружности, которой обозначены населенные пункты, зависит от числа жителей.

Ежедневно по рассматриваемой линии выполняется 6-7 рейсов автобуса в прямом (из Красноярска) и обратном (из Енисейска) направлениях.

Транспортный спрос рассчитаем следующим образом:

$$T_{ij} = \alpha P_i P_j f(c_{ij}). \quad (10)$$

В данном случае не применялось выражение (9) с балансирующими коэффициентами для каждого населенного пункта A_i и B_j по следующим причинам. С одной стороны, использование этих коэффициентов должно обеспечить более высокую точность математической модели. Однако, во-первых, при этом остаются неизвестными факторы, обусловившие разный характер взаимодействия населенных пунктов, т.е. невозможно выявить закономерности влияния таких факторов и применить их к рассматриваемой системе в целом. Во-вторых, нет уверенности в стабильности значений коэффициентов балансировки вследствие возможных изменений в будущем социально-экономических условий. В-третьих, из-за того, что перевозчики применяют ограничения в реализации пассажирских билетов, для некоторых пар населенных пунктов отсутствуют фактические значения перевезенных пассажиров, которые необходимы для определения значений балансирующих коэффициентов.

⁷ Institute of Transportation Engineers. (1992). Transportation Planning Handbook.

⁸ United States Department of Transportation, Federal Highway Administration. (1999). Guidebook on Statewide Travel Forecasting. Federal Highway Administration Report FHWA-HEP-99-007.

⁹ Domencich, Thomas A. and McFadden, Daniel. (1995). Urban Travel Demand, A Behavioral Analysis. ACharlesRiverAssociatesResearchStudy.

¹⁰ Фадеев А.И. Интегрированная информационная система организации и управления перевозками пассажиров по регулярным автобусным маршрутам / А.И. Фадеев, М.Т. Ильянков // Безопасность колёсных транспортных средств в условиях эксплуатации: материалы 106-й Международной научно-технической конференции. 2019. С. 654–661.

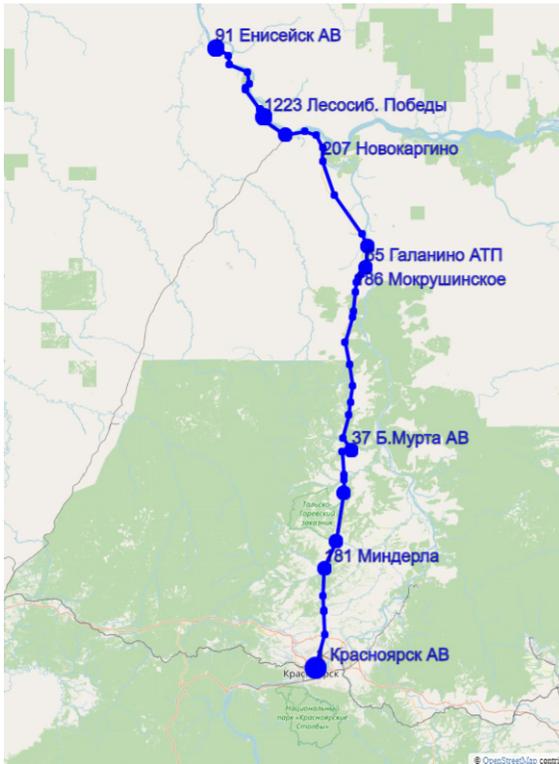


Рисунок 1 – Схема автобусной линии «Красноярск – Енисейск»
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Krasnoyarsk – Yeniseisk scheme bus line
 Source: compiled by the authors.

Выражение (10) позволяет рассчитать потенциальный спрос на основе двух факторов: числа жителей и расстояний между населенными пунктами. При этом не учитываются другие факторы, такие как доход семьи, наличие автомобиля и пр. Однако получение информации о структуре населения – непростая задача. Поэтому на данном этапе исследований определение потенциального спроса осуществлено гравитационным методом. В дальнейшем планируется разработка методики, учитывающей и другие характеристики населения.

Как упоминалось выше, для определения параметров гравитационной модели спроса междугородной автобусной линии использованы населенные пункты, между которыми не применялись ограничения транспортного предложения. К таким пунктам относятся: с. Абалаково, г. Енисейск, с. Казачинское, г. Красноярск, г. Лесосибирск, п. Новокаргино, п. Шапкино. В результате расчетов получено, что пассажиропоток наиболее адекватно описывается степенной функцией сдерживания (6) при $n=2$.

На рисунке 2 сплошной линией обозначена полученная теоретическая зависимость отношения числа поездок (T_{ij}) к произведению числа жителей ($P_i P_j$) от расстояния между населенными пунктами (L).

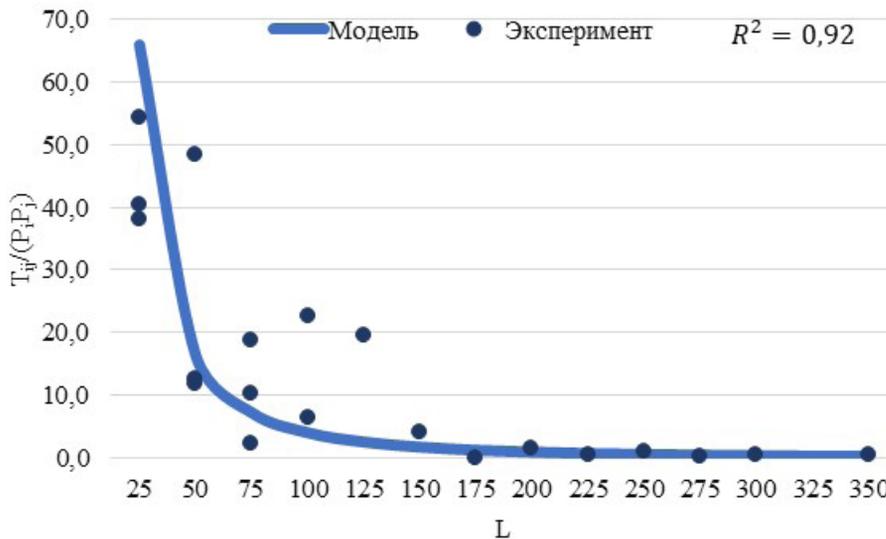


Рисунок 2 – Зависимость отношения числа поездок (T_{ij}) к произведению числа жителей ($P_i P_j$) от расстояния между населенными пунктами (L)
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Dependence of the journeys number ratio (T_{ij}) to the product of the inhabitants number ($P_i P_j$) on the distance between settlements (L)
 Source: compiled by the authors.

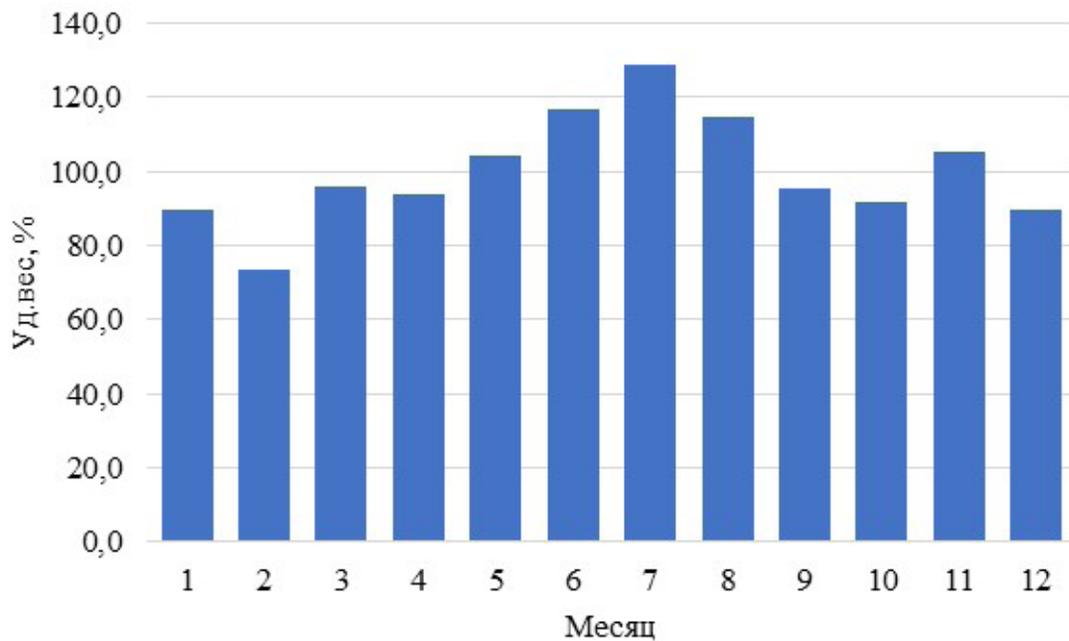


Рисунок 3 – Распределение объема перевозок по месяцам года по отношению к среднему за месяц
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Distribution of passenger traffic volume by month of the year in relation to the average for the month
Source: compiled by the authors.

На рисунке 2 точками обозначены экспериментальные данные 2022 г., полученные из информационной системы бронирования, используемой перевозчиками по рассматриваемой линии. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,92$ рассматриваемой регрессионной модели позволяет сделать вывод о ее соответствии данным в степени, достаточной использования при решении рассматриваемой задачи. Однако имеющиеся выбросы свидетельствуют о влиянии на транспортный спрос неучтенных факторов (которые планируется рассмотреть в дальнейших исследованиях).

С использованием выражения (10) между всеми населенными пунктами, расположенными на автобусной линии, рассчитаны потенциальные пассажирские корреспонденции в среднем за год.

4. Управление транспортным предложением. Потенциальный объем перевозок корреспонденции ij -м рейсом можно рассчитать:

$$T_{ij}^s = p_{ij}^s T_{ij}, \quad (11)$$

где p_{ij}^s – вероятность обслуживания пассажирской корреспонденции ij -м рейсом.

$$p_{ij}^s = \begin{cases} \frac{k_m^s k_w^s k_r^s}{r_{ij}}, & \text{если } r_{ij} > 0 \\ 0, & \text{если } r_{ij} = 0 \end{cases}, \quad (12)$$

r_{ij} – количество рейсов в год, которыми может быть обслужена корреспонденция ij ;

$k_m^s k_w^s k_r^s$ – корректирующие коэффициенты, посредством которых учитывается неравномерность пассажирских потоков по месяцам года, дням недели и рейсам расписания.

На рисунке 3 приведено распределение числа перевезенных пассажиров по месяцам года: пассажирские потоки имеют существенную сезонную неравномерность (коэффициентом неравномерности до 1,3). Самыми напряженными являются летние месяцы, в которые перевозится треть годового числа пассажиров. В осенне-зимний период перевозки снижаются до 80–90% от среднемесячного за год.

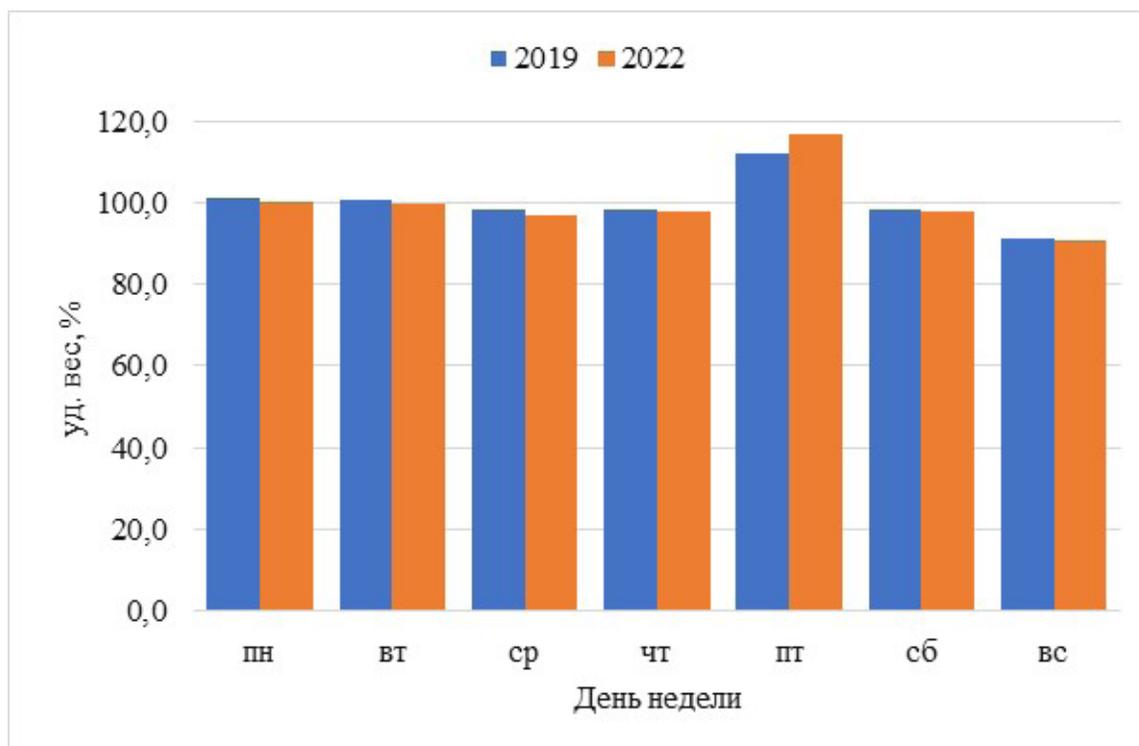


Рисунок 4 – Диаграмма распределения объема перевозок по дням недели
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Distribution diagram of the transported passengers number by day of the week
Source: compiled by the authors.

Пассажи́рские потоки также изменяются в течение недели (рисунок 4). В пятницу объем перевозок увеличивается на 10–20% по отношению к среднему за неделю. В воскресенье практически на такую же величину наблюдается его снижение.

На рассматриваемой линии расписание движения по дням недели не изменяется. В предпраздничные дни в связи с резким повышением спроса могут организовываться дополнительные рейсы, число которых обуславливается фактическим пассажиропотоком.

На рисунке 5 приведено распределение пассажирских потоков между рейсами, выполняемыми за сутки в будний день. Из рисунка видно, что рейсы заполняются неравномерно, в прямом направлении большее число пассажиров перевозится рейсами, отправляемыми из Красноярского автовокзала в первой половине дня. В обратном направлении менее загруженными являются рейсы с отправлением в 10:00 и 11:30 из Енисейска.

Значения корректирующих коэффициентов рассчитываются на основании распределения

объема перевозок по месяцам года, дням недели и между рейсами дня выполнения перевозок:

$$k_m^s = \frac{Q_m^s}{\bar{Q}_m}; \quad (13)$$

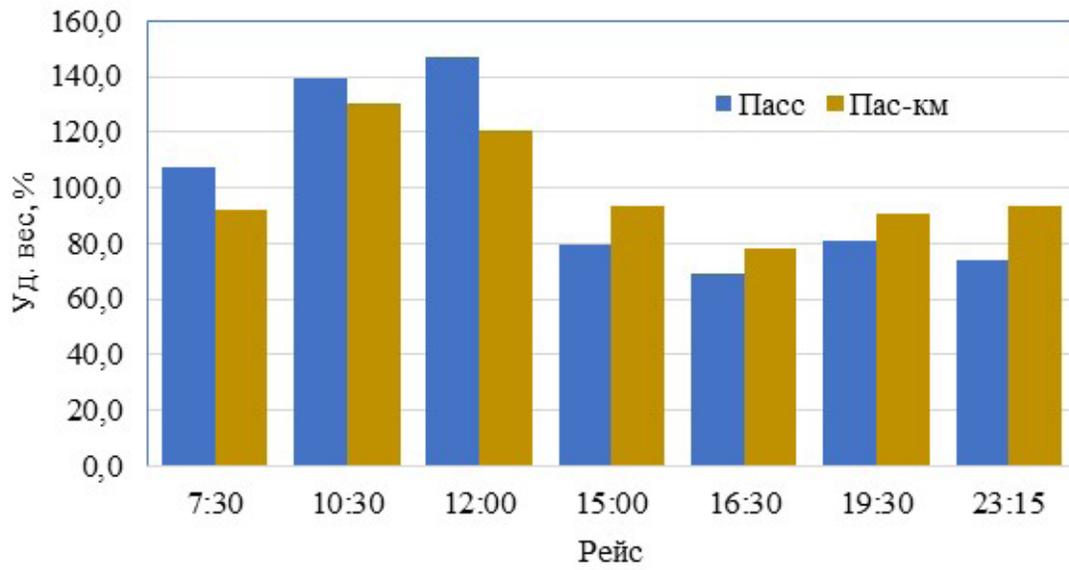
$$k_w^s = \frac{Q_w^s}{\bar{Q}_w}; \quad (14)$$

$$k_r^s = \frac{Q_r^s}{\bar{Q}_r}; \quad (15)$$

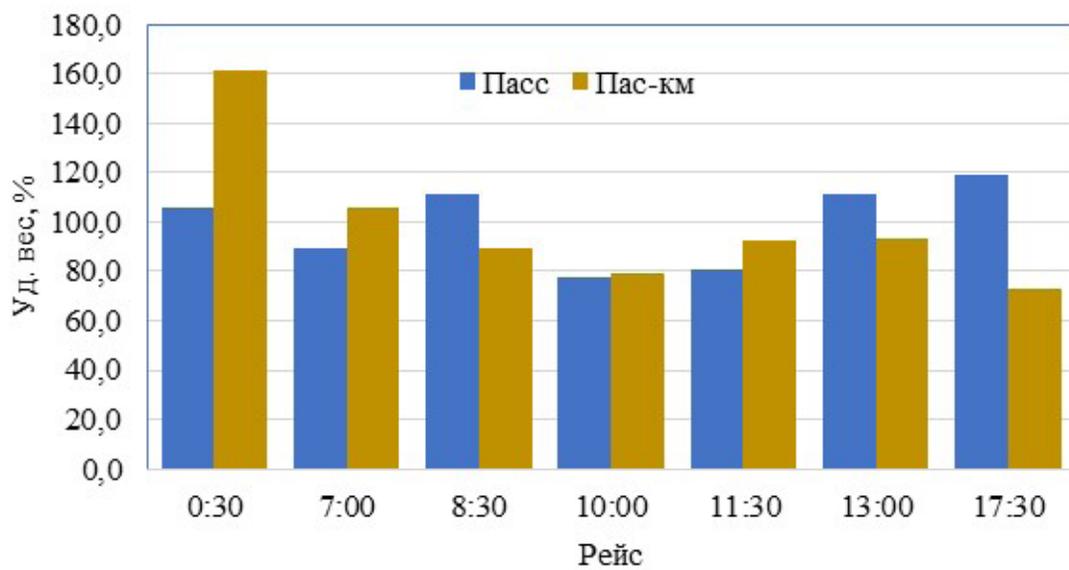
где Q_m^s , \bar{Q}_m – объем перевозок в месяце s -го рейса и в среднем за месяц года;

Q_w^s , \bar{Q}_w – объем перевозок в день недели s -го рейса и в среднем за день недели;

Q_r^s , \bar{Q}_r – объем перевозок в расписании s -го рейса и в среднем за рейс дня перевозок.



а



б

Рисунок 5 – Распределение перевозок между рейсами:
 а – прямое направление (из Красноярска);
 б – обратное направление (из Енисейска)
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Distribution of transportation between flights
 a) straight direction (from Krasnoyarsk)
 b) reverse direction (from Yeniseisk)
 Source: compiled by the authors.

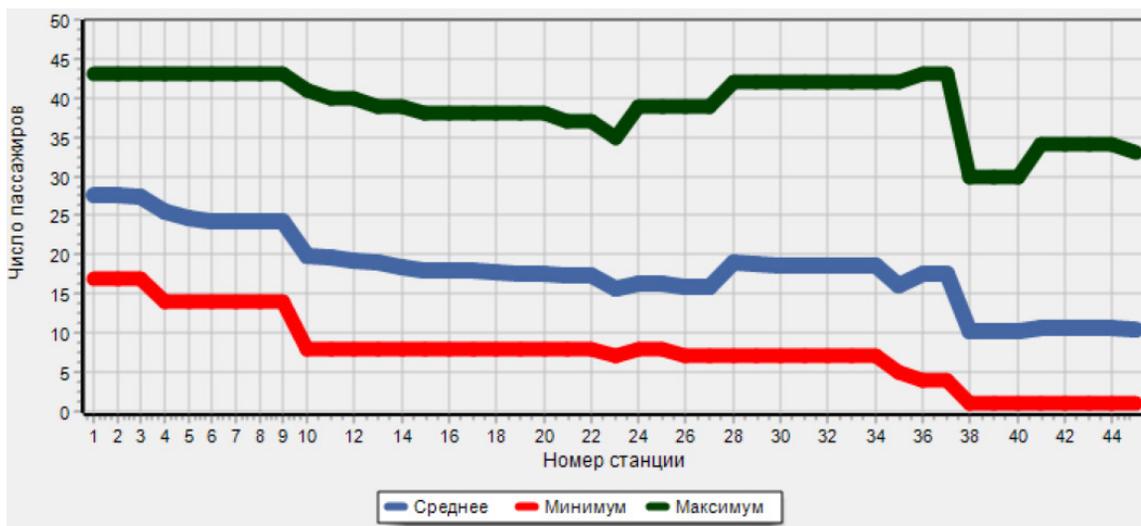


Рисунок 6 – Распределение числа пассажиров в автобусе на перегонах рейсов на 07:30 из Красноярска в будние дни (понедельник – четверг) ноября 2022 г. Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Distribution of passengers number on a bus during flights at 07:30 from Krasnoyarsk on weekdays (Monday – Thursday) November 2022 Source: compiled by the authors.



