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



научный рецензируемый журнал

•BECTHICK The Russian Automobile and Highway Industry Journal

"Vestnik SibADI"

Том 19, № 2. 2022 Vol. 19, №. 2. 2022

наука Science

образование

education

creation творчество

## innovations инновации

technology

технологии

tradition

## ВЕСТНИК СИБАДИ

## THE RUSSIAN AUTOMOBILE AND HIGHWAY INDUSTRY JOURNAL

### DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-2

TOM 19, № 2. 2022

### Сквозной номер выпуска – 84

#### Учредитель и издатель:

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

644080, г. Омск, проспект Мира, 5 Тел. +7 (3812) 65-88-30;

#### АДРЕС РЕДАКЦИИ

644080, г. Омск, проспект Мира, 5 Тел. +7 (3812) 65-88-30;

Издается с 2004 года Периодичность издания – 6 раза в год Подписной индекс в каталоге ООО «Урал-Пресс» 66000 VOL. 19, No. 2. 2022

Continuous issue – 84

#### Founder and Publisher:

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

644080, Omsk, 5, Mira Ave. Phone: +7 (3812) 65-88-30

### EDITORIAL POSTAL ADDRESS

644080, Omsk, 5, Mira Ave. Phone: +7 (3812) 65-88-30

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)», 2022

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

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

05.05.04 – Дорожные строительные и подъёмно-транспортные машины (технические науки),

05.22.01 – 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 ВИНИТИ РАН;

научной электронной библиотеке «Киберлениника».

#### Журнал является членом:

Directory of Open Access Journals (DOAJ), Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), CrossRef

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Подписано в печать 12.04.2022. Дата выхода в свет 29.04.2022. Формат 60×84 ¼ Гарнитура Arial. Печать оперативная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 27,25 Тираж 500 экз. Заказ 500 экземпляров. Свободная цена. Отпечатано в типографии Издательско-полиграфический комплекс Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия Контент доступен под лицензией СС ВҮ.

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)», 2022 "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

05.05.04 - Road construction and lifting machines (Technical Sciences),

05.22.01 - 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 gualified 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<sup>-</sup> EBSCO; Ulrichsweb Global Serials Directory; Google scholar The European Library; SOCIONET: VINITI RAS: Cyberlenika The Journal is a member of

the Directory of Open Access Journals (DOAJ), 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 12.04.2022. Publication date is 29.04.2022. Format is 60 × 84 1/8.

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

Content is available under license CC BY.

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

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

© Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", 2022

#### 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

Галдин Николай Семенович, д-р техн. наук, проф. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия Scopus Author ID 6602305514, Researcher ID D-9948-2019, ORCID ID 0000-0002-5104-7568

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

Певнев Николай Гаврилович, д-р техн. наук, проф., Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия Scopus Author ID 16526820600, ORCID ID 0000-0003-0525-5320 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

#### Строительство и архитектура

Сиротюк Виктор Владимирович, д-р техн. наук, проф., Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия Scopus Author ID 6602369365, Researcher ID B-7877-2019

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

### 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 0000-0002-0292-4421

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

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

Гумаров Гали Сагингалиевич, д-р техн. наук, проф., членкор. 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

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

Кондратенко Андрей Сергеевич, канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС)», ИГД СО РАН, г. Новосибирск, Россия Scopus Author ID 26423012100, Researcher ID Q-9926-2016, ORCID ID 0000-0002-7214-0104

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. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия

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

Корчагин Павел 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 57200726308, Researcher ID M-8902-2017, ORCID ID 0000-0001-8936-5679

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 0000-0002-2378-3947

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

Макеев Сергей Александрович, д-р техн. проф. наук Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия Scopus Author ID 57200729552. Researcher ID AAU-8361-2020.

ORCID 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, ORCID ID 0000-0002-4281-4358

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

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

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

Подшивалов Владимир Павлович, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

ORCID ID 0000-0002-2529-6018, Researcher ID E-4066-2018

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

Рассоха Владимир Иванович, д-р техн. наук, доц., проф., ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург, Россия

Scopus Author ID 57193742928, Researcher ID M-3242-2017, ORCID ID 0000-0002-7836-2242 Савельев Сергей Валерьевич, д-р техн. наук, доц., проф. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский

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

Scopus Author ID 5/159787800, 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. Днепропетровск, Украина Scopus Author ID 6505880056

Хомченко Вавилий Герасимович, д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «ОмГТУ», г. Омск, Россия Scopus Author ID 6603880234, Researcher ID P-8539-2015, ORCID ID 0000-0003-3151-7937

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

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

Эдвин Козневски, д-р техн. наук, проф., Белостокский технический университет г. Белосток, Польша Scopus Author ID 9843546900, ResearcherID 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 издательскополиграфического 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

Nikolai S. Galdin, 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 6602305514, Researcher ID D-9948-2019, ORCID ID 0000-0002-5104-7568

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

Nikolai G. Pevnev, 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 16526820600,

ORCID ID 0000-0003-0525-5320

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

#### Construction and architecture

Viktor V. Sirotyuk, 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 6602369365, Researcher ID B-7877-2019

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

#### **EDITORIAL BOARD**

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

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

Vitaliy S. Borovik, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Volgograd Science and Technology Center, Volgograd, Russia Scopus Author ID 57192819653, SPIN-код 3552-6019, ORCID ID 0000-0002-0292-4421

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. Gorvnin. 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

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

Andrey S. Kondratenko, Cand. of Sci. (Engineering), Siberian State University of Railway Transport (SGUPS), IGD SB RAS, Novosibirsk, Russia

Scopus Author ID 26423012100, Researcher ID Q-9926-2016, ORCID ID 0000-0002-7214-0104

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, of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia

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

Pavel A. Korchagin, 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 57200726308, Researcher ID M-8902-2017, ORCID ID 0000-0001-8936-5679

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

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

ORCID 0000-0001-8494-2852

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

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

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

ORCID ID 0000-0002-2378-3947

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

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

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

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

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

Yuriy V. Nemirovsky, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Federal State Budgetary Institution of Science «The Institute of Theoretical and Applied Mechanics named after S.A. Khristianovich» of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia Scopus Author ID 12759501600, 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 0000-0002-4034-2457, Researcher ID A-4081-2019 Václav Skala, Professor of the West Bohemia University, Plsen, Czech Republic

Scopus Author ID 7004643209, Researcher ID F-9141-2011, ORCID ID 0000-0001-8886-4281

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

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

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

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

Zhirgalbek S. Sharshembiev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Kyrgyz National Agrarian University named after K.I. Scriabin, Bishkek, Kyrgyz Republic,

Scopus Author ID 57216812633, Author ID B PUHL 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

Edwin Koźniewski, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Bialystok, Poland

Scopus Author ID 9843546900, Researcher ID N-3447-2017, ORCID ID 0000-0001-7052-9602

Natalia V. Yakunina, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor, Orenburg State University, Orenburg, Russia

Scopus Author ID 55673113100, Researcher ID E-9038-2015, ORCID ID 0000-0002-8952-2694

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

Tatyana V. Kuprina

Executive Journal Secretary e-mail: vestnik\_sibadi@sibadi.org

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

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

## PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Mikhail S. Korytov, Irina E. Kashapova, Vitalii S. Shcherbakov QUASI-ZERO RIGIDITY CONDITION FOR STATIC FORCE CHARACTERISTIC OF PARALLELOGRAM MECHANISM FOR SEAT VIBRATION PROTECTION SYSTEM 145
Roman Yu. Sukharev PURE PURSUIT METHOD USE TO CONTROL UNMANNED MOTOR GRADER
Denis V. Furmanov, Nikita E. Lysakov, Leonid M. Shamakhov EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL JUSTIFICATION OF ASPHALT CONCRETE CUTTING PROCESS BY ROAD MILLING MACHINE WORKING EQUIPMENT
PART II. TRANSPORT
Elena V. Bondarenko, Andrei A. Filippov, Ilnar F. Suleymanov, Shamil M. Minatullayev SYSTEMATIC ASSESSMENT OF STREET AND ROAD NETWORK IMPACT ON ATMOSPHERE OF URBANISED AREA
Sergei S. Voitenkov, Mikhail V. Banket DETERMINATION OF PEDESTRIAN ACCESSIBILITY FOR URBAN PUBLIC TRANSPORT STOPS
Valerii M. Kurganov, Aleksei N. Dorofeev, Mikhail V. Griaznov WAYBILL FUNCTIONALITY IN TRANSPORTATION MANAGEMENT SYSTEM
Elena V. Pechatnova, Vasiliy N. Kuznetsov FACTORS CAUSING ROAD TRAFFIC ACCIDENTS WITH PARTICLARLY SERIOUS CONSEQUENCES225
Olga Y. Smirnova, Yuliya A. Ertman DIGITAL TECHNOLOGIES FOR OVERSIZE GOODS ROAD TRANSPORTATION
Jiang Haiyan TRAFFIC OPTIMIZATION BASED ON A MACROSCOPIC FUNDAMENTAL DIAGRAM IN URBAN BIZONAL SYSTEM
Konstantin V. Chernyshov, Viacheslav V. Novikov, Rustam R. Sanzhapov, Vladislav V. Kotov ANALYSIS OF SHOCK ABSORBER RESISTANCE IMPACT ON LOAD SAFETY, CONTINUOUS WHEEL ROLLING AND ENERGY LOSS IN VEHICLE SUSPENSION
Ivan N. Yakunin, Andrey P. Fot, Nikolay N. Yakunin, Almira F. Fattakhova FUNCTIONAL MODEL OF ROAD SAFETY FOR MOTOR TRANSPORT ENTERPRISE WITH ACCOUNT OF HIGH ENVIRONMENTAL TEMPERATURES
PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE
Yuriy V. Krasnoshchekov PROTECTION AGAINST PROGRESSIVE COLLAPSE OF BUILDINGS WITH PRECAST REINFORCED CONCRETE FLOORS
Emmanuel Mikerego, Justin Ndikumana CONCRETE AS A FACTOR IN REINFORCED CONCRETE BUILDINGS COLLAPSE IN BURUNDI





## РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ



## PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

УДК 62-752.2 https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-144-155 https://elibrary.ru/AOPYVO Научная статья



## УСЛОВИЕ КВАЗИНУЛЕВОЙ ЖЕСТКОСТИ СТАТИЧЕСКОЙ СИЛОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРАЛЛЕЛОГРАММНОГО МЕХАНИЗМА ВИБРОЗАЩИТНОЙ СИСТЕМЫ СИДЕНЬЯ

### М. С. Корытов, И. Е. Кашапова, В. С. Щербаков

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

kms142@mail.ru, http://orcid.org/0000-0002-5104-7568, iriska-97-17-13@mail.ru, http://orcid.org/0000-0002-0631-564X, sherbakov\_vs@sibadi.org, https://orcid.org/0000-0002-3084-2271 \*ответственный автор

#### АННОТАЦИЯ

Веедение. Снижение вибрационных воздействий на операторов машин является актуальной задачей, позволяет минимизировать влияние вибраций на здоровье, повысить работоспособность и внимание. Могут быть повышены точность и производительность работ. Проблема защиты от вибраций актуальна для всех видов машин, рабочие органы которых взаимодействуют с грунтом и дорожным покрытием. Одним из направлений снижения воздействий, наряду с виброзащитой кабин, является разработка систем виброзащиты сидений операторов. Перспективным является применение эффекта квазинулевой жесткости, что позволяет эффективно подавлять низкочастотные колебания. Для предложенной конструкции на основе параллелограммного механизма необходимо определить условие горизонтальности среднего участка статической силовой характеристики.

**Материалы и методы.** Для разработанной расчетной схемы с использованием известных силовых статических и геометрических соотношений выведены обладающие новизной аналитические зависимости между параметрами исходных данных и вертикальной подъемной силой механизма. К исходным параметрам относятся линейные размеры механизма, размер зоны квазинулевой жесткости, масса кресла с оператором и жесткость пружины. При выводе аналитических зависимостей использовались координаты подвижных и неподвижных относительно собственного основания точек механизма.

**Результаты.** Применение разработанных аналитических зависимостей позволяет для заданных параметров исходных данных построить статическую силовую характеристику механизма. Средний участок характеристики близок к горизонтальному, но в общем случае не является горизонтальным. В качестве примера для набора значений исходных данных приведена статическая характеристика, средняя часть которой не горизонтальна. Приравнивание значений вертикальной силы механизма в левой и правой граничной точках средней части характеристики позволило вывести аналитические зависимости обеспечения квазинулевой жесткости.

**Обсуждение и заключение.** Полученные аналитические выражения обеспечения горизонтальности среднего участка статической силовой характеристики были верифицированы. Применение выведенных условий уменьшает на единицу число параметров исходных данных. Увеличение двух размерных параметров механизма существенно уменьшает требуемую жесткость пружины механизма, что снижает металлоемкость.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** вибрации, виброзащита, статическая характеристика, аналитический, квазинулевая жесткость.

**БЛАГОДАРНОСТИ.** Авторы статьи выражают благодарность за нелегкий труд и экспертное мнение рецензенту, работавшему с данной статьей.

Статья поступила в редакцию 04.01.2022; одобрена после рецензирования 19.01.2022; принята к публикации 12.04.2022.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

© Корытов М. С., Кашапова И. Е., Щербаков В. С., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.



Для цитирования: Корытов М.С. Условие квазинулевой жесткости статической силовой характеристики параллелограммного механизма виброзащитной системы сиденья / М.С. Корытов, И.Е. Кашапова, В.С. Щербаков // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 2(84). С. 144-155. https://doi.org/10.26518/2071-7296- 2021-19-2-144-155

https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-144-155 https://elibrary.ru/AOPYVO Original article

### QUASI-ZERO RIGIDITY CONDITION FOR STATIC FORCE CHARACTERISTIC OF PARALLELOGRAM MECHANISM FOR SEAT VIBRATION PROTECTION SYSTEM

Mikhail S. Korytov\*, Irina E. Kashapova, Vitalii S. Shcherbakov Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia kms142@mail.ru, http://orcid.org/0000-0002-5104-7568, iriska-97-17-13@mail.ru, http://orcid.org/0000-0002-0631-564X, sherbakov\_vs@sibadi.org, https://orcid.org/0000-0002-3084-2271 \*corresponding author

#### ABSTRACT

**Introduction.** Reducing vibration effects on machine operators is an urgent task; it allows to minimize the impact of vibrations on health, increase efficiency and attention. Accuracy and productivity can be improved. The problem of vibration protection is relevant for all types of machines, the working bodies of which interact with the soil and road surface. One of the impact reduction directions, along with vibration protection of cabs, is the development of vibration protection systems for operator seats. It is promising to use the effect of quasi-zero rigidity, which makes it possible to effectively damp low-frequency oscillations. For the proposed design based on a parallelogram mechanism, it is necessary to determine the condition for the horizontalness of the middle section of the static power characteristic. **Materials and Methods.** For the developed design scheme, using well-known power static and geometric relationships, novel analytical relationships between the parameters of the initial data and the vertical lifting force of the mechanism were derived. The initial parameters include the linear dimensions of the mechanism, the size of the quasi-zero rigidity zone, the weight of the chair with the operator, and the spring stiffness. When deriving analytical dependencies, the coordinates of the points of the mechanism moving and stationary relative to their own base were used. **Results.** The use of the developed analytical dependencies allows, for the given parameters of the initial data, to build a static power characteristic of the mechanism. The middle section of the characteristic is close to horizontal, to prove the accuracy and the spring analytical dependencies allows, for the given parameters of the initial data, to build a static power characteristic of the mechanism. The middle section of the characteristic is close to horizontal, but in general the parameters is close to horizontal.

but in general it is not horizontal. As an example, a static characteristic is given for a set of initial data values, the middle part of which is not horizontal. Equating the values of the vertical force of the mechanism at the left and right boundary points of the middle part of the characteristic made it possible to determine analytical dependences for ensuring quasi-zero rigidity.

**Discussion and conclusions.** The obtained analytical expressions for ensuring the horizontalness of the middle section of the static power characteristic were verified. Applying the derived conditions decreases the number of parameters in the original data by one. An increase in the two dimensional parameters of the mechanism significantly reduces the required rigidity of the mechanism spring, which reduces the metal consumption.

KEYWORDS: vibration, vibration protection, static characteristic, analytical, quasi-zero rigidity.

**ACKNOWLEDGMENTS:** The authors of the article express their gratitude for the hard work and expert opinion to the reviewer who worked with this article.

## The article was submitted 04.01.2022; approved after reviewing 19.01.2022; accepted for publication 13.04.2022.

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:* Korytov M. S, Kashapova I. E., Shcherbakov V. S. Quasi-zero rigidity condition for static force characteristic of parallelogram mechanism for seat vibration protection system. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2022; 19 (2): 144-155 https://doi.org/10.26518/2071-7296- 2021-19-2-144-155

© Korytov M. S., Kashapova I. E., Shcherbakov V. S., 2022



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



#### введение

Проблема защиты операторов строительных, дорожных и подъемно-транспортных машин от производственных вибраций является актуальной. Работа большинства видов строительных, дорожных и подъемно-транспортных машин связана с вращением либо ударными воздействиями рабочих органов [1]. Многочисленные исследования показывают, что организм человека весьма чувствителен к вибрациям различных частотных диапазонов. Продолжительное воздействие вибрационной нагрузки может не только вызывать дискомфорт, потерю внимательности и работоспособности операторов мобильных машин [2], но и вызывать заболевания работников этих машин, особенно при длительных повторяющихся воздействиях [3]. Так, например, диапазоны частот вибрации от 20 до 250 Гц и от 4 8 Гц приводят к наиболее сильным отрило цательным воздействиям на нервную систему и на внутренние органы человека [4]. Операторы ручных машин вибрационного типа, используемых в дорожном строительстве или в сельскохозяйственном производстве (например, ручных трамбовок, молотов, кусторезов и т. д.), могут приобретать в процессе работы синдром вибрации кисти руки и периферические неврологические расстройства. Сильные вибрационные воздействия способны даже вызывать механические травмы операторов [2].

Не менее серьезные последствия вызывают вибрации, которые передаются через сиденье оператора машины [5]. Машины и инструменты с мощным электрическим, гидравлическим и пневматическим приводом применяются не только при строительстве сооружений [6, 7] и в сельском хозяйстве [8], но и в горнодобывающем комплексе [9], при разработке карьеров [10, 11], сносе зданий [12], уборке территорий [13] и, конечно, в дорожном строительстве [14]. Помимо того, что вибрации наносят вред здоровью операторов, они снижают скорость их реакции на производственные ситуации [15], что приводит к снижению производительности выполняемых работ. Кроме того, вибрации элементов строительных, дорожных и подъемно-транспортных машин вызывают снижение их ресурса, повышенный износ подвижных соединений и преждевременную потерю их работоспособности [16].

Чтобы свести к минимуму риски возникновения вибрационных травм, повысить ресурс элементов машин, снизить утомляемость операторов, применяют различные виброзащитные системы. Можно выделить два магистральных направления виброзащиты операторов: применение систем виброизоляции кабин операторов [17, 18] и сидений операторов [19]. Оба варианта не исключают их совместного применения.

Одним из перспективных направлений развития виброзащитных систем в настоящее время выступает применение эффекта квазинулевой жесткости [20, 21]. Применение данного эффекта позволяет более эффективно подавлять низкочастотные и сверхнизкочастотные колебания виброзащищаемой массы [22], которые характерны для динамических систем сидений операторов строительных, дорожных и подъемно-транспортных машин [20].

Была предложена конструкция виброзащитной системы сиденья оператора на основе параллелограммного механизма<sup>1</sup> (рисунок 1), с помощью которой может быть реализован эффект квазинулевой жесткости в средней части статической характеристики [20]. Трос механизма, растянутый при помощи пружины растяжения, постоянно огибает ролики в точках 1, 2 и 4, и только вне зоны квазинулевой жесткости огибает также ролик в точке 3 (или 3'), что обеспечивает возрастание и убывание значения силы в левой и правой частях статической характеристики соответственно (рисунок 2), то есть ограничиваются вертикальные перемешения кресла без использования дополнительных пружин или отбойников.

Из рисунка 2, полученного для массы виброзащищаемого объекта m = 200 кг, высоты зоны квазинулевой жесткости  $h_{qz} = 0.05$  м и жесткости пружины  $c_s = 200000$  Н/м, следует, что условие горизонтальности среднего участ-ка статической характеристики, что эквивалентно квазинулевой жесткости, не всегда выполняется в полной мере. Для предложенного обладающего новизной механизма виброзащитной системы (см. рисунок 1) в научной литературе отсутствуют результаты исследований и аналитические зависимости силовых

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Пат. 206711 Российская Федерация, МПК B60N 2/50. Виброзащитная система сиденья оператора / Почекуева И. Е., Корытов М. С., Щербаков В. С.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибА-ДИ)» (RU); № 2021111734; заявл. 26.04.21; опубл. 23.09.21. Бюл. № 27. 6 с.

#### PART I



Рисунок 1 – Расчетная схема виброзащитной системы сиденья оператора на основе параллелограммного механизма с тросовыми элементами, пружиной и роликами Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Calculation diagram of an operator's seat vibration protection system based on a parallelogram mechanism with cable elements, spring and rollers Source: compiled by the authors.



Рисунок 2– Статическая силовая характеристика предложенного механизма (пример) Источник: составлено авторами.

> Figure 2 – Static force characteristic of the proposed mechanism (example) Source: compiled by the authors.

параметров системы от конструктивных размеров и параметров, а также не исследованы условия обеспечения горизонтальности средней части статической характеристики.

В связи с этим необходимо решить задачи вывода указанных аналитических зависимостей и условий и исследовать полученные зависимости.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Используя разработанную расчетную схему предложенного механизма (см. рисунок 1), новизна которого подтверждена патентом Российской Федерации (см. сноску выше), а также известные статические и геометрические размерные и силовые соотношения были получены приведенные ниже аналитические выражения. Механизм рассматривался в неподвижной относительно основания системе координат 0*XY*.