Рисунок 7 – Распределение фактического и расчетного числа пассажиров на перегонах рейса на 07:30 из Красноярска 1 ноября 2022 г. Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Distribution of the actual and estimated passengers number during the flight at 07:30 from Krasnoyarsk on November 1, 2022 Source: compiled by the authors.

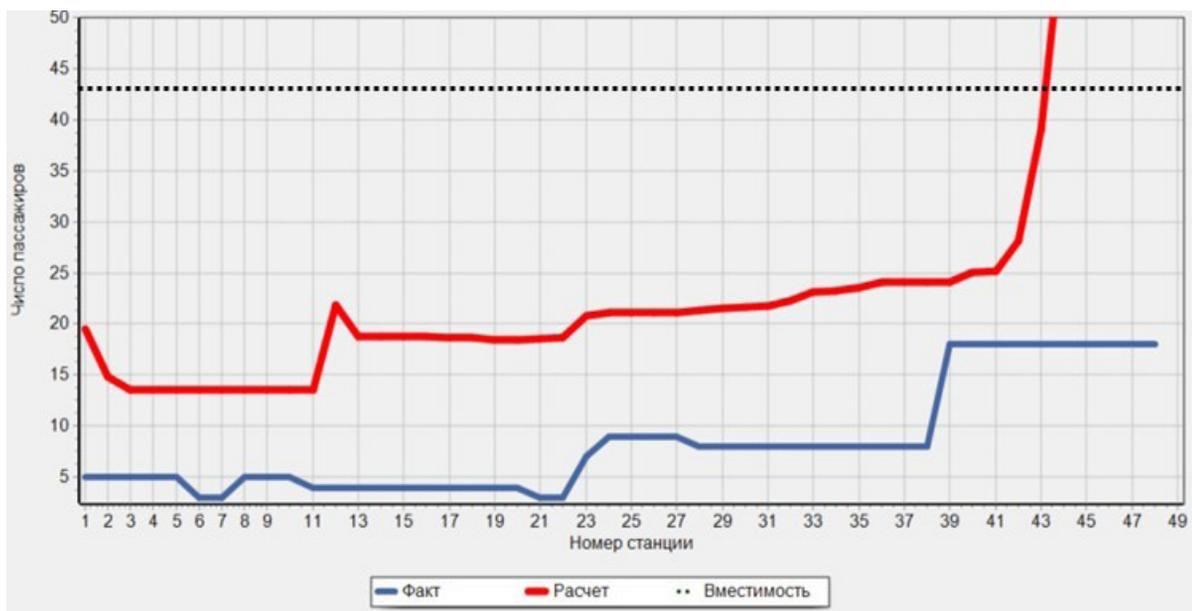


Рисунок 8 – Распределение фактического и расчетного числа пассажиров на перегонах рейса на 11:30 из Енисейска 1 ноября 2022 г. Источник: составлено авторами.

Figure 8– Distribution of the actual and estimated passengers number during 11:30 flight from Yeniseisk on November 1, 2022 Source: compiled by the authors.

Корреспонденция T_{ij} может быть обслужена s -м рейсом, если остановочные пункты i и j присутствуют в рейсе и номер i -го пункта больше номера j -го, т.е.

$$n_i^s > 0, n_j^s > 0, n_i^s > n_j^s, \quad (16)$$

где n_i^s, n_j^s – номер i -го, j -го остановочного пункта в s -м рейсе соответственно.

Матрица потенциальных пассажирских корреспонденций s -го рейса T_{ij}^s , рассчитанная в соответствии с выражением (11), является допустимой, если выполняется ограничение (2): число пассажиров в автобусе на всех перегонах маршрута не превышает номинальной вместимости автобуса.

Если на каких-либо перегонах упомянутое ограничение не выполняется, требуются управляющие воздействия для переключения пассажирских корреспонденций с междугородного на другие виды общественного транспорта, например, пригородные автобусные маршруты.

Ограничение реализации пассажирских билетов, используемое перевозчиками в настоящее время, нельзя признать рациональным решением проблемы. На автобусных линиях зачастую применяются ограничения,

одинаковые для всех рейсов независимо от динамики пассажирских потоков. В результате существенное число рейсов оказывается незаполненным, в то время как на определенных сегментах транспортное предложение отсутствует.

Для управления транспортным предложением междугородной автобусной линии требуется разработать стратегию, обеспечивающую баланс между эффективностью и качеством транспортного обслуживания, учитывающую случайные колебания транспортного спроса, структуру системы общественного транспорта.

Очевидно, что на сегментах линии без других видов общественного транспорта ограничения транспортного предложения применяться не должны.

Рассматриваемая стратегия может быть реализована в системе бронирования, через которую осуществляется реализации пассажирских билетов. Оценим потенциальную эффективность управления транспортным предложением. На рисунке 6 приведено изменение числа пассажиров в автобусе рейса на 07:30 из Красноярска за ноябрь 2022 г.; приведены средние, максимальные и минимальные значения числа пассажиров в автобусе на перегонах маршрута.

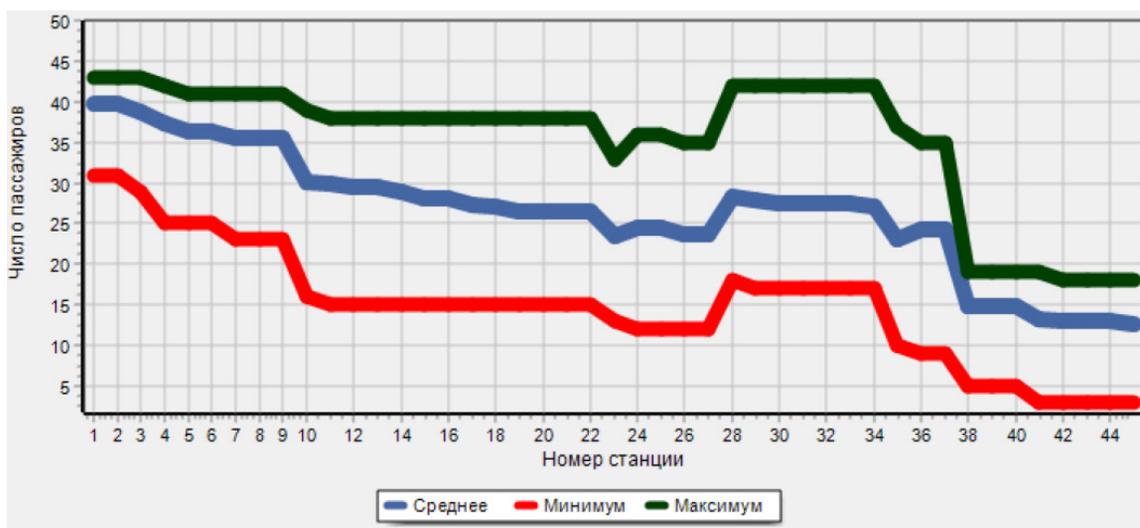


Рисунок 9 – Распределение числа пассажиров в автобусе на перегонах рейсов на 07:30 из Красноярска в пятницу летних месяцев 2022 г. Источник: составлено авторами.

Figure 9– Distribution of the passengers number on a bus during flights at 07:30 from Krasnoyarsk on Friday in the summer months of 2022 Source: compiled by the authors.

Для перевозок используются транспортные средства с 43 местами для сидения. Линия «максимум» показывает, что автобус на некоторых перегонах рассматриваемого рейса заполнен не полностью. В среднем за месяц вместимость подвижного состава данного рейса используется не более 50%. В дни минимального спроса (линия «минимум») пассажиры занимают не более 25% мест в автобусе.

Рассмотрим возможность повышения эффективности перевозок за счет регулирования транспортного предложения в зависимости от динамики спроса. Рассчитаем потенциальное число пассажиров рейса и сравним его с фактическим. Динамика фактического и расчетного числа пассажиров по остановочным пунктам рейса из Красноярска на 07:30 1 ноября 2022 г. приведена на рисунке 7. Расчетное число пассажиров определено в соответствии с выражением (11).

Из рисунка видно, что для рассматриваемого рейса управление транспортным предложением необходимо на сегменте первых пяти остановочных пунктов от Красноярска до станции Миндерла. На данном сегменте функционируют пригородные автобусные маршруты, на которые можно перераспределить спрос.

Аналогичным образом следует применять управление транспортным предложением на обратных рейсах из Енисейска (рисунок 8).

Из рисунка 7 видно, что регулирование транспортного предложения с учетом спроса позволит повысить качество и эффективность транспортного обслуживания населения. На линии будет сформировано более широкое транспортное предложение, в том числе пассажирам небольших населенных пунктов, в которых нет другого общественного транспорта (кроме междугородного автобуса). Для рейса на 07:30 из Красноярска за счет гибкого регулирования ожидается повышение пассажирооборота составляет до 25% (см. рисунок 7).

Следует отметить, что даже в летние месяцы повышенного спроса имеется резерв провозных возможностей, за счет которых можно увеличить транспортное предложение на некоторых сегментах линии. На рисунке 9 проиллюстрирована динамика числа пассажиров в автобусе в течение рейсов в пятницу летних месяцев 2022 г. Видно, что транспортный спрос подвержен существенным случайным колебаниям: минимальное и максимальное число пассажиров примерно на треть отличается от среднего.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В связи с существенным социально-экономическим значением междугородных автобусных перевозок усиливается потребность в эффективном управлении транспортным процессом, чтобы повысить качество и конкурентоспособность услуг общественного транспорта и минимизировать операторские расходы.

2. С целью оценки возможной эффективности управления транспортным предложением с использованием гравитационного метода осуществлен расчет *потенциального спроса междугородной автобусной линии*. Получено, что пассажиропоток наиболее адекватно описывается степенной функцией сдерживания.

Коэффициент детерминации полученной регрессионной модели позволяет сделать вывод о ее соответствии фактическим данным в достаточной степени. Однако имеющиеся выбросы свидетельствуют о влиянии на транспортный спрос факторов, не учитываемых в гравитационном методе, таких как *доход семьи, наличие автомобиля и т.д.* Эти факторы планируется рассмотреть в дальнейших исследованиях.

3. В соответствии с разработанной математической моделью задача планирования перевозок по междугородной регулярной автобусной линии, проходящей через населенные пункты с различным числом жителей, предусматривает управление транспортным предложением с учетом параметров спроса, а также взаимодействия междугородных, городских и пригородных маршрутов.

4. В статье приведен разработанный порядок расчета потенциального транспортного спроса с учетом неравномерности пассажирских потоков.

Пассажирские потоки имеют существенную сезонную неравномерность (коэффициентом неравномерности до 1,3), самыми напряженными являются летние месяцы, в которые перевозится треть годового объема перевозок. В осенне-зимний период объем перевозок снижается до 80–90% по отношению к среднемесячному за год.

Пассажирские потоки также изменяются в течение недели. В пятницу объем перевозок увеличивается на 10–20% по отношению к среднему за неделю. В воскресенье практически на такую же величину наблюдается снижение числа перевезенных пассажиров.

5. Анализ эпюр распределения пассажиров по длине рейса показывает, что на рассматриваемой линии имеется существенный резерв провозных возможностей.

6. На автобусных линиях, как правило, перевозчиками применяются ограничения транспортного предложения, которые нельзя признать рациональными. Зачастую применяются ограничения одинаковые для всех рейсов, независимо от динамики пассажирских потоков. В результате большое число рейсов оказывается незаполненным, в то время как на определенных сегментах обслуживание пассажиров не осуществляется, отсутствует транспортное предложение пассажирам небольших населенных пунктов, в которых нет другого общественного транспорта.

7. Путем сравнения потенциального числа пассажиров с фактическим спросом реальной автобусной линии показано, что управление транспортным предложением позволяет повысить качество и эффективность транспортного обслуживания населения.

8. Направления дальнейших исследований:

- разработать математическую модель транспортного спроса, учитывающую не только расстояние между населенными пунктами, но и другие факторы, такие как *доход семьи, наличие автомобиля и т.д.*;

- исследовать механизм влияния параметров транспортного предложения (технико-эксплуатационных показателей транспортной системы) на транспортный спрос;

- разработать методику определения транспортного спроса в зависимости от параметров транспортного предложения;

- сформировать стратегию управления транспортным предложением с учетом случайных колебаний спроса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Woldeamanuel M. Evaluating the competitiveness of intercity buses in terms of sustainability indicators. *Journal of Public Transportation*. 2012; Vol. 15, No. 3: 5.

2. Ortuzar J. D. *Modelling transport* / J. D. Ortuzar, L. G. Willumsen. John Wiley & Sons, 2011. 586 p. URL: DOI:10.1002/9781119993308.

3. Щербаков Л. М. Эффективность междугородных автобусных перевозок в условиях функционирования рынка транспортных услуг // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2011. № 3 (50). С. 63–65.

4. Javid R., and E. Sadeghvaziri. Investigating the Relationship Between Access to Intercity Bus Transportation and Equity. *Transportation Research Record*, 2022, p. 03611981221088218.

5. Group K. *Effective Approaches to Meeting Rural Intercity Bus Transportation Needs*. Report 79, Transit Cooperative Research Program. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 2002. 184 p.

6. 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.
7. Ryan F., Allard R. F., and Moura F., The Incorporation of Passenger Connectivity and Intermodal Considerations in Intercity Transport Planning, *Transport Reviews*, 2015, <http://dx.doi.org/10.1080/01441647.2015.1059379>
8. Корягин М. Е., Чистяков А. С. База данных для описания рынка междугородных пассажирских перевозок // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 1(56). С. 38–45. DOI 10.52170/1815-9262-2021-56-38.
9. Макарова Е. А., Елизаров С. Б., Муктепавел С. В. Автоматизированная система прогнозирования пассажирских транспортных потоков на базе АСУ «Экспресс» // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2011. №. 4. С. 21–27.
10. Alderighi M., Cento, A., Nijkamp, P., & Rietveld, P. Network competition – the coexistence of hub-and-spoke and point-to-point systems. *Journal of Air Transport Management*. 2005; 11(5): 328–334. doi:10.1016/j.jairtraman.2005.07.006
11. Alderighi M., Feder C, Nijkamp P, Ungureanu E. Simple pricing rules in complex air transport systems. *Handbook on Entropy, Complexity and Spatial Dynamics: A Rebirth of Theory?* Chapter 18. 2021: pp. 304 – 320 doi: 10.4337/9781839100598.00027
12. Merrina A., Sparavigna, A., & Wolf, R. A. The intermodal networks: A survey on intermodalism. *World Review of Intermodal Transport Research*. 2007; 1(3): 286–299.
13. Ranjbari A., Hickman M., Chiu YC. A Mathematical Optimization Model for Solving the Intercity Transit Network Design Problem // CASPT 2018 Extended Abstract. Режим доступа: http://www.caspt.org/wp-content/uploads/2018/10/Papers/CASPT_2018_paper_128.pdf. (дата обращения: 22.05.2023)
14. Sunhyung Yoo, Jinwoo Brian Lee, and Hoon Han. A reinforcement learning approach for bus network design and frequency setting optimization // *Public Transport*. 2023: pp 1–32. /doi.org/10.1007/s12469-022-00319-y
15. Ibarra-Rojas, O., J., Delgado, R. Giesen, and J.C. Muñoz (2015). Planning, Operation, and Control of Bus Transport Systems: A Literature Review. *Transportation Research Part B: Methodological*. 77: 38-75. DOI: 10.1016/j.trb.2015.03.002.
16. Jingxu Chen, Zhiyuan Liu, Senlai Zhu, Wei Wang. Design of limited-stop bus service with capacity constraint and stochastic travel time // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2015; Volume 83: 1-15. doi.org/10.1016/j.tre.2015.08.007
17. Casey H. J. (1955) Applications to traffic engineering of the law of retail gravitation. *Traffic Quarterly* IX. 1955: 23–35.
18. Erlander S. and Stewart N.F. (1990) *The Gravity Model in Transportation Analysis: Theory and Extensions*. VSP, Utrecht.
19. Abrahamsson T. Estimation of Origin-Destination Matrices Using Traffic Counts - A Literature Survey. Technical report, IASA, Laxenburg, Austria, 1998. 27 p.
20. Willumsen L. G. Estimation of OD matrix from traffic counts – A review. Working Paper. Inst. Transp. Stud. Univ. Leeds. 1978.
21. Доля К. В. Формализация гравитационной модели для расчета параметров междугородних пассажирских корреспонденций / К. В. Доля // Наука и техника. 2017. Т. 16, №5. С. 437 – 443. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-437-443.
22. Нурминский Е. А. Определение пассажиропотоков в региональной транспортной системе на основе модифицированных гравитационных моделей / Е. А. Нурминский, И. Н. Пугачев, Н. Б. Шамрай, В. Н. Седюкевич // Наука и техника. 2015. № 5. С. 39–45.
23. Горбачев П. Ф., Крикун В. И. Моделирование спроса на перевозку пассажиров в пригородном общении // ВЕЖПТ. 2013. № 3(62). С. 12–15.
24. Koppelman Franz S. and Hirsh, Moshe. (1984). *Intercity Travel Choice Behavior: Theory and Empirical Analysis*. Proceedings, Fifth International Conference on Travel Behavior, Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, Aix-en-Provence, France, 1991. pp. 227-244.
25. Brand, Daniel, et al. (1992). Forecasting High-Speed Rail Ridership. *Transportation Research Record*. 1992; No. 1341:12 – 18.
26. Peers, John B. and Bevilacqua, Michael, Alan M. Voorhees and Associates, Inc. (1976). *Structural Travel Demand Models: An intercity Application*. *Transportation Research Record*. No. 569. 124-135p.
27. Lu, M., Zhu, H., Luo, X., & Lei, L. (2015). Intercity travel demand analysis model. *Advances in Mechanical Engineering*, 6. <https://doi.org/10.1155/2014/108180>
28. Chistyakov A., Koryagin M. Interurban Travel Mode Choice Model Which Based on Departures Frequency and Passengers' Preferences. *International Scientific Siberian Transport Forum*. Springer, Cham, 2021. P. 964-973.

REFERENCES

1. Woldeamanuel M. Evaluating the competitiveness of intercity buses in terms of sustainability indicators. *Journal of Public Transportation*. 2012; Vol. 15, No. 3: 5.
2. Ortuzar J. D. Modelling transport / J. D. Ortuzar, L. G. Willumsen. John Wiley & Sons, 2011. 586 p. URL: DOI:10.1002/9781119993308.
3. Shherbakov L. M. Jefferktivnost' mezhdugorodnyh avtobusnyh perezovok v uslovijah funkcionirovaniya ryn-ka transportnyh uslug [Efficiency of intercity bus transportation in the context of the transport services

market]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011; 3 (50): 63–65. (in Russ.)

4. Javid R., and E. Sadeghvaziri. Investigating the Relationship Between Access to Intercity Bus Transportation and Equity. *Transportation Research Record*, 2022, p. 03611981221088218.

5. Group K. Effective Approaches to Meeting Rural Intercity Bus Transportation Needs. Report 79, Transit Cooperative Research Program. *Transportation Research Board*, National Research Council, Washington, D.C., 2002. 184 p.

6. Nielsen G., Lange T. Network design for public transport success—theory and examples. Norwegian Ministry of Transport and Communications, Oslo, 2008. 30 p.

7. Ryan F., Allard R. F., and Moura F., The Incorporation of Passenger Connectivity and Intermodal Considerations in Intercity Transport Planning, *Transport Reviews*, 2015, <http://dx.doi.org/10.1080/01441647.2015.1059379>

8. Korjagin M. E., Chistjakov A. S. Baza dannyh dlja opisaniya rynka mezhdugorodnyh passazhirskih pere-vozok [Long Distance Passenger Market Description Database]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija*. 2021; 1(56): 38–45. DOI 10.52170/1815-9262-2021-56-38. (in Russ.)

9. Makarova E. A., Elizarov S. B., Muktepavel S. V. Avtomatizirovannaja sistema prognozirovanija passazhirskih transportnyh potokov na baze ASU «Jekspress» [Automated system for forecasting passenger traffic flows based on ACS “Ex-press”]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta*. 2011; 4: 21–27. (in Russ.)

10. Alderighi M., Cento, A., Nijkamp, P., & Rietveld, P. Network competition – the coexistence of hub-and-spoke and point-to-point systems. *Journal of Air Transport Management*. 2005; 11(5): 328–334. doi:10.1016/j.jairtraman.2005.07.006

11. Alderighi M., Feder C, Nijkamp P, Ungureanu E I Simple pricing rules in complex air transport systems. *Handbook on Entropy, Complexity and Spatial Dynamics: A Rebirth of Theory?* Chapter 18. 2021: pp. 304 – 320 doi: 10.4337/9781839100598.00027

12. Merrina A., Sparavigna, A., & Wolf, R. A. The intermodal networks: A survey on intermodalism. *World Review of Intermodal Transport Research*. 2007; 1(3): 286–299.

13. Ranjbari A., Hickman M., Chiu YC. A Mathematical Optimization Model for Solving the Intercity Transit Network Design Problem // CASPT 2018 Extended Abstract. Available at: http://www.caspt.org/wp-content/uploads/2018/10/Papers/CASPT_2018_paper_128.pdf. (accessed: 22.05.2023)

14. Sunhyung Yoo, Jinwoo Brian Lee, and Hoon Han. A reinforcement learning approach for bus network design and frequency setting optimization. *Public Transport*. 2023: pp 1–32. /doi.org/10.1007/s12469-022-00319-y

15. Ibarra-Rojas, O., J., Delgado, R. Giesen, and J.C. Muñoz Planning, Operation, and Control of Bus

Transport Systems: A Literature Review. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2015; 77: 38-75. DOI: 10.1016/j.trb.2015.03.002.

16. Jingxu Chen, Zhiyuan Liu, Senlai Zhu, Wei Wang. Design of limited-stop bus service with capacity constraint and stochastic travel time // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2015; Volume 83: 1-15. doi.org/10.1016/j.tre.2015.08.007

17. Casey H. J. (1955) Applications to traffic engineering of the law of retail gravitation. *Traffic Quarterly* IX. 1995: 23–35.

18. Erlander S. and Stewart N.F. (1990) The Gravity Model in Transportation Analysis: Theory and Extensions. VSP, Utrecht.

29. Abrahamsson T. Estimation of Origin-Destination Matrices Using Traffic Counts - A Literature Survey. Technical report, IIASA, Laxenburg, Austria, 1998. 27 p.

20. Willumsen L. G. Estimation of OD matrix from traffic counts – A review. Working Paper. Inst. Transp. Stud. Univ. Leeds. 1978.

21. Dolja K. V. Formalization for Parameter Calculation of Intercity Passenger Transport Correspondence. *Nauka i tehnika*. 2017; T. 16, no 5: 437 – 443. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-437-443. (in Russ.)

22. Nurminskij E. A., Pugachev I. N., Shamraj N. B., Sedjukevich V. N. Opređenje passazhiropotokov v regional'noj transportnoj sisteme na osnove modifitsirovannyh gravitacionnyh modelej [Determination of passenger traffic in the regional transport system on the basis of modified gravital models]. *Nauka i tehnika*. 2015; 5. 2015: 39 – 45. (in Russ.)

23. Gorbachev P. F., Krikun V. I. Modelirovanie sprosa na perevozku passazhirov v prigorodnom soobshhenii [Modeling Demand for Commuter Transportation]. *VEZhPT*. 2013; 3(62):12–15. (in Russ.)

24. Koppelman Franz S. and Hirsh, Moshe. (1984). Intercity Travel Choice Behavior: Theory and Empirical Analysis. *Proceedings, Fifth International Conference on Travel Behavior*, Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, Aix-en-Provence, France, 1991. pp. 227-244.

25. Brand, Daniel, et al. (1992). Forecasting High-Speed Rail Ridership. *Transportation Research Record*. 1992; No. 1341:12 – 18.

26. Peers, John B. and Bevilacqua, Michael, Alan M. Voorhees and Associates, Inc. (1976). *Structural Travel Demand Models: An intercity Application*. *Transportation Research Record*. No. 569. 124 – 135 p.

27. Lu, M., Zhu, H., Luo, X., & Lei, L. (2015). Intercity travel demand analysis model. *Advances in Mechanical Engineering*, 6. <https://doi.org/10.1155/2014/108180>

28. Chistyakov A., Koryagin M. Interurban Travel Mode Choice Model Which Based on Departures Frequency and Passengers' Preferences. *International Scientific Siberian Transport Forum*. Springer, Cham, 2021. P. 964 – 973.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Фадеев А. И. Постановка задачи, разработка математической модели планирования перевозок по междугородной регулярной автобусной линии, программное обеспечение, формулирование заключения.

Ильянков А. М. Участие в подготовке исходных данных и расчетах, обзор литературных источников.

COAUTHORS' CONTRIBUTION STATEMENT

Aleksandr I. Fadeyev. Problem statement, mathematical model of transportation planning on an intercity regular bus line, software development, conclusion statement.

Aleksei M. Ilyankov. Participation in the preparation of initial data and calculations, review of literary sources.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фадеев Александр Иванович – д-р техн. наук, проф. кафедры транспорта, SPIN-код: 1304-7849.

Ильянков Алексей Михайлович – 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.

**РАЗДЕЛ III.
СТРОИТЕЛЬСТВО
И АРХИТЕКТУРА**



**PART III.
CONSTRUCTION
AND ARCHITECTURE**

Научная статья
УДК 625.712
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-650-669>
EDN: JICWGS



КЛАССИФИКАЦИЯ УЧАСТКОВ ДОРОГ ПО СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ К ОБРАЗОВАНИЮ КОЛЕИ ИЗНОСА

А. С. Александров, Т. В. Семенова*, Д. Ю. Раскошный

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

aleksandrov00@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>
sibadisemenova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1921-8531>
denis1999-09@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0004-3443-1025>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Интенсификация автомобилизации населения России привела к существенному увеличению количества легковых автомобилей, которые во многих регионах снабжаются шипованными шинами на зимний период. Это обстоятельство привело к масштабному появлению определенного вида колеи, обусловленной износом асфальтобетонного покрытия от действия шипованных шин и абразивных материалов, применяемых для борьбы с зимней скользкостью. Колея, образующаяся на поверхности дорожных покрытий, имеет комплексный характер и включает в себя три вида колеи: структурную, колею сдвига и колею износа. Вклад каждого вида колеи в общую глубину комплексной колеи различен и зависит от характеристик транспортных нагрузок, свойств материала покрытия и погодных-климатических факторов.

Материалы и методы. Колея износа образуется в зимний период от воздействия шипованных шин, а на ее глубину влияет множество факторов: режим и интенсивность движения автомобилей с шипованными шинами, тип шипов, их количество на шине, величина выступа рабочей вставки шипа, свойства асфальтобетонного покрытия, погодных-климатических факторы, а также мероприятия зимнего содержания дорог. На кривых малого радиуса, участках торможения или разгона, а также участках с обычным режимом движения автомобилей, горизонтальные нагрузки от шипованной шины различны. Это объясняется возникновением различных видов трения, а также зависимостью коэффициента сцепления шины с покрытием от скорости движения, которая на участках торможения и разгона является переменной. Вследствие этого на определенных участках вклад износа в глубину комплексной колеи больше, чем на участках с другим режимом движения. В статье проведено исследование по определению подверженности участков дорог с различным режимом движения к образованию колеи износа. Разработана методика вычисления различных составляющих комплексной колеи, обусловленной уплотнением и износом асфальтобетона покрытия, а также деформаций нижележащих слоев дорожной одежды и земляного полотна.

Результат. На основе данных экспериментов, выполненных на дорогах г. Омска, предложена классификация участков по степени опасности к образованию колеи износа, подразделяющая участки городских дорог на сильноизнашиваемые, изнашиваемые и слабоизнашиваемые. На основе анализа данных диагностики дорог, выполненных за последние пять лет, определены ориентировочные сроки службы покрытий до момента образования колеи глубиной 30 мм.

Обсуждение и заключение. Изложены представления авторов о влиянии трения и скорости движения на процесс колееобразования, обусловленного износом. Показано соответствие экспериментальных данных, полученных авторами статьи, с данными коллег, выполнявшими подобные исследования в России и за рубежом. Разъяснены уточнения, введенные авторами в общепринятые представления об износе асфальтобетонного покрытия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: колея, дорожное покрытие, износ дорожного покрытия, покрытие из асфальтобетона, классификация, шипованная шина

Статья поступила в редакцию 02.10.2023; одобрена после рецензирования 23.10.2023; принята к публикации 24.10.2023.

© Александров А. С., Семенова Т. В., Раскошный Д. Ю., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

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: Александров А.С., Семенова Т.В., Раскошный Д.Ю. Классификация участков дорог по степени опасности к образованию колеи износа // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 5 (93). С. 650-669. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-650-669>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-650-669>

EDN: JICWGS

CLASSIFICATION OF ROAD SECTIONS ACCORDING TO THE DEGREE OF DANGERTO THE FORMATION OF A WEAR TRACK

Anatoly S. Aleksandrov, Tatiana V. Semenova*, Denis Y. Raskoshny

Siberian State Automobile and Road University (SibADI)

Omsk, Russia

aleksandrov00@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>

sibadisemenova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1921-8531>

denis1999-09@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0004-3443-1025>

**corresponding author*

ABSTRACT

Introduction. The intensification of the motorization of the Russian population has led to a significant increase in the number of passenger cars, which in many regions are supplied with studded tires for the winter period. This circumstance led to the large-scale appearance of a certain type of ruts caused by the wear of asphalt concrete pavement from the action of studded tires and abrasive materials used to combat winter slipperiness. The track formed on the surface of road surfaces has a complex character and includes three types of tracks: structural, shear track and wear track. The contribution of each type of track to the total depth of the complex track is different and depends on the characteristics of transport loads, the properties of the coating material, and weather and climatic factors.

Materials and methods. The wear track is formed in winter from the impact of studded tires, and its depth is affected by many factors: the mode and intensity of movement of cars with studded tires, the type of spikes, their number on the tire, the size of the protrusion of the working insert of the spike, the properties of asphalt concrete pavement, weather and climatic factors, as well as winter road maintenance measures. On curves of a small radius, braking or acceleration sections, as well as sections with a normal mode of movement of cars, the horizontal loads from the studded tire are different. This is due to the occurrence of various types of friction, as well as the dependence of the coefficient of adhesion of the coated tire on the speed of movement, which is variable in the braking and acceleration sections. As a result, in certain areas, the contribution of wear to the depth of the complex track is greater than in areas with a different driving mode. In the article, a study was conducted to determine the susceptibility of road sections with different traffic modes to the formation of wear ruts. A method has been developed for calculating various components of the complex trackage caused by compaction and wear of the asphalt concrete coating, as well as deformations of the underlying layers of the pavement and the roadbed.

Result. Based on the data of experiments carried out on the roads of Omsk, a classification of sections according to the degree of danger to the formation of a wear track is proposed, dividing sections of urban roads into heavily worn, worn and weakly worn. Based on the analysis of data from road diagnostics performed over the past five years, the approximate service life of the coatings until the formation of a 30 mm deep track has been determined.

Discussion and conclusion. The authors' ideas about the influence of friction and the speed of movement on the process of track formation caused by wear are presented. The correspondence of the experimental data obtained by the authors of the article with the data of colleagues who performed similar studies in Russia and abroad is shown. Clarifications introduced by the authors into the generally accepted ideas about asphalt wear are explained.

© Aleksandrov A. S., Semenova T. V., Raskoshny D. Y., 2023



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

KEYWORDS: *track, road surface, road surface wear, asphalt pavement, classification, studded tire*

The article was submitted 02.10.2023; approved after reviewing 23.10.2023; accepted for publication 24.10.2023.

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. Anatoly S. Aleksandrov, Tatiana V. Semenova, Denis Y. Raskoshny Classification of road sections according to the degree of danger to the formation of a wear track. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2023; 20 (5): 650-669. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-650-669>

ВВЕДЕНИЕ

Колеи, формирующиеся на поверхности дорожных покрытий, являются одним из наиболее распространенных дефектов дорожных одежд нежесткого типа, оказывающим негативное влияние на потребительские свойства автомобильной дороги, прежде всего, безопасность движения. В колею скапливается дождевая вода, вследствие чего происходит уменьшение коэффициента сцепления шины с покрытием [1, 2]. Водители, совершая маневр обгона, выезжают из колеи, а затем возвращаются в нее. В моменты выезда и въезда колеса в колею происходит динамическое воздействие шины с покрытием, результатом которого является появление динамических усилий, зависящих как от глубины колеи, так и скорости движения [3, 4, 5, 6, 7]. Динамическое взаимодействие колеи и колеса автомобиля негативно влияет на состояние ходовой части автомобиля и способствует повышению напряженно-деформированного состояния покрытия дороги. В результате межремонтные сроки дорожного покрытия и ходовой части автомобиля уменьшаются.

В настоящее время известны результаты многочисленных экспериментальных работ, выполненных на эксплуатируемых дорогах и испытательных стендах, благодаря которым удалось произвести классификацию колеи по основной причине их образования [1, 8, 9, 10, 11]. В результате установлено, что колея является комплексным процессом, обусловленным влиянием различных видов деформаций. На рисунке 1 приведены основные типы колеи, образующиеся на асфальтобетонном покрытии [12].

Рассматривая причины образования колеи, показанных на рисунке 1, отметим, что они имеют как общие черты, так и отличия. Структурная колеинность, показанная на рисунке 1, а, образуется в результате остаточных деформаций, накапливаемых во всех слоях дорожной одежды и грунте земляного полотна [1, 11, 12]. В процессе накопления остаточ-

ных деформаций возникают как деформации уплотнения, обусловленные, прежде всего, шаровой компонентой тензора напряжений, так и деформации сдвига, величина которых зависит от значения девиатора напряжений. Поэтому основной причиной образования структурной колеинности на асфальтобетонных покрытиях считают деформации уплотнения материалов или их комбинацию с деформациями сдвига [13, 14, 15], причем в данном типе колеи деформации сдвига относительно небольшие. Кроме того, щебеночные материалы подвержены измельчению, приводящему к изменению зернового состава с последующей переупаковкой частиц. В дорожных одеждах с усовершенствованным асфальтобетонным покрытием деформации, связанные с уплотнением материала и изменением гранулометрического состава зернистых материалов, в основном происходят в слоях основания и земляном полотне. Поэтому структурная колея является глубинной. Структурная колеинность формируется на дорогах всех регионов РФ.

Колея сдвига формируется быстро, она является следствием превышения девиатором напряжений предельного сопротивления сдвигу материала слоя. Такие колеи глубокие, они, как правило, сопровождаются боковыми выпорами. Но в правильно запроектированных дорожных одеждах появление колеи сдвига связывают либо с высокой температурой нагрева асфальтобетона, либо с повышенной дозировкой битумного вяжущего [6, 16, 17]. Таким образом, сдвиговая колеинность на асфальтобетонном покрытии является следствием брака, допущенного либо при содержании дороги (несвоевременно принятых мерах по снижению температуры покрытия, например, несвоевременный полив нагретого покрытия холодной водой), либо при приготовлении асфальтобетонной смеси (избыток вяжущего сверх рецептурного количества). Колея сдвига в основном характерна для южных регионов России.

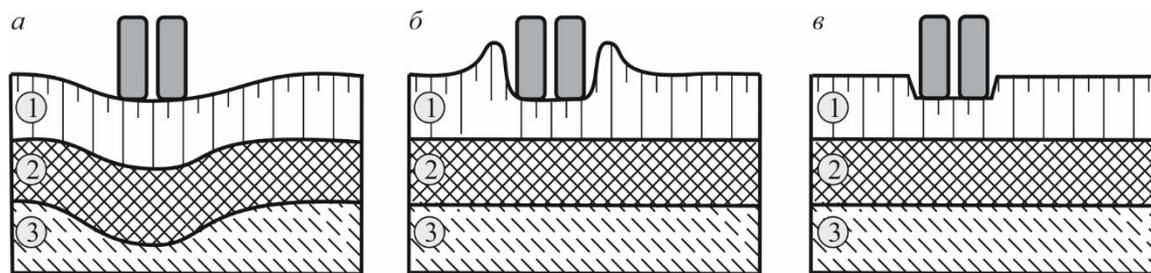


Рисунок 1 – Колеи на асфальтобетонном покрытии [12]:
а – структурная колея; б – колея сдвига; в – колея износа;
1 – асфальтобетонные слои; 2 – слои основания; 3 – рабочий слой земляного полотна

Figure 1 – Rut on asphalt concrete pavement [12]:
a) structural rut; б) shear rut; в) wear rut;
1 – asphalt concrete layers; 2 – base layers; 3 – working layer of the roadbed.

Третий тип колееобразования связан с износом асфальтобетонных покрытий. В настоящее время такой тип колейности превратился в бич для дорог и улиц городов России, расположенных в районах с продолжительным зимним периодом [1, 8, 18, 19]. В течение зимнего периода водители снабжают легковые автомобили шипованными шинами, а дорожные службы в целях борьбы с зимней скользкостью используют пескосоляные смеси. Действие шипов является главной причиной износа асфальтобетонного покрытия, но величина износа зависит от режима, скорости и интенсивности движения автомобилей на шипованных шинах, величины, выступающей из покрывки, части шипа, количества шипов на покрывке и т.д. Пескосоляные смеси, применяемые при борьбе с зимней скользкостью, содержат песок, который после таяния снежно-ледяных отложений работает как абразив, способствуя интенсификации износа асфальтобетона.

Экспериментальные работы по исследованию причин образования и интенсивности развития колеи износа начаты в 60–70-х годах прошлого века, они проведены за рубежом [20, 21, 22]. Необходимость этих исследований была продиктована введением в эксплуатацию шипованных шин. По данным работы J.H Keyser [21], использование шипованных шин в Швеции начато в 1959 г., а через 2-3 года некоторые участки дорог были настолько изношены, что на дне колеи наблюдали поверхность материала нижележащего слоя, подстилающего верхний слой покрытия. В работе [21] J.H Keyser сообщает, что износ на автомагистралях с интенсивным движением колеблется от $\frac{1}{4}$ до $\frac{3}{4}$ дюйма. Такое катастро-

фическое положение привело к тому, что подрядчики и дорожные строители перестали гарантировать срок службы покрытий в течение периода, превышающего 2 года. Отсюда следует, что интенсивное движение на городских магистральных улицах существенно влияет на износ покрытия, тем самым уменьшая его срок службы.

В то время за рубежом уровень автомобилизации населения был высок, а доля легковых автомобилей с шипованными шинами составляла до 80% [20, 21]. В нашей стране (бывшем СССР) надобности в таких исследованиях не было, вследствие того что в 1970 г. среднее по стране количество легковых автомобилей составляло 5,1 ед. на 1000 чел. населения, а значительная часть территории государства находилась в районах РСФСР и союзных республиках с теплым климатом. В современной России уровень автомобилизации населения значительно возрос и, по данным Роскомстата, в 2022 г. в среднем по стране составил 326,9 легковых автомобилей на 1000 чел. Поэтому начало российских исследований колеи износа приходится на 21 век, а интенсификация экспериментов датируется прошлым и настоящим десятилетием [1, 8, 18, 19]. В связи с этим в основе обзора используем литературу различной датировки, тем самым отдавая дань уважения труду пионеров [20, 21, 22] и их последователей.

В практике исследования процесса износа асфальтобетонного покрытия эксперименты выполняются как в лаборатории на малых кольцевых стендах, так и на эксплуатируемых дорогах, а также на специально построенных опытных участках, подобных петлевому

натурному стенду ассоциации AASHTO¹. На этом петлевом стенде AASHTO J.E. Burke и L.J. McKenzie выполнили эксперименты [20] по изучению влияния режимов движения на начальный, наиболее интенсивный, этап износа асфальтобетонного и цементобетонного покрытия. В своих экспериментах авторы работы [20] исследовали влияние на износ покрытий движения как с постоянной небольшой скоростью, так и с переменной, характеризующейся положительным и отрицательным ускорением.

На рисунке 2 приведены иллюстрации изменения асфальтобетонной поверхности по мере увеличения числа воздействий шипованной шины автомобиля Chevrolet при различных режимах движения.

В результате экспериментов авторы работы [20] пришли к выводу, что наиболее опасными для износа покрытий являются режимы торможения и старта с места, особенно в тех случаях, когда водитель предпринимает меры к экстренной аварийной остановке или быстрому старту с места, то есть, как говорят, педаль тормоза или акселератора «в пол». Наименее опасным режимом движения является постоянная скорость, в данном эксперименте она была невелика и составляла 40,2 км/ч. Результаты испытаний, выполненные на эксплуатируемых дорогах [9, 23], подтверждают этот вывод. Коллектив авторов в работе [9] сообщает, что скорость движения оказывает существенное влияние на износ асфальтобетонного покрытия, но высокая интенсивность изнашивания присуща движению с большими линейными скоростями 110 км/ч и выше, а при скорости 90 км/ч интенсивность износа в 2 раза уменьшается. Это можно объяснить возникновением больших динамических усилий от шипованной шины, вращающейся на колесе с высокой угловой скоростью, которая приводит к увеличению скорости в точке соударения тел (шипа и покрытия). Аналогичный вывод сделан авторами работы [18], указавшими, что на крайних левых полосах движения Московской кольцевой автомобильной дороги (МКАД), на которых происходит интенсивное движение легковых автомобилей со средней скоростью 120 км/ч, колея образуется раньше, чем на других полосах движения.

Результаты экспериментов, выполненные специалистами МАДИ на универсальном комплексе для испытания дорожных одежд

КУИДМ-2 [8], показали, что при движении шипованной шины со скоростью 80 км/ч износ покрытия из щебеночно-мастичного асфальтобетона ЩМА-20 значительно больше (в 2 и более раза), по сравнению с его износом от стандартной шины. Тем не менее отметим, что комплекс КУИДМ-2 является кольцевым стендом, имитирующим движение по окружности диаметром 30 м, что отличает условия движения имитатора от реальных условий движения легкового транспорта.