Сумма моментов сил определялась относительно точки 0 поворота нижнего подвижного звена параллелограммного механизма. В формулах использовались следующие обозначения (см. рисунок 1): т – масса виброзащищаемого объекта (кресла с оператором); Р, – создаваемая механизмом сила подъема, направленная вдоль оси правого бокового звена параллелограмма (выходной параметр статической силовой характеристики); da – текущий угол подъема верхнего и нижнего звеньев параллелограммного механизма относительно горизонтальной оси 0X; h<sub>a</sub> - высота подъема виброзащищаемого объекта совместно с правым боковым звеном механизма; h<sub>az</sub> – высота зоны квазинулевой жесткости (средней части характеристики); L<sub>1</sub> – длина верхнего и нижнего звеньев параллелограмма; у, – длина левого и правого боковых звеньев параллелограмма; у – угол между отрезком троса между точками 1 и 2 и левым боковым звеном параллелограммного механизма при прямоугольной форме последнего; а, – постоянное абсолютное значение угла между осью 0Х и прямой 03 (03'); L<sub>ь</sub> – плечо действия силы тяжести массы т кресла с оператором относительно точки 0 (при параллельности гравитационной вертикали и оси ОУ); b – постоянная длина отрезка 0-1 на оси 0 У; с - постоянная длина отрезка 0-2, расположенного на нижнем подвижном звене параллелограмма; L<sub>so</sub> – длина пружины растяжения в несдеформированном состоянии (когда статическая сила растяжения пружины равна нулю); L<sub>s</sub> – текущая длина пружины растяжения; с – коэффициент жесткости пружины растяжения; dL<sub>snom</sub>деформация пружины растяжения относительно собственной свободной длины L<sub>so</sub>, соответствующая прямоугольной форме параллелограммного механизма и его номинальной подъемной силе; Р - текущая сила растяжения пружины и натяжения троса;  $L_{12}$ ,  $L_{23}$ ,  $L_{34}$ , L<sub>24</sub> – расстояния между соответствующими индексам точками механизма, через которые проходит трос;  $h_{12}$ ,  $h_{23}$ ,  $h_{34}$  – плечи действия силы растяжения троса, действующей вдоль соответствующих отрезков, относительно точки 0 механизма; M<sub>12</sub>, M<sub>23</sub>, M<sub>34</sub> – моменты, создаваемые силой растяжения троса, действующей вдоль соответствующих отрезков, относительно точки 0 механизма.

Также использовались обозначения координат x и y подвижных и неподвижных (относительно основания кресла) точек механизма 0...4 с соответствующими числовыми индексами. Вертикальная координата точки 3':  $y_{3'} = -y_{3}$ .

В набор исходных параметров для построения статической силовой характеристики входят линейные размеры механизма, размер зоны квазинулевой жесткости, масса кресла с оператором и жесткость пружины: *b*, *c*, *L*<sub>1</sub>, *y*<sub>r</sub>, *x*<sub>3</sub>, *h*<sub>az</sub>, *m*, *c*<sub>s</sub>.

Граничное значение угла поворота параллелограмма, при котором трос начинает контактировать с верхним 3 или нижним 3' роликами, зависит только от размеров зоны квазинулевой жесткости и длины нижней стороны параллелограмма и определяется из соотношения сторон прямоугольного треугольника

$$\alpha_3 = \arcsin\left(\frac{h_{qz}}{2 \cdot L_1}\right). \tag{1}$$

Далее, при заданном горизонтальном размере *x*<sub>3</sub> могут быть определены вертикальные координаты точек 3 и 3':

$$y_{3} = \tan(\alpha_{3}) \cdot x_{3} = \frac{h_{qz} x_{3}}{2L_{1} \sqrt{1 - \frac{h_{qz}^{2}}{4L_{1}^{2}}}}.$$
 (2)

Для середины хода механизма (когда он имеет прямоугольную форму), координаты точек 1, 2 и 4 будут равны

$$x_1 = 0; y_1 = b; x_2 = c; y_2 = 0; x_4 = L_1; y_4 = 0.$$
 (3)

Тогда длина отрезка 1-2 в середине хода

$$L_{12} = \sqrt{\left(x_1 - x_2\right)^2 + \left(y_1 - y_2\right)^2} = \sqrt{b^2 + c^2} .$$
 (4)

Длина отрезка 2-4 в середине хода

$$L_{24} = \sqrt{\left(x_2 - x_4\right)^2 + \left(y_2 - y_4\right)^2} = L_1 - c.$$
 (5)

Угол ү в середине хода

$$\gamma = \arccos\left(\frac{L_{12}^2 + b^2 - c^2}{2 \cdot L_{12} \cdot b}\right) = \arccos\left(\frac{b}{\sqrt{b^2 + c^2}}\right).$$
 (6)

Плечо силы растяжения троса, действующей вдоль отрезка 1–2 в середине хода механизма,

$$h_{12} = b \cdot \sin(\gamma) = b \sqrt{1 - \frac{b^2}{b^2 + c^2}}$$
 (7)

Момент силы тяжести, создаваемый сиденьем с оператором относительно точки 0 в середине хода (при условии параллельности оси 0Y и гравитационной вертикали), который должен уравновешивать механизм:

$$M_g = m \cdot g \cdot L_1 \,. \tag{8}$$

Сила растяжения пружины и троса, действующая на точку 2, и уравновешивающая момент М<sub>а</sub> в середине хода:

$$P_{s} = \frac{M_{g}}{h_{12}} = \frac{L_{1} \cdot g \cdot m}{b \sqrt{1 - \frac{b^{2}}{b^{2} + c^{2}}}}.$$
 (9)

Номинальная деформация (растяжение) пружины в середине хода механизма

$$dL_{snom} = \frac{P_s}{c_s} = \frac{L_1 \cdot g \cdot m}{b \cdot c_s \cdot \sqrt{1 - \frac{b^2}{b^2 + c^2}}} .$$
 (10)

Дополнительная (корректирующая) длина троса

$$kL_{s} = L_{12} + L_{24} - dL_{snom} =$$

$$= L_{1} - c + \sqrt{b^{2} + c^{2}} - \frac{L_{1} \cdot g \cdot m}{b \cdot c_{s} \cdot \sqrt{1 - \frac{b^{2}}{b^{2} + c^{2}}}}.$$
 (11)

Данный параметр необходим для вычисления в дальнейшем текущей деформации пружины растяжения в положениях, отличных от середины хода механизма.

Параметры, определяемые по выражениям (1)...(11) для середины хода механизма, определяются однократно.

Далее для вычисления вертикальной силы механизма при любом значении высоты подъема механизма  $h_g \neq 0$  может быть использована приведенная ниже последовательность формул.

Текущий угол подъема механизма

$$d\alpha = \arcsin\left(\frac{h_g}{L_1}\right).$$
 (12)

Плечо действия силы тяжести сиденья с оператором относительно точки 0

$$L_h = \frac{h_g}{\tan(d\alpha)} \,. \tag{13}$$

Текущие координаты подвижных точек механизма

$$x_{2} = c \cdot \cos(d\alpha); \quad y_{2} = c \cdot \sin(d\alpha);$$
  

$$x_{4} = L_{1} \cdot \cos(d\alpha); \quad y_{4} = L_{1} \cdot \sin(d\alpha).$$
(14)

Длина отрезка троса 1-2

$$L_{12} = \sqrt{\left(x_1 - x_2\right)^2 + \left(y_1 - y_2\right)^2} .$$
 (15)

Если  $h_g > 0$ :

$$L_{23} = \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2};$$
  

$$L_{34} = \sqrt{(x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2}.$$
(16)

Если  $h_g \leq 0$ :

$$L_{23} = \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - (-y_3))^2};$$
  

$$L_{34} = \sqrt{(x_3 - x_4)^2 + ((-y_3) - y_4)^2}.$$
(17)

Плечо силы растяжения троса, действующей вдоль отрезка 1–2, может быть определено через координаты точек 0, 1 и 2, по известной формуле расстояния между точкой и прямой (учитывая, что обе координаты точки 0 – нулевые) [23]:

$$h_{12} = \frac{|x_2 \cdot y_1 - y_2 \cdot x_1|}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}.$$
 (18)



Если  $|d\alpha| > \alpha_3$  (есть огибание тросом ролика в точке 3(3'), механизм вне зоны квазинулевой жесткости), то суммарная длина троса равна

$$L_{\Sigma} = L_{12} + L_{23} + L_{34} \,. \tag{19}$$

Если |*d*α|≤α<sub>3</sub> (нет огибания тросом ролика в точке 3(3'), механизм в зоне квазинулевой жесткости)

$$L_{24} = \sqrt{\left(x_2 - x_4\right)^2 + \left(y_2 - y_4\right)^2} .$$
 (20)

$$L_{\Sigma} = L_{12} + L_{24} \,. \tag{21}$$

Текущая длина пружины при любом положении механизма

$$L_s = L_{\Sigma} - kL_s \,. \tag{22}$$

Сила растяжения пружины

$$P_s = c_s \cdot L_s \,. \tag{23}$$

Момент, создаваемый силой растяжения троса, действующей вдоль отрезка 1-2, и приложенной к точке 2 механизма

$$M_{12} = P_s \cdot h_{12} \,. \tag{24}$$

Если  $|d\alpha| > \alpha_3$  и  $h_g > 0$  (есть огибание тросом ролика в верхней точке 3, механизм смещен вверх, находится вне зоны квазинулевой жесткости):

$$h_{23} = \frac{|x_3 \cdot y_2 - y_3 \cdot x_2|}{\sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2}}; \quad M_{23} = P_s \cdot h_{23};$$

$$h_{34} = \frac{|x_4 \cdot y_3 - y_4 \cdot x_3|}{\sqrt{(x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2}}; \quad M_{34} = P_s \cdot h_{34};$$
(25)

Сумма моментов от троса при использовании зависимостей (25)

$$M_{\Sigma} = M_{12} - M_{23} - M_{34} \,. \tag{26}$$

Если  $|d\alpha| > \alpha_3$  и  $h_g \le 0$  (есть огибание тросом ролика в нижней точке 3', механизм смещен вниз, находится вне зоны квазинулевой жесткости):

$$h_{23} = \frac{\left|x_{3} \cdot y_{2} - (-y_{3}) \cdot x_{2}\right|}{\sqrt{\left(x_{2} - x_{3}\right)^{2} + \left(y_{2} - (-y_{3})\right)^{2}}}; M_{23} = P_{s} \cdot h_{23};$$

$$h_{34} = \frac{\left|x_{4} \cdot (-y_{3}) - y_{4} \cdot x_{3}\right|}{\sqrt{\left(x_{3} - x_{4}\right)^{2} + \left((-y_{3}) - y_{4}\right)^{2}}}; M_{34} = P_{s} \cdot h_{34}.$$
(27)

Сумма моментов от троса при использовании зависимостей (27)

$$M_{\Sigma} = M_{12} + M_{23} + M_{34}.$$
 (28)

Если  $|d\alpha| \le \alpha_3$  (механизм в зоне квазинулевой жесткости), то сумма моментов от троса равна

$$M_{\Sigma} = M_{12}$$
. (29)

После определения суммы моментов от троса, для любого положения механизма может быть определена создаваемая им вертикальная сила

$$P_{\nu} = \frac{M_{\Sigma}}{L_{h}} \,. \tag{30}$$

#### РЕЗУЛЬТАТЫ

Применение зависимостей (12)...(30) для последовательности значений  $h_g$  позволяет построить статическую характеристику  $P_v = f(h_g)$  механизма с заданными размерами и исходными параметрами массы виброзащищаемого объекта и коэффициента жесткости пружины. Так, например, характеристика, приведенная на рисунке 2, была получена для значений исходных данных b = 0,1 м, c = 0,1 м,  $L_1 = 0,5$  м,  $y_r = 0,1$  м,  $x_3 = 0,1$  м,  $h_{qz} = 0,05$  м, m = 200 кг,  $c_s = 200$  000 H/м.