Отличие условий движения имитаторов по кольцевым стендам от условий движения транспорта по дорогам побудило исследователей выполнять эксперименты на эксплуатируемых участках. Такие эксперименты проведены в работах [1, 18, 19]. В работе [19] выполнено исследование образования колеи износа на криволинейных участках дорог г. Самары. В этой работе интересна фиксация колеи износа на кривой малого радиуса. Интерес обусловлен тем, что колея сосредоточена криволинейного участка, а до начала и после кривой колеи нет. Аналогичные данные получены нами в работе [1]. Отсюда следует, что кривые малого радиуса создают наиболее опасные условия движения для образования колеи износа. Это уточняет данные работ зарубежных специалистов [20], в которых наиболее опасным режимом движения считается торможение и набора скорости.

Эксперименты по определению износа асфальтобетонных покрытий, выполненные на различных участках дорог с разными режимами движения, привели к выводу, что режим движения обуславливает контактное взаимодействие шипа с дорожным покрытием, а значит, и величину износа. Тем не менее авторы работы [21] пришли к выводу, что данные о степени опасности различных режимов движения автомобилей с шипованными шинами к образованию и развитию колеи износа могут быть не точными, а подчас противоречивыми. В подтверждении этого вывода в работе [21] приводятся данные разных исследований, в которых сравниваются глубины колеи износа на участках замедления и набора скорости.

При этом в одних работах установлено, что глубина колеи износа на участках торможения всегда больше, чем на участках разгона.

¹ AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials (Американская ассоциация государственных автомобильных дорог и транспорта).

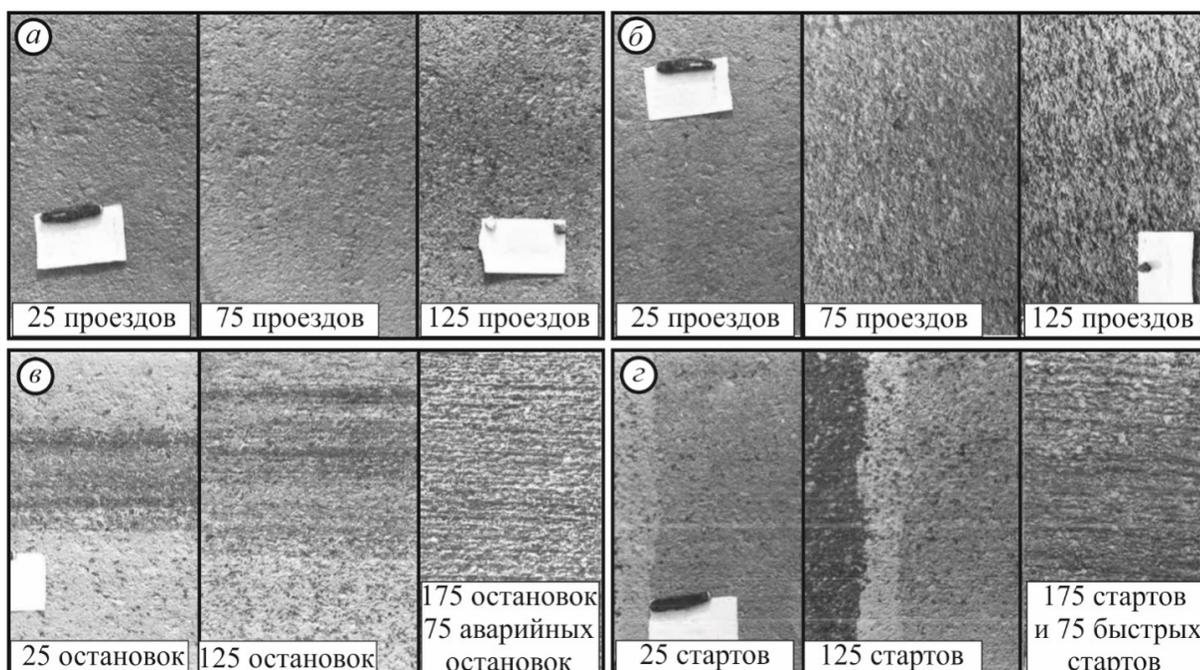


Рисунок 2 – Изменение поверхности асфальтобетонного покрытия в процессе увеличения числа воздействий шипованной шины при различных режимах движения [20]:
 а – постоянная скорость 25 миль/ч (40,2 км/ч); б – движение по кривой;
 в – остановки в обычном режиме и аварийные остановки; г – старты с места обычные и быстрые

Figure 2 – Changes in the surface of the asphalt concrete pavement in the process of increasing the number of impacts of the studded tire under different driving modes [20]:
 а) constant speed of 25 mph (40,2 km/h); б) movement along the curve;
 в) stops in the reverse mode and emergency stops; г) shift starts are normal and fast.

Однако при более детальном изучении материалов экспериментальных работ выяснилось, что режим движения на участках разгона характеризовался положительным ускорением 1,5–3,0 м/с, а отрицательное ускорение на участках торможения составляло 3,0–4,6 м/с. В этом случае действие шипов на участке торможения было более агрессивным. В других работах выводы были противоположные, в них более опасным режимом движения считался участок разгона.

Отсюда следует, что глубина колеи износа в пределах участков торможения и разгона зависит от стиля вождения автомобиля, присутствующего пользователям отдельно взятой дороги. На одних дорогах водители плавно набирают скорость, а тормозят более резко. В этом случае участок торможения изнашивается раньше участка разгона. На других дорогах, наоборот, водители постепенно сбрасывают скорость, а стартуют с места более резко. В этом случае износ на участке разгона больше, чем на участке торможения. Это свидетельствует о необходимости изучения процесса изнашивания покрытий в каждом городе и поселении, что позволит учесть специфику вождения ав-

томобилей населением этого района города или поселка.

Учитывая результаты работ предшественников, целью настоящей работы является разработка классификации участков дорог с асфальтобетонным покрытием по степени опасности к формированию колеи износа. При этом необходимо решить следующие задачи:

- разработать методику определения величины износа асфальтобетонного покрытия, позволяющую отделить глубину колеи, обусловленную этим процессом, от глубины колеи, возникновение которой обусловлено уплотнением асфальтобетона и деформированием нижележащих слоев дорожной одежды и земляного полотна;

- на основе решения первой задачи дать рекомендации по выделению в пределах диагностируемого участка дороги под участки, в пределах которых износ покрытия является преобладающей причиной образования колеи;

- произвести классификацию участков дорог с различными режимами движения, но при скоростях характерных для городских дорог (не более 80 км/ч), по степени опасности к формированию колеи износа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Определение участков сосредоточения колеи износа выполняется на основе результатов диагностики автомобильной дороги и детальных обследований, выделенных участков. В первую очередь по данным измерений глубины колеи необходимо выделить участки, в пределах которых глубина колеи наибольшая. Для этого в камеральных условиях анализируют ведомость измерений, находя в

ней участки, в пределах которых глубина колеи возрастает, достигая максимума, а затем уменьшается, приобретая значения, характерные для основного протяжения дороги. Рассмотрим данные таблицы 1, в которой приведены глубины колеи, измеренные на покрытии толщиной 5 см из ЩМА 16 магистральной улицы общегородского значения Красный Путь г. Омск на участке подходов к пересечению с улицы Кемеровская.

Таблица 1
Ведомость измерения глубины колеи в прямом направлении движения на покрытии магистральной улицы Красный Путь на участке подхода к пересечению с улицы Кемеровская
Источник: составлено авторами.

Table 1
The statement of measuring the depth of the track in the forward direction of movement along the highway «Red Way» on the site of the approach to the intersection with the street «Kemerovskaya»
Source: compiled by the authors.

Расстояние до пересечения, м	Глубина колеи по полосам движения в прямом направлении, мм							
	Полоса 1 (левая)		Полоса 2		Полоса 3		Полоса 4 (правая)	
	внутренняя	внешняя	внутренняя	внешняя	внутренняя	внешняя	внутренняя	внешняя
200	18	18	22	23	11	10	10	10
180	19	20	23	23	12	12	9	10
160	22	22	25	24	11	11	9	9
140	26	27	28	28	11	12	10	9
120	30	30	32	31	12	11	9	10
100	34	33	35	36	14	14	9	9
80	40	40	42	42	20	21	9	10
60	46	45	50	51	24	25	14	15
40	53	51	58	58	31	30	20	20
20	48	47	53	54	33	32	26	25
10	44	42	48	50	28	29	28	29
0	38	36	42	44	23	22	30	31
-10	36	35	42	42	21	21	25*	26*
-20	34	32	40	39	19	18	20*	19*
-40	28	27	32	31	12	10	16*	15*
-60	21	20	23	24	11	11	7*	8*
-80	15	15	17	18	10	11	7*	7*
-100	14	14	17	16	10	9	6*	7*
-120	15	14	16	17	9	9	-	-
-140	13	15	18	18	9	9	-	-
-160	14	14	18	17	9	10	-	-
-180	15	15	16	16	10	10	-	-
-200	18	18	22	23	11	10	10	10

Примечание: 1. Положительные значения расстояний соответствуют участкам торможения транспортных средств, расположенных перед стоп-линией (участок 200–20 м), а также участкам стартов с места (участок 20–0 м); 2. Отрицательные значения расстояний соответствуют участкам набора скорости (участок от 0 м до -80 м) и участкам движения с постоянной скоростью (участок от -80 м до -200 м); 3. Глубины колеи, с верхним индексом «*» измерены по ул. Кемеровская по ходу движения транспорта, совершившего маневр правого поворота; 4. Внешней и внутренней колеей названы колеи, образовавшиеся от колес по внешнему и внутреннему бортам транспортных средств.

Таблица 2
Интенсивность движения легковых автомобилей
по полосам движения магистральной улицы Красный Путь
Источник: составлено авторами.

Table 2
The intensity of passenger car traffic along the lanes of the main street «Red Way»
Source: compiled by the authors.

Направление движения	Интенсивность движения легковых автомобилей по полосам движения, авт./сут			
	Полоса 1 (левая)	Полоса 2	Полоса 3	Полоса 4 (правая)
Прямое в направлении к ул. Кемеровская	9280	10230	7940	1460
Обратное в направлении от ул. Кемеровская	8990	10040	7550	890

Примечание: в таблице приведены математические ожидания интенсивности движения, принятые с точностью до 10 авт./сут, по результатам статистической обработки выборок из 62 наблюдений.

В таблице 1 обычным шрифтом выделены глубины колеи, образовавшихся на участках с постоянной скоростью движения. На таких участках глубина колеи имеет наименьшие практически не изменяющиеся значения. На участках торможения, расположенных в пределах подходов к местам остановки транспортных средств, глубина колеи увеличивается, достигая максимальных значений в пределах участка остановки автомобилей, совершаемой в целях ожидания разрешающего сигнала светофора. За участком остановки следует участок набора скорости, на котором глубина колеи уменьшается до значений, соответствующих участкам движения с постоянной наибольшей скоростью. В пределах указанных участков торможения, остановки и разгона глубина колеи больше, чем на участке движения с постоянной скоростью. Значения глубин колеи, образовавшихся на таких участках, в таблице 1 выделены подчеркиванием. Магистральная ул. Красный Путь в пределах пересечения с улицей Кемеровская имеет четыре полосы движения, из которых крайняя правая полоса предназначена для поворота «направо», а другие полосы предназначены для движения «прямо». Интенсивность движения на полосах различная, на крайней правой полосе она минимальная, а на второй от оси дороги полосе движения интенсивность наибольшая. Движение легковых автомобилей, осуществляющих поездку, прямо сконцентрировано на первой и второй полосе от оси магистрали, а на третьей полосе преимущественно движется общественный и грузовой транспорт, а также наименьшая часть легковых автомобилей, выполняющих маневр «перестроения», или готовящихся к такому маневру. В таблице 2 приведена интенсивность движения легковых автомобилей по полосам

движения магистральной улицы общегородского значения Красный Путь.

Влияние интенсивности движения легковых автомобилей на глубину колеи прослеживается из таблицы 1. На первых двух от оси дороги полосах движения глубина колеи и ее протяженность больше, чем на двух других. Для более подробного пояснения сказанного, на рисунке 3 представлена иллюстрация перекрестка с обозначенными режимами движения транспорта.

Из анализа данных таблицы 1 следует, что глубина колеи на участках с постоянной скоростью движения составляет 14–15 мм и 16–18 мм на двух первых от оси дороги полосах движения, 9–10 мм на других полосах движения. На участках торможения, остановки и набора скорости глубина колеи возрастает, достигая значений в три раза превышающих глубины колеи на основном протяжении магистрали. Значит, на этих участках появился дополнительный фактор, влияющий на увеличение глубины колеи. Поэтому такие участки дороги следует принять к детальному обследованию, на основе которого необходимо определить глубину колеи, обусловленную износом покрытия, тем самым отделив ее от глубины колеи, сформированной по другим причинам.

При детальном обследовании на участках с глубокой колеей необходимо выделить поперечники, из которых в последствии будут отобраны пробы. В пределах каждого поперечника измеряют глубину колеи и отбирают как минимум две пробы асфальтобетона. Одну пробу берут из точки отбора, расположенной на дне колеи, а второй образец отбирают между колеи, ровно посередине между внешней и внутренней колеей.

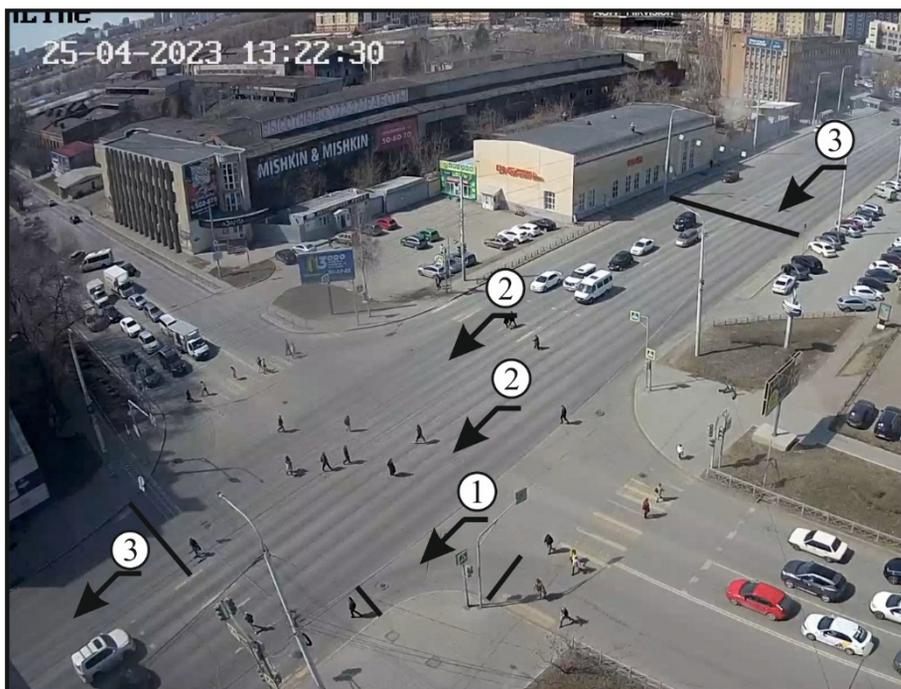


Рисунок 3 – Иллюстрация перекрестка магистральных улиц Красный Путь и Кемеровская:
 1 – участок поворота автомобилей по кривой малого радиуса; 2 – участки торможения, остановки автомобиля с последующим стартом с места и набором скорости до 20 км/ч;
 3 – участок разгона от 20 до 60 (80) км/ч
 Источник: составлено авторами.

Figure3 – Illustration of the intersection of main streets «Red Way» and «Kemerovskaya»:
 1 – a section of turning cars along a small radius curve; 2 – sections of braking, stopping the car, followed by starting from the spot and gaining speed up to 20 km/h;
 3 – acceleration section from 20 to 60 (80) km/h
 Source: compiled by the authors.

Второй образец нужен для сравнения, он является эталоном, вследствие того, что по сечению расположенном между колеи проезжает малое количество автомобилей. Иллюстрации работ, выполняемых при детальном обследовании колеи износа приведены на рисунке 4.

Детальное обследование начинают с определения поперечного сечения дороги, из которого необходимо отобрать образцы асфальтобетона. Для этого выполняют измерение глубин внешней и внутренней колеи, принимая за расчетное значение *RD* наибольшую величину. На участках с колеей малой протяженности, например, формирующихся на кривой малого радиуса, выбирают один поперечник с максимальной глубиной внутренней или внешней колеи *RD*. На участках с большой протяженностью колеи можно назначить несколько расчетных поперечников, разместив их в створах, в которых глубина колеи отличается от предыдущего створа на 5–10%. Иллю-

страция выполненного нами измерения глубины колеи, имеющей протяженность 30,2 м на пересечении улиц 1-я Чередовая и Невского, показана на рисунке 4, а. Измерениями установлено, что наибольшее значение глубины имеет внутренняя колея в поперечном профиле по ул. 1-я Чередовая, расположенном на расстоянии 4,58 м от точки пересечения осей. Через установленную точку разбивают поперечный профиль. После этого измеряют ширину колеи, сопоставляя ее значение с размерами шин, применяемым на легковом и грузопассажирском транспорте. Такое сравнение полезно для предварительного вывода о вкладе износа в общую глубину колеи. В тех случаях, когда ширина колеи приблизительно равна ширине беговой дорожки шины легкового транспорта, можно полагать, что вклад износа в глубину колеи достаточно велик. Помимо измерения ширины колеи необходимо установить наличие боковых выпоров, которые располагаются вдоль колеи.



Рисунок 4 – Иллюстрация работ при детальном обследовании износа:
 а – измерение глубины колеи под 2-метровой рейкой;
 б – высверливание кернов со дна внутренней колеи; в – отбор кернов из колеи и между колеи;
 г – иллюстрации различий поверхностей кернов, взятых из колеи и между колеи
 Источник: составлено авторами.

Figure4 – Illustration of the work during a detailed inspection of wear:
 a) measurement of the depth of the track under a 2-meter rail; б) drilling of cores from the bottom of the inner track;
 в) selection of cores from the track and between the tracks;
 г) illustrations of the differences between the surfaces of cores taken from the track and between the track
 Source: compiled by the authors.

Если выпоров нет, то это свидетельствует об отсутствии деформаций сдвига как в асфальтобетоне, так и в слоях основания, и земляном полотне. Это значит, что возникновение комплексной колеи обусловлено структурной колеиностью и колеей износа. В данном случае необходимо определить вклад структурной колеиности и колеи износа в общую глубину колеи, измеренную в данной точке расчетного поперечного профиля.

При обнаружении боковых выпоров целесообразно установить их ширину и пологость. Результаты такой оценки позволят сделать ориентировочное предположение о глубине

залегания зоны сдвига. Чем шире боковой выпор и больше пологость его вершины, тем глубже расположена линия скольжения, по которой произошел сдвиг. Такой сдвиг может произойти как в слое основания дорожной одежды из зернистого материала (встречается чаще), так и в подстилающем грунте земляного полотна (встречается реже). Узкие боковые выпоры говорят о сдвиге в асфальтобетонном покрытии и основании. Для наглядности наших рассуждений приведены на рисунке 5 иллюстрации деформированных слоев дорожной одежды, сфотографированные из траншей, открытых перпендикулярно оси дороги [1, 24].

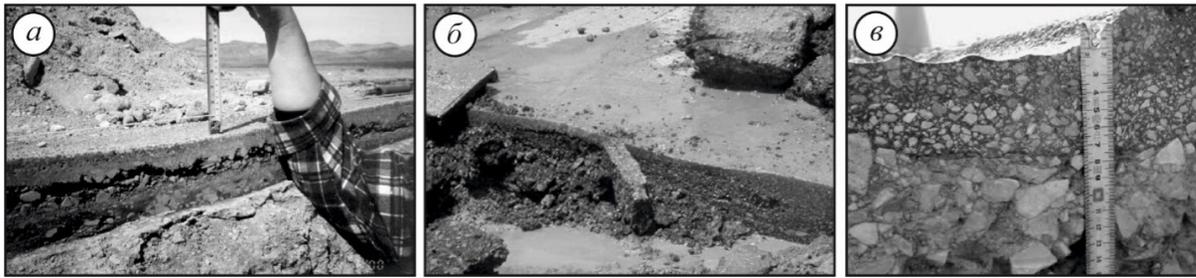


Рисунок 5 – Иллюстрация поперечных профилей колей [1, 24]:
 а – колея без бокового выпора, обусловленная деформированием слоев основания и земляного полотна; б – колея с широким пологим выпором, обусловленная сдвигом по зернистому материалу основания;
 в – колея с узким выпором, обусловленная сдвигом асфальтобетона в верхнем и нижнем слое покрытия

Figure 5 – Illustration of the transverse profiles of the tracks [1, 24]:
 a) track without lateral bulge, due to deformation of the layers of the base and the roadbed; б) track with a wide gentle bulge, due to a shift in the granular material of the base;
 в) track with a narrow bulge, due to the shift of asphalt concrete in the upper and lower layer of the coating.

Определение наличия деформации сдвига и местоположения линии скольжения является важным элементом предлагаемой нами методики определения вклада разных видов деформаций и износа в глубину колеи. Из анализа поперечного профиля колеи, показанной на рисунке 5, а, следует, что боковые выпоры отсутствуют, а наибольшее изменение толщины произошло в слое основания, подстилающем покрытие. На дне колеи толщина асфальтобетонного покрытия несколько меньше, чем в сечении между колеями. Поэтому уменьшение толщины асфальтобетонного покрытия можно определить разностью толщин кернов, взятых в двух разных точках одного и того же поперечника, а именно по оси колеи на ее дне и между колеями. Разность этих толщин определяет часть глубины колеи h_a , образовавшейся из-за износа и уплотнения асфальтобетона в верхнем слое. Вклад в глубину колеи деформаций нижележащих слоев определяется разностью общей глубины колеи, измерения которой показаны на рисунке 4, а, и найденной частью глубины колеи h_a . Таким образом, следуя нашим рассуждениям, для колеи, тип которых показан на рисунке 5, а, нужно из одного поперечника высверливать керны из двух точек, как показано на рисунке 4, б и рисунке 4, в. В целях определения вклада износа в общую глубину колеи основная причина которой состоит в деформации сдвига, произошедшей в основании дорожной одежды или земляном полотне, применяют аналогичную схему отбора образцов из двух точек поперечника. В этом случае определяем вклад износа покрытия в общую глубину колеи, а вклад деформации сдвига в основании или земляном полотне не определяем, но этот вклад учитывается глу-

биной колеи, обусловленной деформациями слоев, подстилающих покрытие. Колея, глубина которой в наибольшей степени обусловлена сдвигом верхнего слоя асфальтобетонного покрытия, требует иного подхода. Такая колея показана на рисунке 5, в. В этом случае в пределах поперечного профиля назначают три точки отбора. Две точки отбора назначаются как в первых двух случаях, то есть на дне колеи и между колеями. Третья точка принимается в этом же поперечнике, но в центральной части бокового выпора. По данным испытаний кернов, взятых из этой точки, оценивается вклад сдвига асфальтобетона в покрытие, в общую глубину колеи. Деформации сдвига по асфальтобетону не характерны для дорог г. Омска и Омской области. Такие колеи фиксируются на пунктах весового контроля, для которых характерна статическая нагрузка от тяжелых грузовых автомобилей и автопоездов. Деформации сдвига от таких нагрузок происходят в жару при нагреве покрытия до высоких температур. Появление деформаций сдвига в асфальтобетоне покрытия свидетельствует о необходимости замены материала на более сдвигоустойчивый. Такие деформации характерны для регионов России с теплым климатом, при котором число дней с твердыми атмосферными осадками невелико. Для борьбы с данным типом колеиности разрабатывают составы асфальтобетонной смеси с повышенной сопротивляемостью сдвигу [10]. Глубина колеи, обусловленных сдвигом асфальтобетона, сопровождающихся боковым выпором, велика, вследствие чего они недопустимы и должны быть ликвидированы в кратчайшие сроки. В силу этого обстоятельства вклад деформаций сдвига в глубину колеи нами не рассматривается.

После отбора кернов их очищают, омывая водой, при отсутствии дождя сушат на воздухе, как показано на рисунке 4, г, после чего нумеруют, упаковывают и транспортируют в лабораторию. При строительном контроле оценивают качество асфальтобетона и смеси, определяя показатели, регламентируемые стандартом, соответствующим типу асфальтобетона в обследуемом покрытии (обычно ГОСТ Р 58406.1–2020² или ГОСТ Р 58406.2–2020³, реже ГОСТ 9128–2013⁴). При обследовании колеи такие испытания тоже полезны, но не для определения вклада износа в глубину колеи, а для выявления возможных отклонений показателей свойств асфальтобетона от требований стандарта. Обнаруженные отклонения позволяют констатировать либо плохое качество строительства, либо факт ухудшения показателя в процессе эксплуатации. Например, накопление дефектов в структуре асфальтобетона увеличит водонасыщение, содержание воздушных пустот и одновременно с этим уменьшит коэффициент уплотнения, а также среднюю плотность.

В рассматриваемом нами методе в лаборатории необходимо определить среднюю плотность асфальтобетона в эталонных образцах $\rho_{срз}$, взятых между колеи, и аналогичную характеристику $\rho_{срк}$ образцов, отобранных со дна колеи. Керны, отобранные из этих двух точек, имеют одинаковые диаметры $D_э = D_к$ и радиусы $R_э = R_к$, но разные толщины (высоты) $H_э > H_к$. Причем, разность $H_э - H_к$ измеренных толщин асфальтобетона в кернах, взятых из разных точек, включает в себя сумму износа и деформации уплотнения. Для выделения из этой суммы составляющей, обусловленной уплотнением, используем закон сохранения массы и экспериментально установленные средние плотности $\rho_{срз}$ и $\rho_{срк}$. Используя геометрические характеристики образцов и их средние плотности, можно рассчитать массы эталонного керна и керна, масса которого обусловлена только деформацией уплотнения.

При определении массы эталонного керна $M_э$ будем использовать измеренные геометрические характеристики $R_э$ и $H_э$, а также среднюю плотность $\rho_{срз}$, определенную по данным лабораторных испытаний. В этом случае получим

$$M_э = \rho_{срз} \cdot H_э \cdot \pi \cdot R_э^2. \quad (1)$$

При определении массы керна после уплотнения $M_к$ нужно воспользоваться средней плотностью керна $\rho_{срк}$, взятого со дна колеи, и учитывающей уплотнение асфальтобетона в процессе эксплуатации, радиусом керна $R_к$. В качестве толщины уплотненного асфальтобетона нужно принять некоторую условную величину $H_у$. Эта условная величина характеризует толщину керна, которую бы он имел в условиях уплотнения от плотности величиной $\rho_{срз}$ до плотности величиной $\rho_{срк}$. Таким образом, толщина керна $H_у$ учитывает уплотнение асфальтобетона, а износа в ней нет. Тогда получим

$$M_к = \rho_{срк} \cdot H_у \cdot \pi \cdot R_к^2. \quad (2)$$

Следуя закону сохранения массы $M_э = M_к$, тогда из равенства зависимостей (1) и (2) можно вычислить искомую толщину $H_у$. Выполнив, простые действия, получим

$$H_у = H_э \cdot \frac{\rho_{срз}}{\rho_{срк}}. \quad (3)$$

Деформация уплотнения образца $h_у$, взятого со дна колеи, определяется разностью $H_э$ и $H_у$. Вследствие чего и с учетом зависимости (3) получим

$$h_у = H_э \cdot \left(1 - \frac{\rho_{срз}}{\rho_{срк}} \right). \quad (4)$$

Из анализа зависимости (4) следует, что при $\rho_{срк} > \rho_{срз}$ деформация уплотнения асфальтобетона $h_у$ меньше толщины керна в эта-

² ГОСТ Р 58406.1–2020 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси щебеночно-мастичные асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия (с Изменением N 1): утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 мая 2020 г. № 191-ст. М.: Стандартиформ, 2020 // ИС «Техэксперт» / АО «Кодекс». Дата обновления: 11.09.2023.

³ ГОСТ Р 58406.2–2020 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси горячие асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия (с Изменением N 1, с Поправкой): утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 мая 2020 г. № 192-ст. М.: Стандартиформ, 2020 // ИС «Техэксперт» / АО «Кодекс». Дата обновления: 11.09.2023.

⁴ ГОСТ 9128-2013 Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 декабря 2013 г. № 2309-ст. М.: Стандартиформ, 2014 // ИС «Техэксперт» / АО «Кодекс». Дата обновления: 11.09.2023.

лонной точке H_3 . При $\rho_{\text{срк}} = \rho_{\text{срз}}$ деформация уплотнения зерна h_y принимает нулевое значение. По сути, вычисленная по формуле (3) деформация образца h_y , равна глубине колеи обусловленной уплотнением асфальтобетона RD_{ya} . Толщина зерна в эталонной точке H_3 равна или практически равна толщине построенного покрытия h_n . Поэтому формулу (4) можно записать в виде

$$RD_{ya} = h_n \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{срз}}}{\rho_{\text{срк}}} \right). \quad (5)$$

Глубину колеи, обусловленную износом и уплотнением асфальтобетонного покрытия RD_a , находим разностью толщин зернов, отобранных в эталонной точке и со дна колеи

$$RD_a = H_3 - H_k = h_n - H_k. \quad (6)$$

Найденная по формуле (6) глубина колеи RD_a , при условии отсутствия сдвига в рассматриваемом асфальтобетонном слое является суммой двух составляющих, а именно глубин колеи, обусловленных уплотнением RD_{ya} и износом $RD_{иа}$ асфальтобетона. Поэтому глубина колеи, обусловленная износом асфальтобетона $RD_{иа}$, вычисляется вычетом из величины RD_a , значения RD_{ya} . То есть искомую глубину колеи находим по формуле

$$RD_{иа} = RD_a - RD_{ya} = h_n - H_k - h_n \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{срз}}}{\rho_{\text{срк}}} \right). \quad (7)$$

Преобразовав формулу (7), получим

$$RD_{иа} = h_n \cdot \frac{\rho_{\text{срз}}}{\rho_{\text{срк}}} - H_k. \quad (8)$$

Глубина колеи, обусловленная деформациями слоев, подстилающих покрытие RD_o , определяется разностью общей глубины колеи RD , измерение которой показаны на рисунке 5, а, и обеих глубин колеи, обусловленной уплотнением RD_{ya} и износом $RD_{иа}$ асфальтобетона. В этом случае получим

$$RD_o = RD - h_n \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{срз}}}{\rho_{\text{срк}}} \right) - \left(h_n \cdot \frac{\rho_{\text{срз}}}{\rho_{\text{срк}}} - H_k \right). \quad (9)$$

Таким образом, аналитическими рассуждениями и простыми арифметическими действиями нами получены три основные формулы (5), (8) и (9), сумма которых должна быть равна глубине колеи RD . Иными словами, должно иметь место тождество

$$RD = h_n \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{срз}}}{\rho_{\text{срк}}} \right) + \left(h_n \cdot \frac{\rho_{\text{срз}}}{\rho_{\text{срк}}} - H_k \right) + \left[RD - h_n \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{срз}}}{\rho_{\text{срк}}} \right) - \left(h_n \cdot \frac{\rho_{\text{срз}}}{\rho_{\text{срк}}} - H_k \right) \right]. \quad (10)$$

Раскрыв скобки в зависимости (10), можно убедиться, что имеет место уравнение, содержащее подобные члены, оно имеет вид

$$RD = h_n - h_n \cdot \frac{\rho_{\text{срз}}}{\rho_{\text{срк}}} + h_n \cdot \frac{\rho_{\text{срз}}}{\rho_{\text{срк}}} - H_k + RD - h_n + h_n \cdot \frac{\rho_{\text{срз}}}{\rho_{\text{срк}}} - h_n \cdot \frac{\rho_{\text{срз}}}{\rho_{\text{срк}}} + H_k. \quad (11)$$

Приведя подобные в зависимости (11), получим тождество, свидетельствующее о верности наших рассуждений и арифметических операций, оно имеет вид

$$RD = RD. \quad (12)$$

Полученное тождество (12) указывает на возможности применения нашей методики, выделения глубины колеи износа из общей глубины колеи, образующейся на покрытии, для разработки классификации участков городских дорог по степени опасности к износу. При этом необходимо обсудить случай полного износа верхнего слоя, иллюстрация такого случая приведена на рисунке 4. В случае полного износа верхнего асфальтобетонного слоя глубина колеи, обусловленная износом этого слоя $RD_{иа}$, равна его толщине, измеряемой по толщине этого слоя в зерне, взятом между колеи. Далее все показанные нами лабораторные эксперименты и расчеты применяются к нижнему слою асфальтобетонного покрытия. Величина износа определяется суммой изношенной толщины верхнего слоя и глубины колеи, обусловленной износом нижнего асфальтобетонного слоя.

РЕЗУЛЬТАТ

Представленная методика применена при обследовании 32 участков с колеиностью на дорогах г. Омска. При обработке экспериментальных данных мы использовали полученные нами формулы (5), (8) и (9), по которым вычисляли составляющие глубины колеи, обусловленные износом и деформациями материала покрытия и материалов подстилающих слоев. После расчета указанных составляющих глубины колеи вычислялся вклад каждой составляющей (ΔRD_{ya} , ΔRD_{ia} и ΔRD_o) в глубину колеи (RD) в процентном отношении к ее величине на поверхности. Расчет вклада каждой составляющей выполнен по формулам:

$$\begin{aligned}\Delta RD_{ya} &= \frac{100 \cdot RD_{ya}}{RD}; \\ \Delta RD_{ia} &= \frac{100 \cdot RD_{ia}}{RD}; \\ \Delta RD_o &= \frac{100 \cdot RD_o}{RD}.\end{aligned}\quad (13)$$

Результаты обработки части данных наших экспериментов приведены в таблице 3.

В таблице 3 нами приведена часть результатов, но в объеме, позволяющем делать выводы о факторах, приводящих к увеличению определенной составляющей, влияющей на глубину колеи. На участках с интенсивным движением пассажирского и грузового транспорта наибольшая часть глубины объясняется деформированием материалов и грунтов в слоях и земляном полотне, подстилающих асфальтобетонное покрытие. Это подтверждают данные, полученные на основе обследования дорог улиц Красный Путь и Интернациональная. В первом случае по третьей от оси дороги полосе осуществляется движение автобусов, троллейбусов и др. тяжелого транспорта и легковых автомобилей. На этой полосе преобладает составляющая, обусловленная деформациями подстилающих слоев. По мере приближения к разметке 1.12 «стоп линия» легковой транспорт перестраивается в эту полосу движения для последующего перестроения в крайнюю правую полосу, с которой разрешен поворот «направо». Маневры перестроения увеличивают долю легковых автомобилей в потоке. Составляющая износа постепенно увеличивается по мере приближения к разметке 1.12 «стоп линия», что объясняется как увеличением количества легковых автомобилей на шипованных шинах, так и их торможением вплоть до полной остановки. По

крайней правой полосе движутся в основном легковые автомобили, совершающие поворот направо на улицу Кемеровская. В центре кривой этого поворота износ составляет 94%, что объясняется малой интенсивностью движения тяжелых нагрузок. На улице Интернациональная местом сосредоточения колеи является остановка общественного транспорта «Главпочтамт», в пределах которой отсутствует заездной карман, остановка автобусов и троллейбусов происходит на крайней правой полосе. Кроме того, непосредственно вблизи остановки находится регулируемое пересечение с улицей Герцена, вследствие чего колея на этом участке обусловлена деформациями нижележащих слоев под действием большого числа статической нагрузки от автобусов и троллейбусов. На остальном протяжении этой полосы движения дороги глубина колеи мала. Вследствие этого деформации уплотнения асфальтобетона тоже малы и приняты с учетом округления до 0 или 1 мм. Поэтому при округлении деформации уплотнения асфальтобетона до 1 мм вклад этой деформации в глубину колеи завышен, а вклад износа соответственно занижен. При округлении деформации уплотнения асфальтобетона до 0 мм, наоборот, вклад уплотнения занижен, а вклад износа завышен.

Следует обратить внимание на участки дорог со смешанным режимом движения транспорта. Такими участками являются места заторов в часы пиковой интенсивности движения. На этих участках обычный режим движения осуществляется с постоянной скоростью (60–80 км/ч). На рисунке 3 такой режим обозначен цифрой 3. Но в часы пиковой интенсивности движения на этих участках, как правило, 2 раза в сутки возникают заторы транспорта «пробки», в которых водители легковых автомобилей многократно останавливаются и трогаются с места. При одинаковой интенсивности движения глубина колеи на таких участках несколько меньше, чем у перекрестков и наземных пешеходных переходов, но значительно больше, по сравнению с участками круглосуточного движения с постоянной скоростью. Длина участков с заторами движения достигает сотен метров, что делает ущерб от износа значительным.

На основе данных наших экспериментов мы разработали классификацию участков дорог по степени опасности к образованию колеи износа в г. Омске, учитывающей режим движения, она приведена в таблице 4.

Таблица 3
Экспериментальные данные о вкладе износа и деформаций в глубину колеи на асфальтобетонном покрытии на дорогах и улицах г. Омска
 Источник: составлено авторами.

Table 3
Experimental data on the contribution of wear and deformations to the depth of the track on asphalt concrete pavement on the roads and streets of Omsk
 Source: compiled by the authors.

Наименование дороги	Режим движения по рисунку 4	Глубина колеи RD , мм	Вклад составляющих в глубину колеи, %		
			ΔRD_{ya}	ΔRD_{ia}	ΔRD_o
1	2	3	4	5	6
Улица 1-я Чередовая (ремонт выполнен 08.09.2016)	1 (поворот на ул. Невского)	60 (измерена 13.11.2019)	0	83	17
Улица Д. Бедного (ремонт выполнен 08.09.2016)	3 (скорость 60–80 км/ч)	30 (измерена 13.11.2019)	0	3	97
Улица Д. Бедного (ремонт выполнен 08.09.2016)	2 (участок торможения)	39 (измерена 13.11.2019)	5	10	85
	2 (участок остановки)	44 (измерена 13.11.2019)	2	27	71
	2 (разгон до 20 км/ч)	36 (измерена 13.11.2019)	3	17	80
	3 (скорость 20–40 км/ч)	25 (измерена 13.11.2019)	0	16	84
Улица Интернациональная (ремонт выполнен 06.07.2016)	2 (остановка автобусов без кармана)	72 (измерена 10.10.2018)	1	10	89
	3 (скорость 20–40 км/ч)	6 (измерена 10.10.2018)	0	17	83
	3 (скорость 40–60 км/ч)	4 (измерена 10.10.2018)	0	0	100
Улица Красный Путь (первая от оси «крайняя левая» полоса движения, поворот налево запрещен) в пределах пересечения с ул. Кемеровская (ремонт выполнен 06.09.2018)	3 (скорость 60–80 км/ч)	18 (измерена 14.09.2023)	0	39	61
	3 (скорость 40–60 км/ч)	27 (измерена 14.09.2023)	0	44	56
	3 (скорость 20–40 км/ч)	34 (измерена 14.09.2023)	0	59	41
	2 (участок торможения)	46 (измерена 14.09.2023)	0	80	20
	2 (участок остановки)	53 (измерена 14.09.2023)	0	94	6
	2 (разгон до 20 км/ч)	48 (измерена 14.09.2023)	0	79	21
Улица Красный Путь (третья от оси полоса движения,) в пределах пересечения с улицы Кемеровская (ремонт выполнен 06.09.2018)	3 (скорость 40–60 км/ч)	10 (измерена 14.09.2023)	0	20	80
	3 (скорость 20–40 км/ч)	15 (измерена 14.09.2023)	7	20	73
	2 (участок торможения)	20 (измерена 14.09.2023)	5	35	60
	2 (участок остановки)	29 (измерена 14.09.2023)	7	34	59
Улица Красный Путь (четвертая от оси «крайняя правая» полоса движения)	1 (поворот на ул. Кемеровская)	31 (измерена 14.09.2023)	0	94	6

Примечание: границы специфических участков установлены по скорости движения дорожной диагностической лаборатории в свободном режиме движения за лидером (другим автомобилем, произвольно выбранном). В данном случае под свободным режимом понимаются условия, при которых пересечение дорог или дороги с пешеходным переходом преодолеваются за один сигнал светофора, то есть на красный сигнал светофора снизили скорость и остановились, а на зеленый сигнал набрали скорость и проехали пересечение.

Таблица 4

Классификация участков городских дорог по степени опасности к износу с учетом режима движения легковых автомобилей на шипованных шинах

Источник: составлено авторами.

Table 4

Classification of sections of urban roads according to the degree of danger to wear, taking into account the mode of movement of passenger cars on studded tires

Source: compiled by the authors.

Тип участков дорог и улиц	Характеристика участков	Перечень факторов, способствующих износу
1	2	3
Сильноизнашиваемые	Участки городских дорог и улиц, расположенные в пределах разворота и поворота легковых автомобилей	Совместное действие продольного и поперечного трения. Увеличение трения качения за счет уменьшения скорости
	Участки торможения легковых автомобилей, вплоть до их полной остановки с последующим стартом с места, включая участок разгона до 20 км/ч	Трение скольжения, возникающее при блокировке колеса, и возрастающее при уменьшении скорости, а при полной остановке переходящее в трение покоя
	Участки дорог с заторами движения, периодичностью три и более суток в неделю и продолжительность два и более часа в сутки	Трение скольжения и покоя при многократных торможениях и остановках. Трение качения на малых скоростях
Изнашиваемые	Участки разгона и торможения легковых автомобилей со скоростью движения 20–40 км/ч	Трение качения на малых скоростях
	Участки дорог с заторами движения, периодичностью менее трех суток в неделю и продолжительность два и более часа в сутки	Трение скольжения и покоя при многократных торможениях и остановках. Трение качения на малых скоростях
Слабоизнашиваемые	Все остальные участки дорог при скоростях движения не менее 40 и не более 80 км/ч	Действие трения качения, которое уменьшается с повышением скорости движения

Таблица 5

Ориентировочные сроки службы асфальтобетонных покрытий участков дорог и улиц г. Омска до образования колеи износа глубиной 30 мм

Источник: составлено авторами.