Для определения условий полного обеспечения квазинулевой жесткости выразим условие горизонтальности среднего участка статической характеристики как равенство силы в левой и правой граничных точках среднего участка:

$$P_{v}\left(-h_{qz} / 2\right) = P_{v}\left(h_{qz} / 2\right).$$
(31)

При подстановке в выражения (12)...(30) двух значений  $h_g = -h_{qz}/2$  и  $h_g = h_{qz}/2$ , опуская промежуточные формулы, после упрощения получим

TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

$$P_{v}(-h_{qz}/2) = \frac{b \cdot c \cdot c_{s} \left( \frac{\sqrt{L_{1} \cdot b^{2} + h_{qz} \cdot b \cdot c + L_{1} \cdot c^{2}}}{\sqrt{L_{1}} - \sqrt{b^{2} + c^{2}} + \frac{L_{1} \cdot g \cdot m \sqrt{b^{2} + c^{2}}}{b \cdot c \cdot c_{s}} \right)}{\sqrt{L_{1}} \cdot \sqrt{L_{1} \cdot b^{2} + h_{qz} \cdot b \cdot c + L_{1} \cdot c^{2}}}.$$
(32)

$$P_{v}(h_{qz}/2) = \frac{b \cdot c \cdot c_{s}\left(\frac{\sqrt{L_{1} \cdot b^{2} - h_{qz} \cdot b \cdot c + L_{1} \cdot c^{2}}}{\sqrt{L_{1}} - \sqrt{b^{2} + c^{2}} + \frac{L_{1} \cdot g \cdot m\sqrt{b^{2} + c^{2}}}{b \cdot c \cdot c_{s}}\right)}{\sqrt{L_{1}} \cdot \sqrt{L_{1} \cdot b^{2} - h_{qz} \cdot b \cdot c + L_{1} \cdot c^{2}}}.$$
(33)

Решение уравнения (31) относительно неизвестной переменной массы т имеет вид

$$m = -\frac{\frac{b \cdot c \cdot c_s \left(\frac{\sigma_2}{\sqrt{L_1}} - \sigma_3\right)}{\sqrt{L_1} \cdot \sigma_2} - \frac{b \cdot c \cdot c_s \left(\frac{\sigma_1}{\sqrt{L_1}} - \sigma_3\right)}{\sqrt{L_1} \cdot \sigma_1}}{\frac{\sqrt{L_1} \cdot g \cdot \sigma_3}{\sigma_2} - \frac{\sqrt{L_1} \cdot g \cdot \sigma_3}{\sigma_1}},$$
(34)

где

$$\sigma_{1} = \sqrt{L_{1} \cdot b^{2} - h_{qz} \cdot b \cdot c + L_{1} \cdot c^{2}};$$

$$\sigma_{2} = \sqrt{L_{1} \cdot b^{2} + h_{qz} \cdot b \cdot c + L_{1} \cdot c^{2}}; \quad \sigma_{3} = \sqrt{b^{2} + c^{2}}.$$
(35)

После упрощения выражение (34) принимает вид

$$m = \frac{b \cdot c \cdot c_s}{L_1 \cdot g}.$$
 (36)

Решение уравнения (31) относительно неизвестной переменной коэффициента жесткости пружины *с* имеет вид

$$c_s = \frac{L_1 \cdot g \cdot m}{b \cdot c} \,. \tag{37}$$

#### ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выражения (36) и (37) были верифицированы на модели, представленной формулами (12)...(30). Установлено, что при их использовании средний участок статической силовой характеристики виброзащитной системы сиденья оператора становится строго горизонтальным.

Применение одного из двух полученных выражений (36) или (37), обеспечивающих условие квазинулевой жесткости статической силовой характеристики, уменьшает на единицу количество параметров исходных данных для построения характеристики. На рисунке 3 приведен пример статической силовой характеристики, полученной по формулам (12)...(30) при предварительном использовании формулы (37), для тех же значений параметров исходных данных, которые использовались при получении характеристики на рисунке 2 (за исключением коэффициента жесткости пружины *с*<sub>s</sub>, который не задавался, а вычислялся по (37)).



Рисунок 3 – Статическая силовая характеристика, полученная по условию (37) квазинулевой жесткости среднего участка (пример) Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Static force characteristic obtained from the quasi-rigidity condition (37) of the middle section (example) Source: compiled by the authors.

Значение коэффициента жесткости пружины *с*<sub>s</sub>, вычисленное по (37), составило 49050 Н/м.

Анализ выражения (37) показывает, что коэффициент жесткости пружины, обеспечивающий режим квазинулевой жесткости механизма в средней части статической характеристики, может быть изменен в определенных пределах путем изменения конструктивных размеров механизма b, c и  $L_1$ . Причем увеличение размера  $L_1$  увеличивает требуемую жесткость пружины, а увеличение размеров b, c, напротив, уменьшает. Зависимость  $c_s(L_1)$  линейная,  $c_s(b, c)$  – нелинейная. Увеличение размеров b и c в пределах габаритных размеров механизма позволяет существенно, в несколько раз уменьшить жесткость используемой пружины (рисунок 4), а следовательно,

металлоемкость, массу пружины и механизма. Зависимость, приведенная на рисунке 4, получена при тех же постоянных значениях остальных параметров, входящих в (37), при которых получены статические характеристики, приведенные на рисунках 2 и 3.

Уравнение (31) может быть видоизменено при необходимости обеспечения заданного наклона средней части характеристики путем добавления в него разности Δ значений в левой и правой граничной точках среднего участка характеристики:

$$P_{v}\left(-h_{qz} / 2\right) = P_{v}\left(h_{qz} / 2\right) + \Delta .$$
(38)

В этом случае решение уравнения (38) относительно *с*<sub>s</sub> будет иметь несколько более сложный вид:

$$-\frac{\Delta\cdot\sqrt{L_{1}}\cdot\sigma_{2}\cdot\sigma_{1}-L_{1}\cdot g\cdot m\cdot\sqrt{b^{2}+c^{2}}\cdot\sigma_{2}+L_{1}\cdot g\cdot m\cdot\sqrt{b^{2}+c^{2}}\cdot\sigma_{1}}{b\cdot c\cdot(\sigma_{2}-\sigma_{1})\cdot\sqrt{b^{2}+c^{2}}},$$
(38)



Рисунок 4 – Зависимость жесткости пружины от размеров с и b при условии равенства последних Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Dependence of spring rigidity on c and b dimensions if the latter are equal Source: compiled by the authors.

где

(

Перспективная область использования разработанной модели и прогнозируемое направление дальнейших исследований – проектирование виброзащитных систем и оптимизация конструкции параллелограммного механизма сиденья оператора строительной, дорожной или подъемно-транспортной машины.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Korchagin P., Teterina I., Korchagina E. Road roller operator's vibroprotection system improvement *// Journal of Physics: Conference Series.* 2021. 1791: 012012. DOI: 10.1088/1742-6596/1791/1/012012.

2. Nehaev V. A., Nikolaev V. A., Zakernichnaya N. V. Vibration protection of a human-operator based on the application of disturbance-stimulated control mechanism *// Journal of Physics: Conference Series.* 2018. 1050: 012057. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012057

3. Mayton A. G., Jobes C. C., Gallagher S. Assessment of whole-body vibration exposures and influencing factors for quarry haul truck drivers and loader operators // *International journal of heavy vehicle systems*. 2014. 21(3): 241-261. DOI: 10.1504/ IJHVS.2014.066080

4. Chen, F. Hu, H. Nonlinear vibration of knitted spacer fabric under harmonic excitation // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. 2020. Vol. 15. DOI: 10.1177/1558925020983561

5. Seong-Hwan Kim, Dal-Seong Yoon, Gi-Woo Kim, et al. Road traveling test for vibration control of a wheel loader cabin installed with magnetorheological mounts // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2020. 1045389X20953900. DOI: 10.1177/1045389X20953900 6. Korytov M. S., Shcherbakov V. S., Titenko V. V., Pochekuyeva I. E. Interpolation of experimental values for working parameters of a construction machine in the data space of an arbitrary dimensionality// *Journal of Physics: Conference Series.* 2020. 1546(1): 012086. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012086

7. Korytov M. S., Shcherbakov V. S., Titenko V. V., Belyakov V. E. Study of the crawler crane stability affected by the length of compensating ropes and platform rotation angle in the mode of movement with payload // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1546(1): 012135. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012135

8. Кузьмин В. А., Федоткин Р. С., Крючков В. А. Разработка имитационной модели для оценки эффективности виброзащиты системы подрессоривания колесного сельскохозяйственного трактора класса 4 // Инновации в сельском хозяйстве. 2018. № 2 (27). С. 340--347.

9. Mian J., Shoushi L., Yong G., Jigang W. The improvement on vibration isolation performance of hydraulic excavators based on the optimization of powertrain mounting system // Advances in mechanical engineering. 2019. Vol. 11. No. 5. DOI: 10.1177/1687814019849988

10. Chi F, Zhou J, Zhang Q, Wang Y, Huang P. Avoiding the health hazard of people from construction vehicles: a strategy for controlling the vibration of a wheel loader // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2017. Vol. 14. No. 3. Pp. 275. DOI: 10.3390/ijerph14030275

11. Mayton A. G., Jobes C. C., Gallagher S. Assessment of whole-body vibration exposures and influencing factors for quarry haul truck drivers and loader operators // International journal of heavy vehicle systems. 2014. Vol. 21. No. 3. Pp. 241-261. DOI: 10.1504/ IJHVS.2014.066080

12. Andruszko J., Derlukiewicz D. The Numerical-Experimental Studies of Stress Distribution in the Three-Arm Boom of the Hybrid Machine for Demolition Works. In: Rusiński E., Pietrusiak D. // Proceedings of the 14th International Scientific Conference: Computer Aided Engineering. 2019. 8-14. DOI: 10.1007/978-3-030-04975-1\_2 13. Korchagin P. A., Teterina I. A., Rahuba L. F. Improvement of human operator vibroprotection system in the utility machine // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. 944: 012059. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012059

14. Sun X., Zhang J. Performance of earth-moving machinery cab with hydraulic mounts in low frequency // Journal of vibration and control. 2014. 20(5): 724-735. DOI: 10.1177/1077546312464260

15. Baranovskiy A. M., Vikulov S. V. Vibration protection system for high-speed vessel crews // Marine intellectual technologies. 2019. 3. 1: 35-38.

16. Bosnjak S. M., Arsic M. A., Gnjatovic N. B. et al. Failure of the bucket wheel excavator buckets // Engineering failure analysis. 2018. 84: 247-261. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.11.017

17. Renqiang J., Vanliem N., Vanquynh L. Ride comfort performance of hydro pneumatic isolation for soil compactors cab in low frequency region // Journal of Vibroengineering. 2020. 22. (5): 1174-1186. DOI: 10.21595/jve.2020.21345

18. Lyashenko M. V., Pobedin A. V., Potapov P. V. Analysis of possible dynamic vibration dampers uses in tractor cabins suspensions // Procedia Engineering. 2016. 150: 1245-1251. DOI: 10.1016/j.pro-eng.2016.07.132

19. Teterina I. A., Korchagin P. A., Letopolsky A. B. Results of investigating vibration load at human operator's seat in utility machine // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2019. 9783319956299: 177-184. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5\_19

20. Корытов М. С., Щербаков В. С., Почекуева И. Е. Применение параллелограммного механизма с эффектомквазинулевойжесткостиввиброзащитных системах кресла оператора строительно-дорожной машины // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. № 2. С. 132– 140. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-02-132-140

21. Burian Y. A., Silkov M. V., Trifonova E. N. Support with quasi-zero stiffness effect for processing equipment // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2141. No. 1. Pp. 030067. DOI: 10.1063/1.5122117

22. Chang, Y., Zhou, J., Wang, K. et al. A quasi-zero-stiffness dynamic vibration absorber // Journal of sound and vibration. 2021. Vol. 494. Pp. 115859. DOI: 10.1016/j.jsv.2020.115859

23. Larson Ron, Hostetler Robert P. Precalculus: A Concise Course. Boston: Houghton Mifflin, 2007. 526 p.

#### REFERENCES

1. Korchagin P., Teterina I., Korchagina E. Road roller operator's vibroprotection system improvement *// Journal of Physics: Conference Series.* 2021. 1791: 012012. DOI: 10.1088/1742-6596/1791/1/012012.