Table 5

Approximate service life of asphalt concrete pavement sections of roads and streets of Omsk before the formation of wear ruts with a depth of 30 mm

Source: compiled by the authors.

Интенсивность движения легковых автомобилей по полосе движения, ед./сут	Интервал времени до образования колеи износа глубиной 30 мм на участках городских дорог различной степени опасности к износу, годы		
	Сильноизнашиваемые	Изнашиваемые	Слабоизнашиваемые
10000	1,0–2,2	2,2–3,5	3,5–5,0
5000	2,0–4,5	4,5–7,0	Более 7,0
2000	Более 5,0	Более 7,0	12 и более
1000	Более 7,0	12 и более	12 и более

Примечание:

1. Наименьшие значения сроков службы соответствуют покрытиям из горячего асфальтобетона А16В_т и горячего плотного асфальтобетона типа А на битуме БНД 100/130. Наименьшие значения сроков службы соответствуют покрытиям из ЩМА-20 и ЩМА-16.

2. Сроки службы более 5 лет определены экстраполяцией экспериментальных данных, полученных в рамках диагностик дорог и улиц, выполненных за пять лет.

Классификация, представленная в таблице 4, учитывает влияние условий и скорости движения, что обуславливает величину силы трения и глубину проникновения шипа в покрытие, но в ней не учтено влияние на величину износа числа приложенных нагрузок, зависящего от интенсивности движения легковых автомобилей. Поэтому в дополнении к таблице 4 нами на основе интерполяции данных ежегодных диагностик дорог г. Омска установлены приблизительные сроки службы асфальтобетонных покрытий до образования в нем колеи глубиной 30 мм. Эти данные приведены в таблице 5.

В таблице 5 приведены сроки службы, характеризующие промежуток времени, в течение которого глубина колеи достигает значения 30 мм. Величина этого временного интервала может отличаться от продолжительности времени, которое можно найти по данным таблицы 3, вычисляя разностью дат обследования и выполнения ремонта. Поясняя такую разницу, заострим внимание, что сроки службы (см. таблицу 5) указывают время, по истечении которого глубина колеи достигает значения 30 мм, а по истечении интервалов времени (см. таблицу 3) глубина колеи достигает различных значений, отличающихся от 30 мм.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматривая влияние скорости движения на глубину проникновения шипа в покрытие, отметим, что, по нашему мнению, это влияние не однозначно. В настоящее время установлена верхняя граница скорости движения, при которой износ считается незначительным, она находится в пределах 80–100 км/ч. При более высоких скоростях вращение шины приводит к увеличению силового действия твердосплавной вставки шипа на покрытие, в результате чего износ покрытия увеличивается. В этом аспекте наши предшественники абсолютно правы, но при этом увеличение деформации во времени (фактор проявления ползучести) осталось без должного внимания. Основы теории ползучести (реологии) хорошо известны, и согласно этим основам деформация от постоянной по величине нагрузки увеличивается во времени. При уменьшении скорости движения время действия твердосплавной вставки шипа на покрытие возрастает, вследствие чего увеличивается его проникновение в покрытие. Поэтому диапазон безопасных скоростей должен быть ограничен как сверху, например, 80 км/ч, так и снизу, например, 40 км/ч. В диапазоне скорости движения от 40 до 80 км/ч, интенсивность износа наименьшая.

Рассматривая влияние режимов торможения и набора скорости, мы опирались на три вида трения: покоя, скольжения и качения. Как известно, наибольшее сопротивление движению оказывает трение покоя, оно характеризуется величиной силы, вызывающей или останавливающей движение. При этом коэффициент сцепления шины с покрытием имеет наибольшую величину. При действии трения покоя в момент остановки или начала движения горизонтальное усилие на покрытие имеет максимальную величину. Специфика действия горизонтальной нагрузки состоит в том, что эта сила сжимает одну часть полупространства, расположенного перед точкой приложения, и растягивает другую часть полупространства, находящуюся за точкой приложения силы. В этом случае происходит наибольшее пластическое оттеснение материала покрытия. Второй по величине является сила трения скольжения, она тем меньше, чем больше скорость движения. Поэтому по траектории торможения заблокированного колеса трение скольжения шины возрастает по мере уменьшения скорости и увеличения коэффициента сцепления. Трение качения наименьшее, но при увеличении скорости движения шипованной шины оно вначале незначительно уменьшается, а затем возрастает. Поэтому горизонтальные силы, обусловленные различными видами трения, должны учитываться в работах по износу покрытий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Александров А.С., Семенова Т.В., Калинин А.Л. Анализ причин колееобразования на покрытиях жестких дорожных одежд и рекомендации по уменьшению этого явления. Вестник СибАДИ. 2019;16(6):718-745. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-718-745>
2. Aho S., et al. Structural innovations // Roadex II Northern Periphery. A summary of Roadex II project phase II reports. 2005. 72 p.
3. Александров А.С. Критерии расчета дорожных конструкций по ровности, допускаемые и предельные неровности // Вестник гражданских инженеров. 2008. № 4(17). С. 97–104.
4. Герцог В.Н., Долгих Г.В., Кузин Н.В. Расчет дорожных одежд по критериям ровности. Часть 1. Обоснование норм ровности асфальтобетонных покрытий // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 5 (57). С. 45 – 57. DOI: 10.5862/MCE.57.4.
5. Кириллов А.М. Учет скорости движения транспортных средств в расчетах жестких дорожных одежд // Вестник МГСУ. 2018. № 8(13). С. 959–972. DOI:10.22227/1997-0935.2018.8.959-972.
6. Лушников Н.А., Лушников П.А., Ковалев Д.И. Об определении допустимых углов наклона боко-

вых стенок колеи по условию устойчивости автомобиля против заноса на мокром покрытии // Дороги и мосты. 2022. № 1 (47). С. 152–160.

7. Цуканов И. Ю., Любичева А. Н., Ковалев Д. И. Оценка боковой силы при взаимодействии колеса автомобиля с дорожной колеёй // Мир транспорта. 2022. Т. 20, № 5. С. 6–12. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-5-1>.

8. Васильев Ю.Э., Ивачев А.В., Братищев И.С. Исследование устойчивости дорожно-строительных материалов к износному колееобразованию в условиях, приближенных к эксплуатационным // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. Т. 7, Вып. 5 (24). URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/11TVN514.pdf> (дата обращения: 11.09.2023).

9. Данилов В.В., Цариков А.А. Опыт устранения колеи износа на примере автомобильных дорог Свердловской области // Дороги и мосты. 2020. Вып. 44. С. 93–114.

10. Левкович Т.И., Беляков А.И., Билько А.Е., Тищенко А.С. О модификации битумов и асфальтобетонных смесей для повышения сдвигоустойчивости асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог // Приволжский научный вестник. 2016. № 1 (53). С. 48–53.

11. Матуа В.П., Исаев Е.Н., Чирва Д.В. Методика исследования связных грунтов на накопление остаточных деформаций // Вестник ТГАСУ. 2016. № 3. С. 186–193.

12. Hoang L. N., Le T. H. Effect of aggregate gradation on rutting of asphalt concrete by using a wheel tracking device in Vietnam // Journal of the Mechanical Behavior of Materials. 2018. Vol. 27 (5-6). p. 1–6. DOI: 10.1515/jmbm-2018-2007.

13. Drakos C., et al. Identification of a physical model to evaluate rutting performance of asphalt mixtures // Journal of ASTM International. 2005. Vol. 2 (3). p. 165 – 185.

14. Ismael M. Q., Fattah M. Y., & Jasim A. F. Improving the rutting resistance of asphalt pavement modified with the carbon nanotubes additive // Ain Shams Engineering Journal. 2021. Vol. 12(4). p 3619–3627. DOI:10.1016/j.asej.2021.02.038.

15. Wang H., Zhang Q., Tan J. Investigation of layer contributions to asphalt pavement rutting // Journal of materials in civil engineering. Special issue: China. Innovative Use of Materials for Highway Construction. 2009. Vol. 21. p. 181– 185.

16. Hafeez I., Kamal M., Mirza M. Rutting prediction model of asphalt concrete mixtures using uniaxial repeated creep test // Kuwait Journal of Science & Engineering. 2011. Vol. 38 (2). p. 45 – 61.

17. Said S., Ahmed A.W., Carlsson H. Evaluation of rutting of asphalt concrete pavement under field-like conditions // The processing in 6th Eurasphalt&Eurobitume Congress. Prague. Czech Republic. 2016. p 1 – 11.

18. Ковалев Д.И., Шайхутдинова Р.А. Проблемы колееобразования на автомобильных дорогах // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». 2022 № 1. Т. 9. <https://doi.org/10.15862/10SATS122>

19. Чёлушкин И.А. Влияние сил от колес автомобиля при движении по криволинейным участкам

дорог на образование колеи в асфальтобетонном покрытии. Часть 1. Поперечные силы // Интернет-журнал «Науковедение». 2015. Т. 7, № 6. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/10KO615.pdf> (дата обращения: 11.09.2023).

20. Burke J. E., McKenzie L. J. Some Tests of Studded Tires in Illinois // Highway Research Record. 1966. Vol. 136. p. 42 – 58.

21. Keyser J. H. Effect of Studded Tires on the Durability of Road Surfacing // Highway Research Record. 1970. Vol. 331. p. 41 – 53.

22. Preus C. K. Effects of Studded Tires on Pavement Wear and Traffic Safety // Highway Research Record. 1972. Vol. 352. p. 23 – 44.

23. Lundy J. R. et al. Wheel Track Rutting Due to Studded Tires // Transportation research record. 1992. Vol. 1348. p. 18 – 28.

24. White T.D., Haddock J.E., Hand A. J.T. Contributions of Pavement Structural Layers to Rutting of Hot Mix Asphalt Pavements // National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). Washington, D.C. Report No 468.2002. 151 p.

REFERENCES

1. Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Kalinin A.L. Rutting on the surfaces of non-rigid road pavements: analysis of the causes and recommendations for reducing. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;16(6):718-745. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-718-745>

2. Aho S., et al. Structural innovations. *Roadex II Northern Periphery. A summary of Roadex II project phase II reports*. 2005; 72 p.

3. Aleksandrov A.S. Kriteriai rascheta dorozhnykh konstrukcij po rovnosti, dopuskaemye i predel'nye nerovnosti [Criteria for calculating road structures by evenness, permissible and marginal irregularities]. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*. 2008; 4 (17): 97 – 104. (In Russ.)

4. Gercog V.N., Dolgih G.V., Kuzin N.V. Raschet dorozhnykh odezhd po kriteriyam rovnosti. Chast' 1. Obosnovanie norm rovnosti asfal'tobetonnykh pokrytij [Calculation of road clothes according to the criteria of evenness. Part 1. Justification of the evenness standards of asphalt concrete pavements]. *Inzhenero-stroitel'nyj zhurnal*. 2015; 5 (57): 45 – 57. DOI: 10.5862/MCE.57.4. (In Russ.)

5. Kirillov, A.M. Uchet skorosti dvizheniya transportnykh sredstv v raschetah nezhestkiy dorozhnykh odezhd [Taking into account the speed of vehicles in the calculations of non-rigid road clothes]. *Vestnik MGSU*. 2018; 8 (13): 959 – 972. DOI:10.22227/1997-0935.2018.8.959-972. (In Russ.)

6. Lushnikov N.A., Lushnikov P.A. Kovalev D.I. Ob opredelenii dopustimyykh uglov naklona bokovykh stенок kolei po usloviyu ustojchivosti avtomobilya protiv zanosy na mokrom pokrytii [On determining the permissible angles of inclination of the side walls of the track according to the condition of stability of the car against skidding on wet pavement]. *Dorogi i mosty*. 2022; 1 (47): 152 – 160. (In Russ.)

7. Cukanov I. YU., Lyubicheva A. N., Kovalev D. I. Ocenka bokovoj sily pri vzaimodejstvii koleasa avtomobilya s dorozhnoj koleej [Evaluation of the lateral force in the interaction of the car wheel with the road track]. *Mir transporta*. 2022; T. 20. 5: 6 – 12. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-5-1>. (In Russ.)
8. Vasil'ev Y.E., Ivachev A.V., Bratishchev I.S. Issledovanie ustojchivosti dorozhno-stroitel'nyh materialov k iznosnomu koleebrazovaniju v usloviyah, priblizhennyh k eksploatacionnym [Investigation of the resistance of road-building materials to wear-and-tear track formation in conditions close to operational]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*. 2014; 7. Vyp. 5 (24). URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/11TVN514.pdf> (data obrashcheniya: 11.09.2023). (In Russ.)
9. Danilov V.V., Carikov A.A. Opyt ustraneniya kolei iznosa na primere avtomobil'nyh dorog Sverdlovskoj oblasti [The experience of eliminating the wear track on the example of highways of the Sverdlovsk region]. *Dorogi i mosty*. 2020; Vyp. 44: 93 – 114. (In Russ.)
10. Levkovich T.I., Belyakov A.I., Bil'ko A.E., Tishchenko A.S. O modifikacii bitumov i asfal'tobetonnyh smesey dlya povysheniya sdvigoustojchivosti asfal'tobetonnyh pokrytij avtomobil'nyh dorog [On the modification of bitumen and asphalt concrete mixtures to increase the shear resistance of asphalt concrete road surfaces]. *Privolzhskij nauchnyj vestnik*. 2016; 1 (53): 48 – 53. (In Russ.)
11. Matua V.P., Isaev E.N., CHirva D.V. Metodika issledovaniya vyznyh gruntov na nakaplivanie ostatочnyh deformacij [Methodology for the study of cohesive soils on the accumulation of residual deformations]. *Vestnik TGASU*. 2016; 3: 186 – 193. (In Russ.)
12. Hoang L. N., Le T. H. Effect of aggregate gradation on rutting of asphalt concrete by using a wheel tracking device in Vietnam. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2018; 27 (5-6): 1 – 6. DOI: 10.1515/jmbm-2018-2007.
13. Drakos C., et al. Identification of a physical model to evaluate rutting performance of asphalt mixtures. *Journal of ASTM International*. 2005; 2 (3): 165 – 185.
14. Ismael M. Q., Fattah M. Y., & Jasim A. F. Improving the rutting resistance of asphalt pavement modified with the carbon nanotubes additive. *Ain Shams Engineering Journal*. 2021; 12 (4): 3619 – 3627. DOI:10.1016/j.asej.2021.02.038.
15. Wang H., Zhang Q., Tan J. Investigation of layer contributions to asphalt pavement rutting. *Journal of materials in civil engineering. Special issue: China. Innovative Use of Materials for Highway Construction*. 2009; 21: 181 – 185.
16. Hafeez I., Kamal M., Mirza M. Rutting prediction model of asphalt concrete mixtures using uniaxial repeated creep test. *Kuwait Journal of Science & Engineering*. 2011; 38 (2): 45 – 61.
17. Said S., Ahmed A.W., Carlsson H. Evaluation of rutting of asphalt concrete pavement under field-like conditions. *The processing in 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress*. Prague, Czech Republic. 2016: 1 – 11.
18. Kovalev D.I., SHajhutdinova R.A. Problemy koleebrazovaniya na avtomobil'nyh dorogah [Problems of track formation on highways]. *Internet-zhurnal «Transportnye sooruzheniya»*. 2022; 1. T. 9. <https://doi.org/10.15862/10SATS122>. (In Russ.)
19. Chyolushkin I.A. Vliyanie sil ot koleas avtomobilya pri dvizhenii po krivolinejnym uchastkam dorog na obrazovanie kolei v asfal'tobetonnom pokrytii. Chast' 1. Poperechnye sily [The influence of forces from the wheels of the car when driving on curved sections of roads on the formation of a track in the asphalt concrete pavement. Part 1. Transverse forces]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*. 2015; T. 7. 6. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/10KO615.pdf> (data obrashcheniya: 11.09.2023). (In Russ.)
20. Burke J. E., McKenzie L. J. Some Tests of Studded Tires in Illinois. *Highway Research Record*. 1966; 136: 42 – 58.
21. Keyser J. H. Effect of Studded Tires on the Durability of Road Surfacing. *Highway Research Record*. 1970; 331: 41 – 53.
22. Preus C.K. Effects of Studded Tires on Pavement Wear and Traffic Safety. *Highway Research Record*. 1972; 352: 23 – 44.
23. Lundy J.R. et al. Wheel Track Rutting Due to Studded Tires. *Transportation research record*. 1992; 1348: 18 – 28.
24. White T.D., Haddock J.E., Hand A. J.T. Contributions of Pavement Structural Layers to Rutting of Hot Mix Asphalt Pavements. *National Cooperative Highway Research Program (NCHRP)*. Washington, D.C. 2002; 468: 151 p.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Александров А.С. Руководство темой исследования, формирование целей и постановка задачи исследования. Анализ состояния вопроса. Участник приведённых в статье исследований. Анализ результатов.

Семенова Т.В. Общее редактирование. Участник приведённых в статье исследований. Подготовка материала для статьи, оформление статьи.

Раскошный Д.Ю. Участник приведённых в статье исследований. Обработка экспериментальных данных. Оформление наглядных материалов статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Anatoly S. Aleksandrov. Management of the research topic, formation of goals and formulation of the research task. Analysis of the state of the issue. Participant of the research presented in the article. Analysis of the results.

Tatiana V. Semenova. General editing. Participant of the research presented in the article. Preparation of the material for the article, the design of the article.

Denis Y. Raskoshny. Participant of the research presented in the article. Processing of experimental data. Design of visual materials of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александров Анатолий Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» института «Автомобильно-дорожное, промышленное и гражданское строительство». SPIN-код: 7573-4997.

Семенова Татьяна Викторовна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» института «Автомобильно-дорожное, промышленное и гражданское строительство». SPIN-код: 6344-3503.

Раскошный Денис Юрьевич – аспирант кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» института магистратуры и аспирантуры. SPIN-код: 6325-0064.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandrov Anatoly Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of the Road Construction and Maintenance, Civil Engineering Institute. SPIN-код: 7573-4997.

Semenova Tatiana Victorovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of the Road Construction and Maintenance, Civil Engineering Institute. SPIN-код: 6344-3503.

Raskoshny Denis Yurievich – postgraduate student of the Department of the Road Construction and Maintenance, Institute of Magistracy and Postgraduate Studies. SPIN-код: 6325-0064.

Научная статья
УДК 69.05
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-670-682>
EDN: XZWDIR



ФАКТОРЫ РИСКА РЕСУРСОСНАБЖЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЕГО ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЁЖНОСТИ

Аль-Мсари Ахмед Абдул Руда Ауда*, А. А. Руденко

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия

rudenkoa.a@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2996-9785>

ahmed4_33@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8354-9661>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Возведение объектов капитального строительства является сложной организационно-технологической задачей, предусматривающей выполнение комплекса строительно-монтажных работ, а также организационно-технологическое взаимодействие всех участников строительства, в том числе с целью оперативного управления рисками, возникающими в процессе строительства с разной степенью интенсивности и опасности. **Материалы и методы.** Одно из основных условий обеспечения организационно-технологической надёжности в строительной отрасли является полное и своевременное обеспечение всеми видами ресурсов, что на современном этапе является не всегда эффективно решаемой в полной мере научно-практической задачей ввиду высокого уровня различных рисков.

Результаты. Результаты неблагоприятных последствий рисков сказываются весьма негативно и существенно на таких вопросах строительства, как соблюдение сроков выполнения работ, оптимизация стоимости объекта на всех этапах его возведения, обеспечение заданного качества СМР. В этой связи обеспечение организационно-технологической надёжности (ОТН) строительства на основе эффективной системы ресурсообеспечения с учетом рисков представляет собой актуальную и важную задачу.

Обсуждение и заключение. Учет влияния факторов ресурсоснабжения строительства имеет большое значение для учета риска и его последствий как количественной меры оценки негативного или благоприятного сценария хода строительства. Оценка различных факторов ресурсоснабжения позволит более точно оценивать организационно-технологическую надёжность строительства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: организационно-технологическая надёжность, ресурсообеспечение, материально-техническое обеспечение, степень риска, критерии оценки технологических параметров строительства

Статья поступила в редакцию 11.09.2023; одобрена после рецензирования 16.10.2023; принята к публикации 24.10.2023.

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: Аль-Мсари Ахмед Абдул Руда Ауда, Руденко А. А. Факторы риска ресурсоснабжения строительства при обеспечении его организационно-технологической надёжности // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 5 (93). С. 670-682. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-670-682>

© Аль-Мсари Ахмед Абдул Руда Ауда, Руденко А. А., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-670-682>

EDN: XZWDIR

ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL RELIABILITY OF CONSTRUCTION IN IRAQ

*Al-Msari Ahmed Abdul Ruda Awda**, Aleksandr A. Rudenko

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

Saint Petersburg, Russia

rudenkoa.a@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2996-9785>

ahmed4_33@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8354-9661>

**corresponding author*

ABSTRACT

Introduction. The construction of capital construction facilities is a complex organizational and technological task, providing for the execution of a complex of construction and installation works, as well as organizational and technological interaction of all construction participants, including with the aim of prompt management of risks arising during construction with varying degrees of intensity and danger.

Materials and methods. One of the main conditions for ensuring organizational and technological reliability in the construction industry is the full and timely provision of all types of resources, which at the current stage is not always an effectively solved scientific and practical task, due to the high level of various risks.

Results. The results of the adverse consequences of the risks have a very negative and significant impact on such construction issues as compliance with the deadlines for the work, optimization of the cost of the facility at all stages of its construction, ensuring the specified quality of construction and installation. In this regard, ensuring organizational and technological reliability (OTR) of construction based on an effective resource support system, taking into account risks, is an urgent and important task.

Discussion and conclusion. Consideration of the impact of construction resource supply factors is important for taking into account the risk and its consequences, as a quantitative measure to assess the negative or favorable scenario of construction progress. Assessment of various factors of resource supply will make it possible to more accurately assess the organizational and technological reliability of construction.

KEYWORDS: *organizational and technological reliability, resource supply, material and technical support, degree of risk, criteria for evaluating technological parameters of construction*

The article was submitted 11.09.2023; approved after reviewing 16.10.2023; accepted for publication 24.10.2023.

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. Al-Msari Ahmed Abdul Ruda Awda, Rudenko A. A. Organizational and technological reliability of construction in Iraq. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (5): 670-682. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-5-670-682>

© Al-Msari Ahmed Abdul Ruda Awda, Rudenko A. A., 2023



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

ВВЕДЕНИЕ

Строительство зданий – сложный технологический процесс, включающий комплекс строительно-монтажных работ, а также организационно-технологическое взаимодействие всех участников строительства, в том числе с целью оперативного управления рисками, возникающими в процессе строительства с разной степенью интенсивности и опасности¹.

Понятие риска в строительстве объективно связано с категорией «организационно-технологическая надежность» (ОТН), под которой понимается способность производственной системы, находящейся под воздействием неблагоприятных факторов, присущих строительству, обеспечить выполнение таких основных показателей как сроки, стоимость и качество строительства. И в данном контексте ресурсы, требуемые для возведения объекта, прямо влияют на обеспечение вышеуказанного.

Одним из главных условий обеспечения организационно-технологической надежности является полное и своевременное обеспечения строительства всеми видами ресурсов, что на современном этапе является не всегда эффективно решаемой в полной мере научно-практической задачей. Это объясняется высоким уровнем различных рисков, их последствиями и не всегда точными способами прогнозирования. Результаты неблагоприятных последствий рисков сказываются весьма негативно и существенно на таких вопросах строительства, как соблюдение сроков выполнения работ, сохранение стоимости объекта на всех этапах его возведения, обеспечение заданного качества СМР. В этой связи обеспечения ОТН строительства на основе эффективной системы ресурсообеспечения с учетом рисков представляет собой актуальную и важную задачу.

Исходя из целей исследования, оценивая влияние трудовых, материальных, информационных, интеллектуальных, финансовых ресурсов, для оценки и обеспечения ОТН объекта строительства важным является [1, 2]:

- определение факторов, характеризующих эффективность поставки и использования ресурсов по каждому виду;

- анализ и принятие метода и алгоритма экспертной оценки по каждому ресурсу и выявление наиболее значимых факторов;

- оценка влияния факторов с использованием одного из методов математического анализа данных.

В качестве основного показателя ОТН во многих методиках применяют показатель вероятности реализации проекта в установленный срок. Хотя, по мнению автора, для более полной оценки ОТН следовало бы использовать и другие, такие как, например, стоимость и качество работ.

Причем, исходя из разного инструментария и получаемых результатов, на различных этапах жизненного цикла строительства объекта к определению ОТН соответственно следует подходить дифференцированно на этапе проектирования и строительства².

Практика показывает, что в основу разработки принципов и методов ОТН проектирования может быть заложен вероятностно-статистический подход, позволяющий одновременно учесть фактор неопределенности в достижении ОТН при приемлемой валидности результатов [2].

Таким образом, обеспечение заданного уровня ОТН может быть достигнуто на предварительном этапе правильным выбором технологии строительного процесса и высоким качеством проектных организационно-технологических решений (что достигается потенциалом и квалификацией проектной организации). Кроме того, качество принимаемых перед началом и в ходе строительства организационно-производственных решений существенным образом будет определяться правильным выбором стратегии производственной деятельности строительной организации при условии эффективности обеспечения и использования ресурсов [3, 4, 5]. Это может быть достигнуто высоким уровнем подготовки управленческо-производственного персонала организации и эффективностью систем обеспечения ресурсами.

Так как очевидным является факт зависимости между запланированным уровнем ОТН и эффективностью ресурсного обеспечения строительства.

¹ Андреев А.В., Яковлев В. В., Короткая Т. Ю. Теоретические основы надежности технических систем: учебное пособие. СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2018. 164 с.

² Руководство по управлению рисками. Изд. Комитета ПАРТАД по внутреннему контролю, внутреннему аудиту, управлению рисками. 2018 г.

Причем эффективность как показатель отношения результата к затратам должна включать рост ресурсообеспечения больше нормативных значений, так как это приведет к увеличению затрат на хранение, арендную плату, складские расходы, охрану, убыль от хранения и т.п.³ [5].

Для каждого объекта и условий строительства следует выявлять количественный показатель ресурсообеспечения, когда затраты и длительность процесса занимают оптимальные значения. Уровень ОТН в таком случае будет определяться полнотой и своевременностью обеспечения ресурсами и эффективностью их использования. Так, например, отсутствие необходимого количества трудовых и технических (строительная техника, средства механизации) ресурсов приведет к снижению уровня ОТН [6].

Эффективность методов производства СМР и применения современных технологий будет также существенно влиять на уровень ОТН. Например, практика показывает, что применение отдельных, комбинированных и совмещенных методов производства работ должно быть дифференцированным в зависимости от конкретного случая, что несомненно приведет к повышению уровня ОТН [7, 8]. Результатом обеспечения ОТН становится уменьшение сроков и повышение качества строительства, а также улучшение экономических показателей строительного производства.

В этом смысле одним из главных показателей в системе управления ресурсами является объем ресурсов. При формировании запаса ресурсов в процессе строительства необходимо соблюдать следующие требования, которые должны повысить и ОТН:

- объемы запасов материальных средств должны быть на достаточном уровне для обеспечения бесперебойности строительного производства;

- необходимо максимально возможное сокращение объемов хранимых запасов;

- следует стремиться к минимизации суммарных затрат, связанных с созданием и хранением запасов на участке строительства.

Учитывая наличие значительного количества характеристик, по которым осуществляется оценка эффективности и надежности системы ресурсоснабжения и ОТН, предлагается разработать обобщенный критерий, учитывающий большую их часть [9, 10, 11]. Показатель организационно-технологической надежности как функция, зависящая от многих параметров случайных воздействий, может быть представлен несколькими состояниями, зависящими от ресурсообеспечения принятой технологии производства работ и организационных факторов строительства⁴.

С этой целью можно предложить использование общей методики интегральной оценки ОТН на базе функции желательности (desirability function) Харрингтона, или, как ее еще называют, «обобщенной функцией полезности» или «обобщенным критерием эффективности». В основе построения этой обобщенной функции лежит идея преобразования натуральных значений частных откликов в безразмерную шкалу желательности или предпочтительности. Назначение шкалы желательности – установление соответствия между различными параметрами. Здесь под физическими параметрами понимаются возможные отклики, характеризующие функционирование исследуемого объекта, а под психологическими параметрами понимаются субъективные оценки экспериментатора желательности (предпочтительности) того или иного значения отклика⁵.

Структура предлагаемой функции, представленная в таблице 1, основывается на существующей методике, предложенной американским ученым Харрингтоном в 1965 г.⁶

³ Современные проблемы строительной науки, техники и технологии / Н.В. Брайла, Ю.Г. Лазарев, М.А. Романович, Т.Л. Симанкина, А.В. Улыбин. СПб.: СПбПУ, 2017. 141 с.

⁴ Шприц М.Л. Система организационно-технологической надежности строительства многофункциональных комплексов: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.08. СПб., 2016.

⁵ Рынок строительства и недвижимости: стимулы отрасли на фоне кризиса – 2020. М.: Центрсоц.-экономических исследований, 2020 г.

⁶ Early warning: How Iraq can adapt to climate change <https://ecfr.eu/profile/nussaibah-younis/> Policy Brief 19 July 2022.

Таблица 1
 Шкала функции Харрингтона по переводу уровня достижения рассматриваемого свойства
 в безразмерные числовые коэффициенты
 Источник: составлено авторами.

Table 1
 The scale of the Harrington function for translating the level of achievement
 of the property in question into dimensionless numerical coefficients
 Source: compiled by the authors.

Уровни достижения свойств	Предельные уровни
очень хорошо (++)	1,00--0,80
хорошо (+)	0,80--0,63
средне (0)	0,63--0,37
плохо (-)	0,37--0,20
очень плохо (--)	0,20--0,00

Для формирования единого критерия оценки эффективности применим следующую структуру показателей [9]. Она может быть сформулирована в следующем виде:

$$Y(X) = \prod_{i=1}^n h_i(X), \quad (1)$$

где $Y(X)$ – функция приоритетов;
 $h_i(X)$ – заданные показатели эффективности.

Таблица 2
 Факторы риска по трудовым ресурсам
 Источник: составлено авторами.

Table 2
 Risk factors for human resources
 Source: compiled by the authors.

№	Ресурс	Фактор	Описание риска по фактору	Источники риска по фактору
1	Рабочие, инженеры, управленцы	наличие персонала	нехватка персонала	недостаток финансовых средств, отсутствие кадров на рынке, ошибки планирования потребности в работниках нужной квалификации
2		наличие требуемой квалификации у работников	отсутствие квалификации вообще или требуемого уровня	чрезмерный уровень требований, низкий уровень зарплаты, срочность решения
3		компетентность	персонал не компетентен	нет выбора компетентных претендентов, не соразмерные требования
4		мотивированность	риск увольнения работников	нет понимания стратегии и своей роли в ней, нет целей и задач на уровне подразделений, нет системы вознаграждения, чрезмерный уровень ответственности и требований
5		надлежащее исполнение обязанностей	ненадлежащее исполнение обязанностей, совершение умышленных действий	недостаточная квалификация, халатность, преступный умысел
6		распределение обязанностей	чрезмерная зависимость от отдельных сотрудников	процесс передачи полномочий не развит
7		внутренние программы обучения персонала	существующие программы обучения сотрудников не соответствуют требованиям законов и нуждам организации	нет планового обучения, несвоевременное изменение программ обучения и подготовка методических материалов
8		превышение полномочий	превышение полномочий	недостаточная квалификация, халатность, преступный умысел

Таблица 3
Факторы риска по информационным ресурсам
Источник: составлено авторами.

Table 3
Risk factors for information resources
Source: compiled by the authors.

№	Ресурс	Фактор	Описание риска по фактору	Источники риска по фактору
1	Технологии строительства	организация работ	риск организационного сбоя в работе структур и подразделений	некомпетентность, халатность
2		управление технологией	риск нехватки информации для управленческого решения	неверно построена структура потоков информации
3		используемая технология	риск нехватки технологических ресурсов для принятия решения	технологии не соответствуют организации, законодательству
4		внедрение новых технологических решений	риск конфликта ПО и несовместимости технологий	решение о внедрении новой технологии без анализа имеемых технологий и конфликтов ПО
5		временные сроки внедрения новых технологий	риск временных задержек на обновление технологии	задержки в работе организаций, внедряющих новые технологические решения
6	Оборудование и ПО информационного ресурса	соответствие законодательств	риск неадаптированности технологий к изменениям законодательства	нет данных об изменениях законодательства, нет адаптации к изменениям
7		непрерывность информации	риск невозвратного сбоя ресурсов при ЧС	нет плана действий ЧС, плана восстановления функций после ЧС
8		устойчивость ПО	риск сбоя в работе ПО	сбои в энергообеспечении, преднамеренные действия, вредоносные программы, сбои ПО
9		устойчивость работы оборудования	риск сбоя оборудования	сбои в энергообеспечении, чрезмерные нагрузки, вредительство, износ
10	Информация	защищенность информации	утечка/потеря конфиденциальной информации	халатность, незащищенность ПО, несанкционированный доступ
11		разграничение информационных систем	риск несанкционированного доступа/неполучения необходимого доступа	нет регламента доступа, избыточные права доступа
12		целостность БД	риск нарушения целостности БД	ошибки, халатность, сбои
13		устойчивость информационного обеспечения	риски возникновения сбоев в передаче управляющих сигналов	ошибки сотрудников, несвоевременное уведомление, ошибки при передаче сигналов

При использовании ряда расходящихся между собой показателей ОТН результирующий критерий предполагается скомпоновать с такой структурой, чтобы он не позволял достичь допустимого решения в случае наличия одного и более отрицательного элемента [10]:

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n h_i}. \quad (2)$$

По итогам формируется матрица совпадения показателей эффективности ОТН данным

таблицы 1. Построение данной структуры ориентируем на достижение заданного значения ОТН [11].

Зависимость строительных процессов от факторов по видам поставляемых ресурсов (трудовым, информационным, материальным, финансовым и интеллектуальным) приведены в таблицах 2, 3, 4, 5, 6, а их соотношение с приведенной выше шкалой Харрингтона представлено в таблице 7.

Таблица 4
Факторы риска по финансовым ресурсам
 Источник: составлено авторами.

Table 4
Risk factors for financial resources
 Source: compiled by the authors.

№	Ресурс	Фактор	Описание риска по фактору	Источники риска по фактору
1	Финансирование строительства	своевременное кредитование	риск нехватки ресурсов	отсутствие средств, нет контроля за финансовыми потоками
2		своевременные выплаты по обязательствам	риск роста просроченной дебиторской задолженности	банкротство контрагента, несвоевременная оплата услуг клиентами
3		расчетно-кассовые операции	риск некорректности расчетно-кассовых операций с ущербом	ошибки, нет контроля финансовой дисциплины, нет мотивации
4	Валютные операции	валютные контракты	риск финансовых потерь при изменении курса валют	контракты в иностранной валюте, изменение курса валюты
5		валютные вложения	риск убытков при изменении курса валют	рост курса по отношению к иностранной валюте
6		реализация финансовых вложений	риск невозможности реализации финансового актива на рынке в заданный срок	отсутствие спроса на реализуемый актив, изменение рыночной ситуации
7	Выплата налога	расчеты платежей по налогам	при формировании налоговой отчетности организации возможны ошибки расчетов	ошибки персонала при расчетах налогооблагаемой базы и начислении налога
8		уплата налогов	риск задержки и неполной уплаты налогов	отсутствие финансов, сбои ПО, ошибки персонала

Таблица 5
Факторы риска по материальным ресурсам
 Источник: составлено авторами.

Table 5
Risk factors for material resources
 Source: compiled by the authors.

№	Ресурс	Фактор	Описание риска по фактору	Источники риска по фактору
1	Техническое оборудование	наличие необходимого оборудования	риск нехватки необходимого оборудования	недостаточность финансирования
2		возможность своевременного ТО оборудования	риск несвоевременного ТО оборудования и его выхода из строя	малая надежность, низкая квалификации, нехватка финансирования
3		возможность проведения ремонта оборудования в случае отказов	риск невозможности ремонта при сбое оборудования	износ, нет своевременной замены устаревшего оборудования, низкая квалификация, нехватка финансирования
4	Энергоносители	э/э требуемых параметров	риск отключения э/э, перепады напряжения	сбой в поставке э/э, нарушение проводки
5		вода требуемых параметров	риск отключения подачи воды/падение давления / ухудшение параметров воды	сбой в деятельности энергопоставляющей компании, нарушение системы подачи воды
6		наличие топлива для оборудования	риск остановки технического оборудования	сбой в деятельности топливopоставляющей компании
7	Строительные материалы	поставка стройматериалов	риск недопоставки строительных материалов	сбой в поставляющей компании, недостаточность финансирования
8		качество строительных материалов	риск поставки некачественных строительных материалов	сбой в поставляющей компании, низкое качество работы приемки, недостаточность финансирования

Таблица 6
Факторы риска по интеллектуальным ресурсам
Источник: составлено авторами.

Table 6
Risk factors for intellectual resources
Source: compiled by the authors.

№	Ресурс	Фактор	Описание риска по фактору	Источники риска по фактору
1	Изобретения и патенты	интеллектуальная собственность	риск несоблюдения условий договоров	неукомплектованность квалифицированным персоналом
2		патентное законодательство	риск конфликта правовых норм	неукомплектованность квалифицированным персоналом
3		реализация изобретений	риск конфликта правовых норм	неукомплектованность квалифицированным персоналом
4	Репутационные ресурсы	доверие к организации	риск падения доверия клиентов, контрагентов	негативные публикации о качестве услуг, устойчивости
5		согласованность строительства с органами власти	риск изменения политической ситуации	введение санкций, решения правительства (замораживание строительства и др.)
6		устойчивость	риск изменения бизнес - ситуации	новые требования, конкуренция
7		форс-мажорные риски природного характера	риск возникновения ЧС природного и техногенного характера	стихийные бедствия, (землетрясения), техногенные катастрофы
8		форс-мажорные риски социального характера	риск возникновения чрезвычайных ситуаций социального характера	военные действия, террористические акты

Таблица 7
Матрица соответствия показателей эффективности ресурсообеспечения по шкале функции желательности Харрингтона
Источник: составлено авторами.

Table 7
The matrix of compliance of resource efficiency indicators on the scale of the Harrington desirability function
Source: compiled by the authors.

Фактор	Пределы				
	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
А. Трудовые ресурсы					
а1 – их наличие	100–90%	90–80%	80–70%	70–60%	60–50%
а2 – программы обучения персонала	За лучшее значение принимаются максимальные затраты на обучение в течение периода				
	1000–900	900–800	800–700	700–600	600–500
а3 – компетентность персонала	Число работников, которые прошли ежегодную подготовку				
	Более 33%	От 28 до 33%	От 23 до 28%	От 18 до 23%	От 13 до 18%
а4 – мотивация персонала	Оцениваем по количеству увольнений за период в %				
	0–10	10–20	20–30	30–40	40–50
а5 – исполнение обязанностей	Оценку проводим по коэффициенту частоты травматизма на строительстве				
	0–0,2	0,2–0,4	0,4–0,6	0,6–0,8	0,8–1,0

Фактор	Пределы				
	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
В. Информационные ресурсы					
Используемая технология (b1)	Оценивается ГОСТ Р ИСО серии 9000, адаптированный к строительной отрасли				
	Более 0,91	0,91–0,88	0,87–0,82	0,82–0,78	Менее 0,78
Внедрение новых технологий (b2)	Оценивается на основе результатов экспертного оценивания инноваций				
	Более 1,5	1,5–1	1–0,8	0,8–0,5	Менее 0,5
Устойчивость работы ПО (b3)	Оцениваем по вероятности безотказной работы ПО за заданное время [2]				
	1–0,95	0,95–0,90	0,90–0,85	0,85–0,80	Менее 0,80
Устойчивость оборудования (b4)	Оцениваем по вероятности безотказной работы оборудования за заданное время [2]				
	1–0,95	0,95–0,90	0,90–0,85	0,85–0,80	Менее 0,80
Защищенность информации (b5)	Оцениваем по уязвимости хоста				
	Менее 0,80	0,85–0,80	0,90–0,85	0,95–0,90	1–0,95
С. Материальные ресурсы					
Оборудование (c1)	100–95%	95–90%	90–85%	85–80%	Менее 80%
Электроэнергия (c2)	Параметром оценки надежности системы является вероятность безотказной работы				
	100–95%	95–90%	90–85%	85–80%	Менее 80%
Вода требуемых параметров (c3)	Параметром оценки надежности является вероятность безотказной работы				
	100–95%	95–90%	90–85%	85–80%	Менее 80%
Топливо (c4)	100–95%	95–90%	90–85%	85–80%	Менее 80%
Материалы (c5)	100–95%	95–90%	90–85%	85–80%	Менее 80%
Д. Финансовые ресурсы					
Кредитование (d1)	100–95%	95–90%	90–85%	85–80%	Менее 80%
Выплаты (d2)	100–95%	95–90%	90–85%	85–80%	Менее 80%
Расчеты (d3)	100–95%	95–90%	90–85%	85–80%	Менее 80%
Валютные контракты (d4)	Оцениваем по стабильности курса национальной валюты				
	100–95%	95–90%	90–85%	85–80%	Менее 80%
Валютные вложения (d5)	Оцениваем по уровню инфляции в год				
	Менее 1%	2–7%	8–14%	15–20%	Более 20%
Е. Интеллектуальные ресурсы					
Интеллектуальная собственность (e1)	15%	12%	9%	6%	3%
Доверие (e2)	100–95%	95–90%	90–85%	85–80%	Менее 80%
Согласование строительства (e3)	Сдача объекта в эксплуатацию	Сопровождение строительства	Проектной документации	Изыскательские работы	Исходная документация
Устойчивость (e4)	1	0,8	0,6	0,4	Менее 0,2
Поддержка в случае форс-мажорных рисков (e5)	Льготная ипотечная программа	Доступные банковские кредиты	Мораторий на финансовые санкции	Мораторий на обращение в суд за собой сроков	Мораторий на взыскание убытков

Таким образом, в качестве инструмента определения уровня ОТН применялся вероятностно-статистический подход, что объяснялось наличием факторов неопределенности и риска в процессе обеспечения ОТН [12, 13, 14].