2. Nehaev V.A., Nikolaev V.A., Zakernichnaya N.V. Vibration protection of a human-operator based on the application of disturbance-stimulated control mechanism // *Journal of Physics: Conference Series.* 2018. 1050: 012057. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012057

3. Mayton A. G., Jobes C. C., Gallagher S. Assessment of whole-body vibration exposures and influencing factors for quarry haul truck drivers and loader operators // *International journal of heavy vehicle systems*. 2014; 21(3): 241-261. DOI: 10.1504/IJH-VS.2014.066080

4. Chen, F. Hu, H. Nonlinear vibration of knitted spacer fabric under harmonic excitation // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. 2020; Vol. 15. DOI: 10.1177/1558925020983561

5. Seong-Hwan Kim, Dal-Seong Yoon, Gi-Woo Kim, et al. Road traveling test for vibration control of a wheel loader cabin installed with magnetorheological mounts // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2020. 1045389X20953900. DOI: 10.1177/1045389X20953900

6. Korytov M. S., Shcherbakov V. S., Titenko V. V., Pochekuyeva I. E. Interpolation of experimental values for working parameters of a construction machine in the data space of an arbitrary dimensionality // Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1546(1): 012086. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012086

7. Korytov M. S., Shcherbakov V. S., Titenko V. V., Belyakov V. E. Study of the crawler crane stability affected by the length of compensating ropes and platform rotation angle in the mode of movement with payload // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1546(1): 012135. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012135

8. Kuzmin V. A., Fedotkin R. S., Krjuchkov V. A. Razrabotka imitacionnoj modeli dlja ocenki jeffektivnosti vibrozashhity sistemy podressorivanija kolesnogo sel'skohozjajstvennogo traktora klassa 4 [Development of a simulation model to assess the effectiveness of vibration protection of the suspension system of a wheeled agricultural tractor of class 4]. *Innovacii v sel'skom hozjajstve*. 2018; 2 (27): 340-347.

9. Mian J., Shoushi L., Yong G., Jigang W. The improvement on vibration isolation performance of hydraulic excavators based on the optimization of powertrain mounting system *// Advances in mechanical engineering*. 2019; Vol. 11. No. 5. DOI: 10.1177/1687814019849988

10. Chi F, Zhou J, Zhang Q, Wang Y, Huang P. Avoiding the health hazard of people from construction vehicles: a strategy for controlling the vibration of a wheel loader // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2017; Vol. 14. No. 3: 275. DOI: 10.3390/ijerph14030275

11. Mayton A. G., Jobes C. C., Gallagher S. Assessment of whole-body vibration exposures and influencing factors for quarry haul truck drivers and loader operators // International journal of heavy vehicle systems. 2014; Vol. 21. No. 3: 241-261. DOI: 10.1504/IJH-VS.2014.066080

12. Andruszko J., Derlukiewicz D. The Numerical-Experimental Studies of Stress Distribution in the Three-Arm Boom of the Hybrid Machine for Demolition Works. In: Rusiński E., Pietrusiak D. // Proceedings of the 14th International Scientific Conference: Computer Aided Engineering. 2019; 8-14. DOI: 10.1007/978-3-030-04975-1\_2 13. Korchagin P. A., Teterina I. A., Rahuba L. F. Improvement of human operator vibroprotection system in the utility machine // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; 944: 012059. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012059

14. Sun X., Zhang J. Performance of earth-moving machinery cab with hydraulic mounts in low frequency *// Journal of vibration and control.* 2014; 20(5): 724-735. DOI: 10.1177/1077546312464260

15. Baranovskiy A. M., Vikulov S. V. Vibration protection system for high-speed vessel crews // Marine intellectual technologies. 2019; 3. 1: 35-38.

16. Bosnjak S. M., Arsic M. A., Gnjatovic N. B. et al. Failure of the bucket wheel excavator buckets *// Engineering failure analysis.* 2018; 84: 247-261. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.11.017

17. Renqiang J., Vanliem N., Vanquynh L. Ride comfort performance of hydro pneumatic isolation for soil compactors cab in low frequency region *// Journal of Vibroengineering*. 2020. 22. (5): 1174-1186. DOI: 10.21595/jve.2020.21345

18. Lyashenko M. V., Pobedin A. V., Potapov P. V. Analysis of possible dynamic vibration dampers uses in tractor cabins suspensions *// Procedia Engineering*. 2016. 150: 1245-1251. DOI: 10.1016/j.pro-eng.2016.07.132

19. Teterina I. A., Korchagin P. A., Letopolsky A. B. Results of investigating vibration load at human operator's seat in utility machine // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2019. 9783319956299: 177-184. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5\_19

20. Korytov M. S., Shherbakov V. S., Pochekueva I. E. Primenenie parallelogrammnogo mehanizma s jeffektom kvazinulevoj zhestkosti v vibrozashhitnyh sistemah kresla operatora stroitel'no-dorozhnoj mashiny [Application of a parallelogram mechanism with the effect of quasi-zero rigidity in vibration protection systems of the operator's seat of a road construction machine]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Brjanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2021; 2: 132-140. (in Russ.) DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-02-132-140

21. Burian Y. A., Silkov M. V., Trifonova E. N. Support with quasi-zero stiffness effect for processing equipment. *AIP Conference Proceedings*, 2019, 2141 (1): 030067. DOI: 10.1063/1.5122117

22. Chang, Y., Zhou, J., Wang, K. et al. A quasi-zero-stiffness dynamic vibration absorber. *Journal of sound and vibration*, 2021, 494: 115859. DOI: 10.1016/j.jsv.2020.115859

23. Larson Ron, Hostetler Robert P. *Precalculus: A Concise Course*. Boston: Houghton Mifflin, 2007. 526 p.

#### ВКЛАД СОАВТОРОВ

Корытов М. С. Вывод уравнений математической модели, разработка программного продукта для проверки работоспособности математической модели.

Кашапова И. Е. Исследование состояния вопроса, написание введения, разработка программного продукта для проверки работоспособности математической модели.

Щербаков В. С. Общая идея работы, редактирование текста статьи, написание заключения.

#### **CO-AUTHORS' CONTRIBUTION**

Mikhail S. Korytov. Derivation of equations of a mathematical model, development of a software product to test the performance of a mathematical model.

Irina E. Kashapova. Issue researching, writing an introduction, developing a software product to test the performance of a mathematical model.

Vitaliy S. Shcherbakov. The general idea of the work, editing the text of the article, writing a conclusion.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Корытов Михаил Сергеевич – д-р техн.наук, доц.

Кашапова Ирина Евгеньевна – аспирант.

Щербаков Виталий Сергеевич – д-р техн.наук, проф.

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Mikhail S. Korytov – Dr. of Sci., Associate Professor. Irina E. Kashapova – Post-graduate student of the Process Automation and Electrical Engineering Department.

Vitaliy S. Shcherbakov – Dr. of Sci., Professor.





## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА «ЧИСТОЕ ПРЕСЛЕДОВАНИЕ» (PURE PURSUIT) ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ АВТОГРЕЙДЕРОМ

**Р. Ю. Сухарев** Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск, Россия suharev\_ry@mail.ru, http://orcid.org/ 0000-0002-2627-8110

### АННОТАЦИЯ

**Введение**. Актуальная задача создания перспективных систем беспилотного управления дорожно-строительных машин может быть решена путем проведения теоретических исследований на математических моделях.

**Материалы и методы.** Одна из важных проблем при создании системы управления движением беспилотной машины – это составление алгоритма следования заданной траектории. Наиболее известным методом следования траектории является метод «чистое преследование», успешно применяемый для управления движением мобильных роботов.

В связи с этим была сформулирована цель исследования – адаптировать метод «чистое преследование» для управления беспилотным автогрейдером. Для достижения поставленной в работе цели были решены следующие задачи: разработана математическая модель движения автогрейдера с передними управляемыми колесами, разработана математическая модель системы управления движением автогрейдера, предложен интегральный критерий для оценки эффективности работы системы управления движением беспилотного автогрейдера, проведены теоретические исследования математической модели и получены зависимости интегрального критерия от конструктивных и эксплуатационных параметров автогрейдера и от параметра метода управления (дальность видимости), найдены оптимальные значения дальности видимости при различных значениях длины базы, коэффициента базы и скорости машины по предложенному критерию эффективности.

**Результаты.** В результате аппроксимации полученных оптимальных значений метод «чистое преследование» был модифицирован для управления беспилотным автогрейдером с учетом его конструктивных особенностей и скорости передвижения.

Полученные результаты могут быть использованы при создании опытных образцов систем беспилотного управления дорожно-строительных машин.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** автогрейдер, беспилотный, траектория, машина, управление, алгоритм, метод управления, курс, чистое преследование.

Статья поступила в редакцию 08.03.2022; одобрена после рецензирования 15.03.2022; принята к публикации 12.04.2022.

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: Сухарев Р. Ю. Применение метода «чистое преследование» (Pure Pursuit) для управления беспилотным автогрейдером / Р.Ю. Сухарев // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 2(84). С. 156-169. https://doi.org/10.26518/2071-7296- 2022-19-2-156-169

© Сухарев Р. Ю., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-156-169 https://elibrary.ru/FUWXGR Original article

# PURE PURSUIT METHOD USE TO CONTROL UNMANNED MOTOR GRADER

Roman Yu. Sukharev

PART I

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia suharev\_ry@mail.ru, http://orcid.org/ 0000-0002-2627-8110

#### ABSTRACT

**Introduction.** A relevant objective of implementing the advanced systems of self-driving road construction vehicles can be accomplished by mathematical modelling. One of the important issues when creating a motion control system for a self-driving vehicle is to develop a trajectory following algorithm. The most well-known method of following the trajectory is a pure pursuit method, which is successfully used to control the movement of mobile robots.

**Materials and methods.** Hence, the research objective has been defined and is to adapt the pure pursuit method to control an autonomous grader. To achieve the research objective, the task of a mathematical model of the motor grader movement with front steering wheels has been developed, and a mathematical model of the motor grader motion control system has been compiled. Besides, we propose an integral criterion to evaluate the efficiency of the motion control system of a unmanned grader. Some theoretical studies of the mathematical model have been carried out and the dependencies of the integral criterion on the design and operational parameters of the grader, as well as on the parameter of the control method (visibility range) have been obtained. Moreover, the optimal values of the visibility range for various values of the base length, base coefficient and machine speed have been defined according to the proposed efficiency criterion.

**Results.** As a result of approximating the obtained optimal values, the pure pursuit method has been modified to control a self-driving motor grader, taking into account its design features and travel speed.

The results obtained can be used to create the prototypes of unmanned control systems for road construction vehicles.

**KEYWORDS:** motor grader, unmanned vehicle, trajectory, vehicle, control, algorithm, control method, course, pure pursuit.

The article was submitted 08.03.2022; approved after reviewing 15.03.2022; accepted for publication 12.04.2022.

#### 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:* Roman Yu. Sukharev. Pure pursuit method use to control unmanned motor grader. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2022; 19 (2): 156-169. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-156-169

© Sukharev R. Y., 2022



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

#### INTRODUCTION

Nowadays, unmanned technologies are widely used in various branches of industry and economy. The adoption of self-driving technologies in the construction industry, namely in heavy equipment, is a promising direction that will develop quite rapidly in the next few years [1]. A motor grader is a construction machine similar in control algorithm to a self-driving vehicle. One of the wellknown methods of controlling the self-driving cars is the «pure pursuit» method<sup>1, 2</sup>. This method is used to control mobile robots<sup>3</sup> [2,3,4], unmanned vehicles<sup>4, 5</sup> [5], agricultural machines [6], logging harvesters [7], underwater uninhabited vehicles [8], etc. However, there are no studies of this method when driving a grader.

Driving an unmanned grader differs from driving an unmanned vehicle mainly by purpose [9,10,11]. The main purpose of the grader movement is the movement of the working body in accordance with the project of the earthen structure. The trajectories of the basic machine and its parts are secondary in this case. In this case, the trajectory is an alternation of sections of rectilinear motion during the working stroke and reversals<sup>6</sup> [10,12].

The setting parameter of the «pure pursuit» method is the look-ahead distance. With an increase in this parameter, the machine tends to follow the trajectory more precisely and, thereby, the yaw along the trajectory increases. With a decrease in this parameter, the movements of the machine become smoother, but with sharp turns of the trajectory, the machine begins to "cut the corners".

Several works were devoted to finding the optimal value of the look-ahead distance for the

car7 [5]. Some authors even suggested using a dynamic look-ahead distance, i.e. a change depending on the speed and accuracy of the trajectory<sup>7</sup>.

#### **PROBLEM STATEMENT**

The purpose of this work is to adapt the «pure pursuit» method to control an unmanned grader. To achieve this goal, it is necessary to solve a number of tasks: to make mathematical models of the movement of a grader with front steerable wheels and a motion control system, to justify a criterion for evaluating the effectiveness of the motion control system of an unmanned grader. to conduct theoretical studies of the mathematical model and to obtain the dependences of the efficiency criterion on the design and operational parameters of the grader and on the parameter of the control method (visibility range), to find optimal values of the visibility range at different values of the base length, the coefficient of the base and the speed of the machine according to the proposed efficiency criterion and on the basis of the data obtained to propose a modified method of «pure pursuit».

#### MATHEMATICAL MODEL

The mathematical model of movement was developed on the basis of a two-dimensional grid of turning a motor grader with front steering wheels in the Earth coordinate system  $O_{EARTH} X_{EARTH} Y_{EARTH}$  (figure 1).

When turning a motor grader with front steering wheels, the elementary displacement of the midpoint of the rear axle  $O_R$  can be calculated by the following formula<sup>8</sup> [13,14]:

<sup>4</sup> Jarrod M. Snider Automatic Steering Methods for Autonomous Automobile Path Tracking Technical Report CMU-RI-TR-09-08, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, February 2009.

<sup>5</sup>Matthew J. Barton. Controller Development and Implementation for Path Planning and Following in an Autonomous Urban Vehicle. Undergraduate thesis, University of Sydney, November 2001.

<sup>6</sup> Gorbov I. A., Leonard A.V. Planning the trajectory of a vehicle when bypassing an obstacle // XXVIII International Innovation-oriented Conference of Young Scientists and Students (MICMUS - 2016) : proceedings of the conference, Moscow, 07-09 December 2016. - Moscow: Federal State Budgetary Institution of Science A.A. Blagonravov Institute of Machine Science of the Russian Academy of Sciences, 2017. pp. 236-239.

<sup>7</sup>Wu, Yiyang & Xie, Zhijiang & Lu, Ye. (2021). Steering Wheel AGV Path Tracking Control Based on Improved «pure pursuit» Model. Journal of Physics: Conference Series. 2093. 012005. 10.1088/1742-6596/2093/1/012005.

<sup>8</sup> Portnova A. A. the Problem of minimizing the turning radius grader with articulated / Innovation, quality and service in engineering and technology. Kursk: Closed Joint Stock Company "University Book", 2014. pp. 97-99.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Omead Amidi. Integrated Mobile Robot Control. Technical Report CMU-RI-TR-90-17, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, May 1990.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> R. Craig Coulter. Implementation of the «pure pursuit» Path Tracking Algorithm. Technical Report CMU-RI-TR-92-01, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, January 1992.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Alessandro De Luca, Giuseppe Oriolo. Feedback Control of a Nonholonomic Car-like Robot. 2004.

#### TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

$$dS = R_R d\gamma, \tag{1}$$

whence it follows that:

$$Vdt = R_R d\gamma; \tag{2}$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{V}{R_R},$$
(3)

where *S* is the midpoint movement of the rear axle,  $R_R$  is the turning radius of the rear axle midpoint,  $\gamma$  is the heading angle of the motor grader, *V* is the velocity of the motor grader.

The turning radii of the grader can be defined by the following formula8 [13, 14]

$$R_R = \frac{L}{\mathrm{tg}\alpha_W};\tag{4}$$

$$R_F = \frac{L}{\sin \alpha_W},\tag{5}$$

where  $R_F$  is the turning radius of the front axle midpoint, *L* is the length of the grader base,  $\alpha_W$  is the steering angle of the front wheels.



Figure 1 – Two-dimensional grid of turning the motor grader with front steering wheels [14]



Substituting formula (4) into formula (3) the following equation is obtained:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{V}{L} tg\alpha_W.$$
 (6)

The velocity vector of the rear axle midpoint can be decomposed into the velocity projections along the axis  $X_{EARTH}$ :

$$V_X = V \sin\gamma, \tag{7}$$

or:

$$\frac{\mathrm{dx}}{\mathrm{dt}} = V \mathrm{sin}\gamma; \tag{8}$$

and along the axis  $Y_{EARTH}$ 

$$V_Y = V \cos\gamma, \tag{9}$$

or

$$\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = V \cos\gamma. \tag{10}$$

The set of formulas (4), (8) and (10) can be represented in the form of a mathematical model (figure 2) compiled in the MATLAB Simulink software.

#### PURE PURSUIT METHOD DESCRIPTION

The «pure pursuit» method consists of a geometric calculation of the radius of the circular arc connecting the location of the rear axle with the target point on a trajectory in front of the vehicle. The target point is determined based on the lookahead distance  $L_0$  from the midpoint of the rear axis to the trajectory<sup>1,2,3,4,5,7</sup> [2-8].

The turning angle of the motor grader can be defined using only the location of the target point and angle  $\phi$  between the machine course vector

and the prediction vector. Using the data of figure 3, we can record the following formulas <sup>1,2,3,4,5,7</sup> [2-9].

$$\frac{L_0}{\sin 2\phi} = \frac{R}{\sin(90^\circ - \phi)},\tag{11}$$

$$R = \frac{L_0}{2\sin\phi} = \frac{L_0^2}{2\Delta Y_1},$$
 (12)

where  $L_0$  is the look-ahead distance,  $\Delta Y_1$  is the deviation of the midpoint of the rear axle from the trajectory,  $\varphi$  is the angle between the longitudinal axis of the motor grader and the direction to the target point.

The required turning angle of the motor grader can be calculated using the appropriate equations for a specific type of a machine. For example, for a grader with front steering wheels, a turning angle is defined by the following formula<sup>1,2,3,4,5,7</sup> [2-9]:

$$\frac{L_0^2}{2\Delta Y_1} = \frac{L}{\mathrm{tg}\alpha_W}.$$
 (13)

Accordingly, the wheel turning angle is defined by the formula:

$$\alpha_W = \arctan\left(\frac{2\Delta Y_1 L}{L_0^2}\right). \tag{14}$$

Thus, the «pure pursuit» method is a proportional regulator of the grader transverse displacement error.

#### **EFFICIENCY CRITERION**

The main purpose of the grader movement is to move the blade in accordance with the earth structure project. Consequently, the deviation of the midpoint of the blade (B) from the specified trajectory should be used as a performance criterion of the selected control method [9,15].



Figure 2 – Mathematical model of turning a motor grader with front steering wheels [14]

PART I



Figure 3 – Design diagram of the «pure pursuit» algorithm<sup>1,2,3,4,5,7</sup> [2-9]

The given parameter can be quantified using the integral indicator, i.e. the area between the specified trajectory and the trajectory of the blade midpoint and is calculated by the formula [9,15,16]

$$E_T = \int_0^\infty |\Delta y(x)| \mathrm{d}x,\tag{15}$$

where is  $y(\infty) - y(x)$  is the trajectory deviation of the blade midpoint from the value ( $\infty$ ) that corresponds to the specified trajectory [9,15,16].

The criterion  $E_{\tau}$  geometrically represents the shaded area in figure 4a. The transient process shown in figure 4a is caused by a disturbance, for example, a stepwise change of the given trajectory. The smaller the shaded area, the more preferable the transition process [9,15,16].

This integral criterion can be used not only to assess the control quality, but also to optimize the variable parameters for the control system synthesis. Moreover, the absolute value of the criterion  $E_{\tau}$  is not significant. Using the equations for  $E_{\tau}$  and system transfer functions, the dependences of the criterion  $E_{\tau}$  on the variable parameters of the control system and their optimal values can be obtained [9,15,16].

When using the module, the integral criterion  $E_{\tau}$  can be applied to the systems which transients have oscillation and change the sign (figure 4b) [9,15,16].



Figure 4 – Integral quality criteria [9,15]

More complex integral criteria based on the second and following derivatives of  $\Delta Y$  can be used. Their application will bring the transients closer to the second and higher order curves [9,15,16].

#### **RESEARCH RESULTS**

During theoretical investigation of the mathematical model, a step change of the trajectory by 1 m was used as an input signal.



Figure 5 – The influence of the look-ahead distance  $L_o$  on the integral criterion  $E_{\tau}$ at different velocities of the motor grader V Source: compiled by the author

The studies have shown that the following parameters of the mathematical model, namely the look-ahead distance  $L_0$ , the length of the motor grader base, the coefficient of the motor grader base, the motor grader velocity have the strongest influence on the integral criterion  $E_{\tau}$  (figures 5, 6, 7).

The coefficient of the motor grader base determines the position of the blade in the base and is defined by the following formula:

$$K_b = \frac{L_1}{L},\tag{16}$$

where  $L_1$  is the distance from the front axle to the blade.

The main objective of theoretical studies of the mathematical model of the motor grader in a dynamic mode was to determine the optimal numerical values of the control method parameters, their dependences on the design and operational parameters of the grader.

The model parameters were divided into three groups: fixed parameters, stochastic parameters, variable parameters [17,18].

The variable parameters have been divided, in turn, into three subgroups:







Figure 7 – The influence of the look-ahead distance  $L_o$  on the integral criterion  $E_{\tau}$  at different values of the base length L Source: compiled by the author.

Design parameters of the motor grader (base length, base coefficient).

Operational parameters of the motor grader (vehicle velocity).

Parameters of the control method (look-ahead distance  $L_0$ ).

The obtained dependences have been presented in the form of a graphical complex of the surfaces for different base lengths and different values of the motor grader velocity (figures 8, 9, 10, 11, 12).



Figure 8 – Dependences of the integral criterion  $E_{\tau}$  on the look-ahead distance  $L_o$ and velocity V at different values of the base coefficient (L=5 m) Source: compiled by the author.



Figure 9 – Dependences of the integral criterion  $E_{\tau}$  on the look-ahead distance  $L_o$ and velocity V at different values of the base coefficient (L=6 m) Source: compiled by the author.



Figure 10 – Dependences of the integral criterion  $E_{\tau}$  on the look-ahead distance  $L_{o}$ and velocity V at different values of the base coefficient (L=7 m) Source: compiled by the author.