Для примера практической оценки влияния ресурсообеспечения строительства на ОТН рассмотрим постройку здания, осуществляемую в три этапа. В течение времени строи-

тельства численные значения показателей эффективности ресурсообеспечения будут изменяться в соответствии с влиянием внешних случайных факторов, а также вследствие реализации принимаемых управленческих решений. Данные значения по каждому показателю на трех этапах строительства представлены в таблице 8.

Переведя представленные в таблице 8 значения показателей в масштаб шкалы функции желательности Харрингтона (с использованием таблицы 7) и построив диаграмму, отражающую влияние изменения характера ресурсообеспечения на ОТН строительства, мы

можем выявить наиболее проблемные (критические) направления работы для принятия соответствующих корректирующих управленческих решений. Диаграмма влияния ресурсообеспечения на ОТН здания на трех этапах его строительства представлена на рисунке.

Таблица 8
Значения показателей эффективности по этапам строительства здания
Источник: составлено авторами.

Table 8
Values of performance indicators by stages of building construction
Source: compiled by the authors.

Показатель	a1	a2	a3	a4	a5	b1	b2	b3	b4	b5	c1	c2	c3
Этап 1	75%	750	29%	35%	0,1	0,85	1,2	0,82	0,97	0,7	87%	87%	92%
Этап 2	85%	750	35%	25%	0,3	0,9	0,7	0,96	0,86	0,83	97%	97%	87%
Этап 3	85%	850	35%	10%	0,5	0,84	1,3	0,83	0,96	0,87	92%	78%	97%
Показатель	c4	c5	d1	d2	d3	d4	d5	e1	e2	e3	e4	e5	
Этап 1	72%	97%	87%	82%	97%	81%	13%	12%	86%	0,715	0,6	0,715	
Этап 2	87%	94%	82%	96%	96%	88%	13%	12%	81%	0,715	0,8	0,715	
Этап 3	88%	86%	92%	94%	86%	89%	13%	15%	96%	0,715	0,6	0,715	

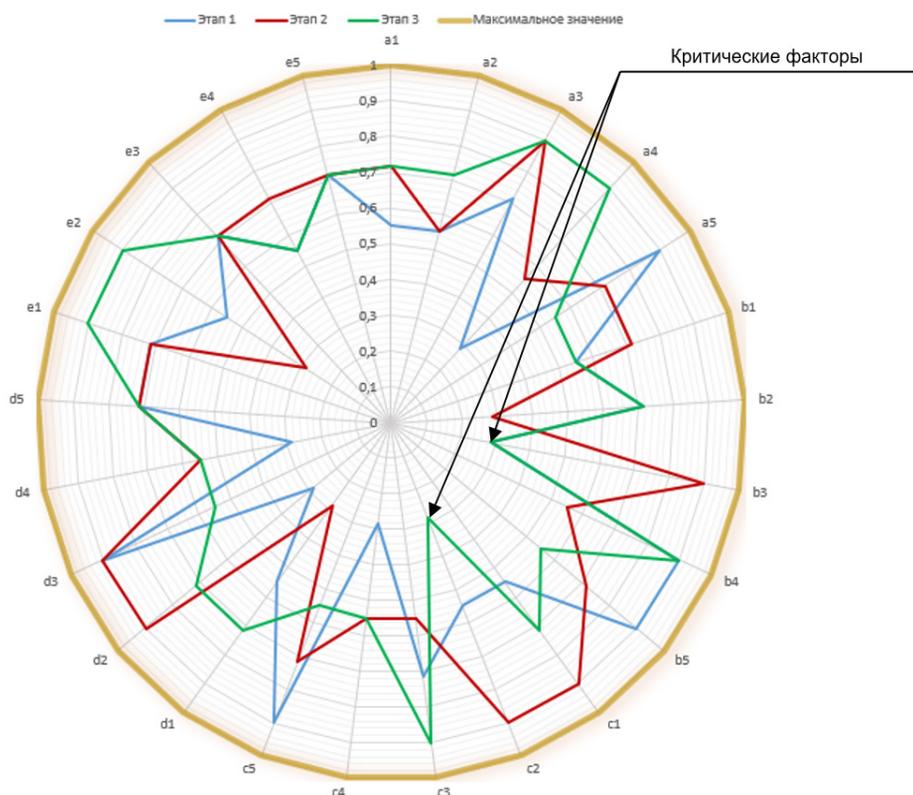


Рисунок – Диаграмма влияния ресурсообеспечения на ОТН здания на этапах его строительства
Источник: составлено авторами.

Figure – Diagram of the impact of resource supply on the OTR of a building at the stages of its construction
Source: compiled by the authors.

а1 – наличие трудовых ресурсов, а2 – программы обучения персонала, а3 – компетенция персонала, а4 – мотивация персонала, а5 – исполнение обязанностей, б1 – используемая технология, б2 – внедрение новых технологий, б3 – устойчивость работы ПО, б4 – надёжность оборудования, б5 – защищенность информации, с1 – наличие необходимого оборудования, с2 – снабжение строительства электроэнергией, с3 – снабжение строительства водой, с4 – снабжение строительства топливом, с5 – снабжение строительства материалами, d1 – своевременное кредитование строительства, d2 – своевременные выплаты по обязательствам организации, d3 – своевременное проведение расчетно-кассовых операций, d4 – валютные финансовые контракты, d5 – валютные финансовые вложения, е1 – договора на использование интеллектуальной собственности, е2 – доверие к организации у клиентов контрагентов, е3 – согласование строительства с органами власти, е4 – устойчивость бизнес-ситуации в отрасли, е5 – поддержка строительства в случае форс-мажорных рисков.

Отнесение того или иного фактора к критическому базируется на двух его характеристиках:

- устойчивый негативный градиент фактора на рассматриваемых этапах строительства;
- его минимальное значение на последнем рассматриваемом этапе.

Анализируя представленную диаграмму, можно отметить, что по представленному здесь строительству критическими факторами будут: устойчивость работы программного обеспечения (b3) и снабжение строительства электроэнергией (с2). Менее критичны, но требуют повышенного внимания: надлежащее исполнение обязанностей персоналом (а5), защищенность информации (b5), своевременное проведение расчетно-кассовых операций (d3), поставка строительных материалов (с5), устойчивость бизнес-ситуации в отрасли (е4).

Выявленный градиент состояния указанных критических факторов позволяет осуществить прогноз падения ОТН строительства в течение времени, примерно соответствующего продолжительности оцениваемых в работе периодов строительства. Можно ожидать сбой в работе программного обеспечения, а также срыв поставки электроэнергии, что в сумме с

большой долей вероятности приведет к следующим результатам:

- рост сроков строительства на период восстановления работоспособности программного обеспечения и электроснабжения, а также ликвидации последствий сбоя функционирования данных видов ресурсообеспечения, которые трудно прогнозируемы;

- рост стоимости строительства ввиду потребности замены программного обеспечения, а также вышедшего из строя электрооборудования;

- качество строительства, вероятно, не изменится ввиду отсутствия непосредственного влияния на него указанных факторов. Присутствующее же косвенное влияние легко купируется за счет продолжительных сроков строительства.

Выполненный анализ взаимовлияния факторов по видам потребляемых при строительстве ресурсов позволяет методом экспертных оценок получить интервальные значения по каждому фактору. Представленные интервальные значения (см. таблицу 7) определяют распределение факторов по видам ресурсов строительства и позволяют осуществить оценку организационно-технологической надежности процесса с учетом рисков ресурсообеспечения⁷.

Таким образом, одним из главных условий обеспечения ОТН строительства выступает его ресурсное обеспечение, где наиболее значимым является обеспечение трудовыми, финансовыми и материальными ресурсами. Кроме этого, важным будет не только процесс обеспечения, но и производственного их использования, что и определяет эффективность производственной деятельности строительной организации в целом и уровень ОТН строительства. Анализ факторов, влияющих на ОТН строительства, свидетельствующий о необходимости правильного расчета и рационального использования различных видов ресурсов при календарном планировании строительного производства с учетом вероятностной продолжительности работ, норм расхода, запасов и своевременности доставки. С учетом этого и должен производиться расчет эффективности показателей ресурсообеспечения строительства и уровня его ОТН.

⁷ Методы оценки риска. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010 – 2011, М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2012.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ рисков факторов ресурсоснабжения в исследовании проводился с учетом необходимости обеспечения главных показателей ОТН строительства (сроков строительства, качества работ и затрат). В соответствии с этим в качестве требований к системе ресурсообеспечения в исследовании приняты следующие:

- объемы запасов материальных средств должны быть на достаточном уровне для обеспечения бесперебойности строительного производства;
- необходимо максимально возможное сокращение объемов хранимых запасов;
- следует стремиться к минимизации суммарных затрат, связанных с созданием и хранением запасов на участке строительства.

2. Несмотря на то, что строительный процесс требует поставок всех базовых типов ресурсов (финансовых, материальных, информационных, интеллектуальных, трудовых), в рамках проведенного исследования на основе предложенной методики было установлено, что критическими точками (направлениями) в ресурсоснабжении будут: несвоевременность расчетов за ресурсы, нестабильность функционирования информационной системы ресурсоснабжения, низкая эффективность в связи с использованием морально и физически устаревших технологий и оборудования, низкая мотивация сотрудников и деловая репутация снабжающих организаций, а за последний год – сложность расчетов по валютным контрактам.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бартова Л.В., Бушмакина Н.В., Петухова Е.О. Водоснабжение и водоотведение многофункциональных комплексов // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2019. № 2. С. 95–105.
2. Борисюк Н.К., Смотрина О.С. К вопросу функционирования предприятия в нестабильной внешней среде // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2022. № 2. С. 24–30, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-2-24>.
3. Белов Д.Б., Игнатъев А.А., Соловьев С.И. Проблема погрешности измерений при коммерческом учете ресурса // Методы оценки соответствия. 2012. № 9. С. 20–24.
4. Белов Д.Б., Соловьев С.И. Определение значимости различий в результатах наблюдений объемов потребленного и поставленного ресурса статистическими методами // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 11. Тула: Изд-во ТулГУ. 2013. С. 110–115.

5. Белов Д.Б., Соловьев С.И. Применение регрессионного анализа для исследования процесса поставки и потребления энергетического ресурса // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 11. Ч. 1. С. 354–361. <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-regressionnogo-analiza-dlya-issledovaniya-protsesta-postavki-i-potrebleniya-energeticheskogo-resursa>.

6. Зеленцов Л. Б. Реализация строительных проектов изменяемого функционального назначения // Строительное производство. 2021. № 2. С. 26–32. https://doi.org/10.54950/26585340_2021_2_26.

7. Даулетбаев Р.Б., Вовк Б.В. Надежность строительных конструкций зданий и сооружений в процессе их эксплуатации // Инновации и инвестиции. 2019. № 5. С. 173–177.

8. Кузовкова Т.А., Кузовков Д.В., Кузовков А.Д. Экспертно-квалиметрический метод интегральной оценки эффективности инновационных проектов и применения новых технологий // Системы управления, связи и безопасности. 2016. №3. С. 23–28.

9. Маркин В.С., Мизя М.С. Управленческие методы минимизации рисков инвестиционно-строительных проектов в условиях неопределенности // Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий. 2020. № 4 (36). С. 52 – 57. <https://doi.org/10.24411/2225-8264-2020-10067>.

10. Лебедев В.М. Организационно-технологическая надежность управляющих систем строительства // Вестник МГСУ. 2008. № 4. Режим доступа: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsionno-tehnologicheskaya-nadezhnost-upravlyayuschih-sistem-stroitelstva-1> (дата обращения: 27.12.2022).

11. FalahKhalaf Ali Alrubaie The identity of the economic system in Iraq between the rentier state and the developmental state February 2021 // Future Journal of Pharmaceutical Sciences. 484(2019):12–38.

12. Oparina L.A. Application of information modelling technologies for construction time management // Smart Composite in Construction. 2021. Vol. 2. № 2. Pp. 48 – 55. https://doi.org/10.52957/27821919_2021_2_48.

13. O'Neill C., Gopaldasani V., Coman R. (2022) Factors that influence the effective use of safe work method statements for high-risk construction work in Australia - A literature review. Safety Science. Vol. 147, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105628>.

14. Vivek A., Rao H. (2022) Identification and analysing of risk factors affecting cost of construction projects. // International Conference on Latest Developments in Materials & Manufacturing. Vol. 60, Part 3, Pp. 1696 – 1701, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.228>.

REFERENCES

1. Bartova L. V., Bushmakina N. V., Petuhova E. O. Vodosnabzhenie i vodootvedenie mnogo-funktional'nyh kompleksov [Water supply and drainage of multifunctional complexes]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arhitektura*. 2019; 2: 95 – 105. (in Russ.)

2. Borisjuk, N. K., Smotrina, O. S. (2022) [Enterprise survival in an unstable environment]. *Intellect. Innovatsii. Investitsii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 2, pp. 24–30. (in Russ.) <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-2-24>

3. Belov D. B., Ignat'ev A. A., Solov'ev S. I. Problema pogreshnosti izmerenij pri kommercheskom uchete resursa [The problem of measurement error in commercial accounting of the resource]. *Metody ocenki sootvetstvija*. 2012; 9: 20–24. (in Russ.)

4. Belov D. B., Solov'ev S. I. Opredelenie znachimosti razlichij v rezul'tatah nabljudenij ob'emov potreblennogo i postavlennogo resursa statisticheskimi metodami [Determining the significance of differences in the results of observations of the volumes of consumed and supplied resources by statistical methods]. *Izvestija TulGU. Tehnicheskie nauki*. Vyp. 11. Tula: Izd-vo TulGU. 2013:110–115. (in Russ.)

5. Belov D. B., Solov'ev S. I. Primenenie regressionnogo analiza dlja issledovaniya processa postavki i potreblenija jenergeticheskogo resursa [Application of regression analysis to study the process of supply and consumption of energy resources]. *Izvestija TulGU. Tehnicheskie nauki*. 2014; Vyp. 11. Ch. 1: 354–361. (in Russ.) <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-regressionnogo-analiza-dlya-issledovaniya-processa-postavki-i-potrebleniya-energeticheskogo-resursa>.

6. Zelencov L. B. Realizacija stroitel'nyh projektov izmenjaemogo funkcional'nogo naznachenija [Implementation of construction projects of a variable functional purpose]. *Stroitel'noe proizvodstvo*. 2021; 2: 26 – 32. (in Russ.) https://doi.org/10.54950/26585340_2021_2_26. EDN: BZKXLZ

7. Dauletbaev R. B., Vovk B. V. Nadezhnost' stroitel'nyh konstrukcij zdaniy i sooruzhenij v processe ih jekspluatatsii [Reliability of building structures of buildings and structures during their operation]. *Innovatsii i investitsii*. 2019; 5:173–177. (in Russ.)

8. Kuzovkova T.A., Kuzovkov D.V., Kuzovkov A.D. Jekspertno-kvalimetriceskij metod integral'noj ocenki jeffektivnosti innovacionnyh projektov i primeneniya novyh tehnologij [Expert and qualimetric method for integral assessment of efficiency of innovative projects and application of new technologies]. *Sistemy upravlenija, svjazi i bezopasnosti*. 2016; 3: 23–28. (in Russ.)

9. Markin V.S., Mizya M.S. Management methods for minimizing the risks of investment and construction projects under uncertainty. *Herald of Siberian Institute of Business and Information Technologies*. 2020;(4): 52-57. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/2225-8264-2020-10067>

10. Lebedev V. M. Organizacionno-tehnologicheskaja nadezhnost' upravljajushhij sistem stroitel'stva [Organizational and technological reliability

of construction control systems]. *Vestnik MGSU*. 2008; 4. Available at: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsionno-tehnologicheskaya-nadezhnost-upravlyayuschih-sistem-stroitelstva-1> (assessed: 27.12.2022).

11. Falah Khalaf Ali Alrubaie The identity of the economic system in Iraq between the rentier state and the developmental state February 2021. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences*. 484(2019):12–38.

12. Oparina L. A. Application of information modelling technologies for construction time management. *Smart Composite in Construction*. 2021. Vol. 2. № 2. Rr. 48 – 55. https://doi.org/10.52957/27821919_2021_2_48. EDN: KNJPXR.

13. O'Neill C., Gopaldasani V., Coman R. (2022) Factors that influence the effective use of safe work method statements for high-risk construction work in Australia - A literature review. *Safety Science*. Vol. 147, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105628>.

14. Vivek A., Rao H. (2022) Identification and analysing of risk factors affecting cost of construction projects. *International Conference on Latest Developments in Materials & Manufacturing*. Vol. 60, Part 3, Pr. 1696 – 1701, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.228>.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Аль-Мсари Ахмед Абдул Руда Ауда Подготовка остальных частей статьи и оформление статьи.

Руденко А. А. Разработка системы показателей устойчивого развития Ресурсообеспечения и влияния на ОТН здания на этапах его строительства. Общее редактирование.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Al-Msari Ahmed Abdul Ruda Awda Preparation of the other parts of the article and the layout of the article.

Aleksandr A. Rudenko. Development of a system of indicators for the sustainable development of resource supply and the impact on OTR of a building at the stages of its construction. General editing.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аль-Мсари Ахмед Абдул Руда Ауда – аспирант.

Руденко Александр Алексеевич – д-р экон. наук, канд. техн. наук, проф., проф. кафедры «Организация строительства», SPIN-код: 6922-0113.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Al-Msari Ahmed Abdul Ruda Awda – Postgraduate student.

Aleksander A. Rudenko – Dr. of Sci., Cand. of Sci., Professor of the Construction Management Department, Professor, SPIN-код: 6922-0113.

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, представляемых в виде графиков, то приведите только один типичный график, а данные об имеющихся количественных отличиях между ними, представьте в таблице.

Способы представления результатов представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Обсуждение и заключение. Раздел содержит интерпретацию полученных результатов исследования, предположения о полученных фактах, сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

9. Список источников (References)

В список источников включаются только те источники, которые автор использовал при подготовке статьи. Оформление библиографического списка регламентируется ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 20–40 источников, но не более 50. Из них за последние 3 года – рекомендуется указать не менее 20, иностранных – не менее 15. Важно правильно оформить ссылку на источник.

Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет.

Источники указываются в конце статьи в алфавитном порядке либо в порядке упоминания в тексте статьи.

Приводится на русском языке и в латинице по образцу, представленному на сайте журнала.

Аффилиация. Фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, ORCID i, Scopus Author ID, ResearcherID, далее указать все места работы, должность, название организации, служебный адрес, электронная почта, телефон, e-mail. Приводится на русском и английском языках.

Технические требования к оформлению.

Формат А4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом упоминании должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подрисовочной подписью, и отдельными файлами с расширением (JPEG, GIF, BMP). Должны быть пронумерованы (Таблица 1 – Заголовок, Рисунок 1 – Наименование), озаглавлены (таблицы должны иметь заглавие, выравнивание по левому краю, а иллюстрации – подрисовочные подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы предоставляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

Общий порядок опубликования

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятыми редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

- с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;
- согласие на обработку персональных данных в научном периодическом издании;

При регистрации присваивается дата поступления и регистрационный номер статьи. Статьи регистрируются через электронную редакцию. Регистрация осуществляется бесплатно.

Первичная экспертиза на соответствие требованиям и профилю журнала (модерация). Зарегистрированные рукописи статей проходят первичную экспертизу на соответствие требованиям и профилю журнала. Началом для экспертизы рукописи статьи редакцией является дата регистрации статьи. Редакция журнала оставляет за собой право отбора присылаемых материалов. Только прошедшие первичную экспертизу рукописи статей, полностью соответствующие требованиям редакции журнала, соответствующие профилю журнала, получают статус «Принята к рассмотрению». Для них отдельно регистрируется дата приема рукописи статьи к рассмотрению.

Рецензирование. Принятые к рассмотрению рукописи статей направляются на слепое рецензирование для оценки их научного содержания нескольким специалистам соответствующего профиля, членам редакционной коллегии и/или редакционного совета. Экспертиза и рецензирование осуществляются бесплатно.

Решение о принятии к публикации основывается на поступивших рекомендациях рецензентов журнала. Если принято решение «рекомендовать с учетом исправления отмеченных недостатков», то автору направляются рекомендации и вопросы для исправления. Рукопись статьи, скорректированная автором, повторно направляется на рецензирование. Рукописи статей, не рекомендованные к публикации, повторно не рассматриваются. Автору рукописи направляется мотивированный отказ в публикации.

Редакционная подготовка. Рукописи статей, принятые к публикации, проходят редакционную подготовку к публикации – литературное редактирование и сверку данных, корректуру, форматирование, макетирование. Общий срок редакционной подготовки статьи, успешно прошедшей рецензирование, составляет 2 месяца в соответствии с периодичностью и графиком публикации выпусков. Корректуря 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.