© 2004–2022 Вестник СибАДИ The Russian Automobile and Highway Industry Journal



Figure 11 – Dependences of the integral criterion ET on the look-ahead distance L0 and velocity V at different values of the base coefficient (L=8 m) Source: compiled by the author.



Figure 12 – Dependences of the integral quality criterion on the look-ahead distance L<sub>o</sub> and velocity V at different values of the base coefficient (L=9 m) Source: compiled by the author.

#### РАЗДЕЛ І ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Based on the obtained dependences, we can conclude that the grader speed significantly affects the efficiency criterion. Since speed is not taken into account in the original method of «pure pursuit», we propose to modify the method and introduce speed into it. The obtained dependences have been approximated with the 4th degree polynomials with determination coefficients  $R^2$  of at least 0,99

$$E_{\rm T} = a_4 \cdot L_0^4 + a_3 \cdot L_0^3 + a_2 \cdot L_0^2 + a_1 \cdot L_0 + a_0. \tag{17}$$



Figure 13 – Dependences of the optimal values of the look-ahead distance L<sub>o</sub> at different values of speed, base length and base coefficient Source: compiled by the author.

Due to the optimization carried out by the Newton method, for the minimality condition of the integral criterion, the optimal values of the look-ahead distance  $L_0$  have been obtained for various values of the base length, base coefficient and speed. Figure 13 shows the graphs of the obtained optimal values of the look-ahead distance.

The obtained dependences of the optimal values of the look-ahead distance on the speed, base length and base coefficient have been ap-

proximated with regression equations and are presented in table 1.

The regression equations have the form of  $L_0 = a_0 \cdot V + a_1$ . From the regression equations, it will be obvious that the multiplier  $a_0$  depends only on the base length *L* and can be approximated with the following equation

$$a_0 = 1,6 + 0,04 \cdot L. \tag{18}$$

#### Table 1

The regression equations of the look-ahead distance  $L_0$ Source: compiled by the author.

L	K <sub>b</sub>	The regression equation	$R^2$
5	0,2	$L_0 = 1.4 \cdot V + 4.338$	0,967
	0,3	$L_0 = 1,4 \cdot V + 4,07$	0,999
	0,4	$L_0 = 1.4 \cdot V + 3.666$	0,974
	0,5	$L_0 = 1,4 \cdot V + 3,282$	0,985
	0,6	$L_0 = 1.4 \cdot V + 2.976$	0,984
6	0,2	$L_0 = 1,36 \cdot V + 5,102$	0,968
	0,3	$L_0 = 1,36 \cdot V + 4,616$	0,961
	0,4	$L_0 = 1,36 \cdot V + 4,146$	0,976
	0,5	$L_0 = 1,36 \cdot V + 3,742$	0,972
	0,6	$L_0 = 1,36 \cdot V + 3,332$	0,971
7	0,2	$L_0 = 1,32 \cdot V + 5,774$	0,956
	0,3	$L_0 = 1,32 \cdot V + 5,282$	0,991
	0,4	$L_0 = 1,32 \cdot V + 4,688$	0,986
	0,5	$L_0 = 1,32 \cdot V + 4,176$	0,983
	0,6	$L_0 = 1,32 \cdot V + 3,676$	0,976
8	0,2	$L_0 = 1,28 \cdot V + 6,36$	0,872
	0,3	$L_0 = 1,28 \cdot V + 5,762$	0,958
	0,4	$L_0 = 1,28 \cdot V + 5,24$	0,975
	0,5	$L_0 = 1,28 \cdot V + 4,624$	0,975
	0,6	$L_0 = 1,28 \cdot V + 4,054$	0,981
9	0,2	$L_0 = 1,24 \cdot V + 6,876$	0,844
	0,3	$L_0 = 1,24 \cdot V + 6,362$	0,881
	0,4	$L_0 = 1,24 \cdot V + 5,708$	0,958
	0,5	$L_0 = 1,24 \cdot V + 5,084$	0,982
	0,6	$L_0 = 1,24 \cdot V + 4,41$	0,973

Table 2The coefficients  $a_1$  in the regression equations of the look-ahead distance  $L_0$ Source: compiled by the author.

L K <sub>6</sub>	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0,5	4,388	4,07	3,666	3,282	2,976
1	5,102	4,616	4,146	3,742	3,332
1,5	5,774	5,282	4,688	4,176	3,676
2	6,36	5,762	5,24	4,624	4,054
2,5	6,876	6,362	5,708	5,084	4,41
The free coefficients  $a_1$  in the regression equations depend on the base length and base coefficient. For further approximation, they were summarized in table 2 and the resulting dependence was approximated by the following equation

$$a_1 = 3,2 - 5 \cdot K_6 + 0,5 \cdot L. \tag{19}$$

Therefore, a modified method of «pure pursuit» adapted to control the motor grader has been proposed. The dependence of the optimal value of the look-ahead distance on the speed, base length and base coefficient is represented by the following formula

$$L_0 = a_0 \cdot V + a_1.$$
 (20)

where  $a_0 = 1,6 + 0,04 \cdot L$ ,

 $a_1 = 3, 2 - 5 \cdot K_6 + 0, 5 \cdot L$ , are applied for the motor grader with front steering wheels.

After substituting formula (20) into formula (14), we obtain a formula for calculating the front wheels turning angle adapted to the grader:

$$\alpha_K = \arctan\left(\frac{2\Delta Y_1 L}{(a_0 V + a_1)^2}\right). \tag{21}$$

#### **DISCUSSION AND CONCLUSION**

The developed mathematical models of the movement of a motor grader with front steerable wheels and a motor grader motion control system made it possible to conduct theoretical studies and identify the dependencies of the integral criterion on the design and operational parameters of the grader and on the parameter of the control method (look-ahead distance). After optimization, optimal values of the look-ahead distance were found for different values of the base length, base coefficient and machine speed according to the proposed efficiency criterion. As a result of the approximation of the obtained optimal values, the «pure pursuit» method was modified to control an unmanned grader, taking into account its design features and speed of movement. The results obtained can be used to create prototypes of unmanned control systems for road construction vehicles.

#### REFERENCES

1. Artemenko M.N., Korchagin P.A., Teterina I.A. Development trends of unmanned robotic systems: experience of domestic and foreign manufacturers. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;16(4):416-430. (In Russ.) https://doi. org/10.26518/2071-7296-2019-4-416-430

2. Lapierre, L., Zapata, R., Lepinay, P. Combined path-following and obstacle avoidance control of a wheeled robot (2007) *International Journal of Robotics Research*. 26 (4): 361-375. DOI: 10.1177/0278364907076790

3. Liu, Jia & Yang, Zhiheng & Huang, Zhejun & Li, Wenfei & Dang, Shaobo & Li, Huiyun. (2021). Simulation Performance Evaluation of «pure pursuit», *Stanley*, LQR, MPC Controller for Autonomous Vehicles. 1444-1449. 10.1109/RCAR52367.2021.9517448.

4. Matveev A. S., Hoy M. C., Savkin A. V. A globally converging algorithm for reactive robot navigation among moving and deforming obstacles. *Automatica*. 2015. Vol. 54: 292-304. DOI 10.1016/j.automatica.2015.02.012.

5. Ahn, J., Shin, S., Kim, M. et al. Accurate Path Tracking by Adjusting Look-Ahead Point in «pure pursuit» *Method. Int.J Automot. Technol.* 22, pp. 119–129 (2021). 10.1007/s12239-021-0013-7.

6. Fue, Kadeghe & Porter, Wesley & Barnes, Edward & Li, Changying & Rains, Glen. (2020). Autonomous Navigation of a Center-Articulated and Hydrostatic Transmission Rover using a Modified «pure pursuit» Algorithm in a Cotton Field. *Sensors*. 20. 4412. 10.3390/s20164412.

7. Ola Ringdahl. Techniques and Algorithms for Autonomous Vehicles in Forest Environment. Licentiate Thesis. Department of Computing Science Umea University, Sweden, 2007.

8. Sujit P. B., Srikanth Saripalli, J. B. Sousa. An Evaluation of UAV Path Following Algorithms. 2013 European Control Conference (ECC) July 17-19, 2013, Zurich, Switzerland.

9. Sukharev R. Yu. Methods of controlling the course for an self-driving grader. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022;19(1): 48-60. (In Russ.) https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-48-60.

10. Sukharev R. Y. Trajectory plotting algorithm for a self-driving road grader. *Journal of Physics: Conference Series,* Vladivostok, 2021. P. 012181. DOI 10.1088/1742-6596/2096/1/012181.

11. Deryushev V.V., Kosenko E.E., Kosenko V.V. Assessment of the safety parameters of the grader when maneuvering in the road network. *Safety of technogenic and natural systems*. 2020; 3: 33-38. DOI 10.23947/2541-9129-2020-3-33-38.

12. Nguyen T. Z., Shcherbatov I. A., Protalinski O. M. Creation of a trajectory of movements of a mobile robot in buildings and structures. *Mathematical methods in engineering and technology - mmtt.* 2016; 1(83): 79-81.

13. Voskresensky G. G., Verbitsky G. M. Modeling of grader movement along a curve. *Scientific notes of TOGU*. 2018; 9. No. 2: 690-698.

14. Sukharev R. Yu. Mathematical models of the processes of turning wheeled road-building machines. *Nauchno-Tekhnicheskiy Vestnik Bryanskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2021; 3: 259-269. DOI 10.22281/2413-9920-2021-07-03-259-269.

15. Sukhareva S. V., Sukharev R. Yu. Substantiation of integral criteria for the quality of earthworks performed by chain trench excavators. *Vestnil SibADI*. 2015; 5(45): 52-55. (in Russ.) 16. Yurevich E. I. Theory of automatic control. 4th ed., reprint. and additional - St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2016. 560 p.

17. Shcherbakov V. S., Sukharev R. Yu., Korytov M. S. Development of the theory of optimal control of road and construction vehicles based on satellite navigation systems: Electronic resource: monograph. Omsk: SibADI, 2017. 155 p. ISBN 978-5-93204-929-7.

18. Shcherbakov V. S., Portnova A. A., Sukharev R. Yu. Improving the steering of a grader with a articulated frame: monograph. Omsk: SibADI, 2016. ISBN 978-5-93204-971-6.

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Roman Yu. Sukharev – Cand. of Sci., Associate Professor.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сухарев Роман Юрьевич – канд. техн. наук, доц, кафедры «Автоматизация производственных процессов и электротехника».



УДК 625.089.21 https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-170-182 https://elibrary.ru/HJJGVA Научная статья



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ РАБОЧИМ ОБОРУДОВАНИЕМ ДОРОЖНОЙ ФРЕЗЫ

Д. В. Фурманов, Н. Э. Лысаков, Л. М. Шамахов Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль, Россия http://orcid.org/0000-0002-6932-6477, denis\_furmanov@mail.ru http://orcid.org/ 0000-0001-6646-7947, nik.lysakov.1997@mail.ru http://orcid.org/ 0000-0001-7559-282X, leonid.shamakhov@yandex.ru ზтветственный автор

#### АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена результатам исследования сопротивления резанию дорожных асфальтобетонов в процессе удаления изношенных покрытий рабочими органами фрезерных машин. Актуальность работы обусловлена появлением новых марок асфальтобетонов и новых типов режущих элементов, для которых затруднительно прогнозировать нагрузки на рабочем органе при решении задач проектирования новых и обосновании режимов работы существующих машин.

Цель. Расчет параметров рабочего органа дорожной фрезы.

**Материалы и методы.** Экспериментальные работы проводились путем определения горизонтальной и вертикальной составляющих силы сопротивления резания асфальтобетонов. Исследования проводились на механическом стенде с подвижной плитой, с применением регистрирующей аппаратуры. Производилось разрушение четырех различных марок асфальтобетона. Для каждой марки материала проведен двухфакторный эксперимент. Производилось определение горизонтальной составляющих сил сопротивления в зависимости от площади сечения стружки, марки асфальтобетона и типа режущего элемента.

**Результаты.** В результате проведения эксперимента получены данные, позволяющие обоснованно определять нагрузки на рабочем органе дорожной фрезы. Доказано, что зависимость сил сопротивления резания от площади сечения стружки режущего элемента имеет нелинейный характер. Полученные данные позволяют исчерпывающе ответить на вопросы, касающиеся обоснования параметров дорожных фрез.

**Обсуждение и заключение.** Полученные данные позволяют разработать математическую модель процесса фрезерования асфальтобетонов, которая даст возможность определять не только нагрузки на рабочий орган и энергоемкость процесса, но и обоснованно подходить к вопросам размещения режущих элементов на барабане, определять рациональную область режимов работы оборудования и решать задачи выбора режимов работы в зависимости от типа асфальтобетона.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** асфальтобетон, барабан фрезерный, сила сопротивления резанию, стенд маятникового типа, толщина срезаемой стружки, энергоемкость процесса резания.

Статья поступила в редакцию 17.03.2022; одобрена после рецензирования 30.02.2022; принята к публикации 12.04.2022.

Авторы прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Фурманов Д. В., Лысаков Н. Э., Шамахов Л. М. Экспериментально-аналитическое обоснование процесса резания асфальтобетонов рабочим оборудованием дорожной фрезы // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 2(84). С. 170-182. https://doi.org/10.26518/2071-7296- 2022-19-2-170-182

© Фурманов Д. В., Лысаков Н. Э., Шамахов Л. М., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.



https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-170-182 https://elibrary.ru/HJJGVA Original article

### EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL JUSTIFICATION OF ASPHALT CONCRETE CUTTING PROCESS BY ROAD MILLING MACHINE WORKING EQUIPMENT

Denis V. Furmanov, Nikita E. Lysakov<sup>\*</sup>, Leonid M. Shamakhov Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia http://orcid.org/0000-0002-6932-6477, denis\_furmanov@mail.ru http://orcid.org/ 0000-0001-6646-7947, nik.lysakov.1997@mail.ru http://orcid.org/ 0000-0001-7559-282X, leonid.shamakhov@yandex.ru \*corresponding author

#### ABSTRACT

**Introduction.** The article is devoted to the results of a study of the cutting resistance of road asphalt concrete in the process of removing worn coatings by the working bodies of milling machines. The relevance of the work is due to the emergence of new grades of asphalt concrete and new types of cutting elements, for which it is difficult to predict the loads on the working body when solving the problems of designing new and justifying the operating modes of existing machines.

Purpose. To calculate the parameters of the working body of the road milling machine.

**Materials and methods.** The experimental work was carried out by determining the horizontal and vertical components of the resistance force of cutting asphalt concrete. The research was carried out on a mechanical stand with a movable plate, using recording equipment. Four different grades of asphalt concrete were destroyed. A two-factor experiment was conducted for each brand of material. The horizontal and vertical components of the cutting resistance forces were determined depending on the chip cross-sectional area, the grade of asphalt concrete and the type of cutting element.

**Results.** As a result of the experiment, data were obtained that make it possible to reasonably determine the loads on the working body of the road milling machine. It is proved that the dependence of the cutting resistance forces on the chip cross-sectional area of the cutting element has a nonlinear character. The data obtained allow to comprehensively answer questions concerning the justification of the parameters of road milling machines.

**Discussion and conclusion.** The obtained data allow to develop a mathematical model of the asphalt concrete milling process which will make possible to determine not only the loads on the working body and the energy intensity of the process, but also to reasonably approach the placement of cutting elements on the drum, determine the rational range of equipment operating modes and solve the problems of choosing operating modes depending on the type of asphalt concrete.

**KEYWORDS:** asphalt concrete, milling drum, cutting resistance force, pendulum stand, thickness of the cut off chips, energy consumption of the cutting process.

The article was submitted 17.03.2021; approved after reviewing 29.03.2022; accepted for publication 12.04.2022.

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:* Furmanov Denis V., Lysakov Nikita E., Shamakhov Leonid M. Experimental and analytical justification of the asphalt concrete cutting process by road milling machines working equipment. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2022; 19 (2): 170-182. https://doi.org/10.26518/2071-7296- 2022-19-2-170-182

© Furmanov D. V., Lysakov N. E., Shamakhov L. M., 2022



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



#### введение

Ремонт дорожного полотна не обходится без машин с фрезерным оборудованием. Процесс фрезерования асфальтобетона довольно энергоемкий. Фрезерование асфальтобетона сопровождается возникновением сил сопротивления резанию на режущих элементах фрезерного барабана. Численные значения этих сил зависят от толщины и формы срезаемой стружки, температуры материала его типа асфальтобетона и скорости резания.

Задачи создания новых машин и повышение эффективности существующих требуют решения численного моделирования процесса фрезерования с использованием обоснованной математической модели и создания программного комплекса для расчета параметров рабочего органа. Для реализации этой задачи необходимо смоделировать процесс фрезерования с достаточной точностью. К сожалению, таких существующих математических моделей в открытых источниках в настоящее время не найдено.

Моделирование процесса фрезерования основано на определении касательных и радиальных составляющих сил сопротивления резанию на каждом резце в течение цикла резания, и в последующем векторным суммированием этих сил по рабочей поверхности барабана для определения суммарных сил и крутящего момента. Если вторая часть задачи решается геометрическим моделированием, решение которого хорошо отражено, например, в работах [1, 2], то методы получения численных значений составляющих сил сопротивлению резания далеко не так очевидны.

С методической точки зрения полезными являются экспериментальные работы по исследованию процессов резания различных дорожно-строительных материалов, так как они позволяют получить максимально достоверные результаты, пригодные для практического применения.

А. Н. Зелениным<sup>1</sup> для определения горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию Р незначительными по размеру режущими элементами предложена зависимость

$$P = 10 \cdot c \cdot h \cdot (1 + 0.55 \cdot s) \cdot \left(1 - \frac{90 - \alpha}{150}\right) \cdot \mu \cdot \Delta, \quad (1)$$

где h- глубина резания;

s- ширина профиля;

μ – коэффициент влияния степени блокирования, для блокированного резания μ = 1, для полублокированного резания μ = 0,75, для свободного резания μ = 0,5;

 А – коэффициент, учитывающий влияние износа режущего инструмента;

α – передний угол резания.

Показателем, характеризующим прочностные свойства грунта, является параметр. Этот параметр равен количеству ударов стандартного ударника при забивании наконечника на заданную глубину. Это позволяет заменить широчайший спектр существующих грунтов, различных по гранулометрическому составу, свойствам, температуре, связности и т. д. одним показателем, характеризующим прочностные свойства.

Элементы данного подхода могут быть применимы и к теории резания асфальтобетона.

В своих исследованиях по резанию разогретых асфальтобетонов А. Я. Александров<sup>2</sup> отмечает, что сила резания во многом определяется количеством крупных минеральных зерен. Для определения горизонтальной составляющей силы резания предлагается следующая зависимость:

$$P_{oбщ} = P_{л.р.\kappa} + P_{л.з.р.\kappa},$$
 (2)

где Р<sub>л.р.к</sub> – сила резания, обусловленная силами трения и внутренним сцеплением среды и минеральных зерен, крупностью менее 2 мм;

Р<sub>л.з.р.к</sub> – сила сопротивления при раскалывании минеральных зерен, касающихся режущей кромки ножа.

Первую составляющую силы резания А. Я. Александров находит, опираясь на результаты работы А. М. Холодова<sup>3</sup>:

$$P_{n.p.\kappa} = \frac{B \cdot h \cdot \sin(\alpha + \varphi_1) \cdot [\gamma_0 \cdot c \cdot \sin(a + \omega) \cdot \sin(\omega + \varphi) + 0.5 \cdot \sec \varphi]}{\sin \omega \cdot \sin(\alpha + \omega + \varphi + \varphi_1)}, \quad (3)$$

где  $\gamma_0$  – объемная масса плотного грунта;

- $\varphi$  угол внутреннего трения;
- $\varphi_1$  угол внешнего трения;
- ∝ угол резания;
- $\omega$  угол наклона плоскости сдвига;
- h толщина срезаемой стружки;
- В ширина ножа;
- с сцепление среды.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Зеленин А. Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. М., Машиностроение, 1968.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Александров А. Я. Выбор рациональной температуры асфальтобетона. Сб. «Автомобильный транспорт и дороги», К.: Техника, 1971. С. 53–56.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Холодов А. М. Теоретическое выражение сопротивления грунталобовому резанию широким плоским ножом. Сб. Горные, строительные и дорожные машины, К., 1965, в. 1. С. 16–18.

Вторая составляющая зависимости (2) определяется уравнением

$$P_{\pi.3.p.\kappa} = K_{p} \cdot B \cdot D \cdot \tau \cdot \frac{\sin(\gamma_{3.x} + \varphi_{1})}{\cos\varphi}, \qquad (4)$$

где К<sub>р</sub> – коэффициент, учитывающий форму щебня, его гранулометрический состав и распределение в массиве;

D – средний диаметр фракции щебня;

*Y*<sub>3.х</sub> − угол захвата;

*τ* – предел прочности щебня при раскалы вании.

Аналитические зависимости, предложенные автором указанной работы, безусловно, являются полезными с научной точки зрения, однако получить экспериментально значение таких показателей, как угол внутреннего трения и угол внешнего трения для различных температур и марок асфальтобетона на практике не представляется возможным. Кроме того, в формуле (3) сложные процессы хрупкого разрушения заменяются достаточно упрощенной формулой разрушения от сдвиговой нагрузки.

Отметим также, что значения указанных составляющих силы сопротивления резанию имеют некий мгновенный характер, что затрудняет определение работы силы резания и, следовательно, энергетических параметров процесса.

Однако с научной точки зрения интересен экспериментальный комплекс работ, выполненный автором. Александровым были получены зависимости коэффициента сопротивления резания от ширины ножа при разработке разогретого асфальтобетона (рисунок 1). Это действительно те данные, которые можно использовать на практике при решении задач проектирования машин, однако они обладают рядом условностей. Во-первых, сам по себе подход, который позволяет заменять сложные процессы, возникающие на режущем элементе неким коэффициентом удельной нагрузки, вызывает спор. Так как на графике показано, что этот коэффициент принимает различные значения для различных ножей, говорить об адекватности данного подхода не приходится. Отметим так же, что результаты этих исследований непригодны для современных типов режущих элементов, где режущая часть представляет собой цилиндрический наконечник, закругляющийся в ходе эксплуатации в виде полусферы. Да и требования к прочности асфальтобетонов со времен указанных исследований существенно изменились.



Рисунок 1 – Зависимость удельной силы резания для различных ножей от температуры асфальтобетона Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The dependence of the applied cutting force for various knives on the temperature of the asphalt concrete. Source: compiled by the authors.

Значимыми факторами при определении нагрузок на рабочем органе являются прочностные и деформативные свойства обрабатываемого материала. В своей работе Ю. Г. Глебов<sup>4</sup> предлагает определять силу резания следующей зависимостью:

$$P_{\rm p} = k \cdot F_{\rm cp} \cdot \sigma, \tag{5}$$

где k – безразмерный коэффициент сопротивления резанию, учитывающий особенности упруго-пластических свойств асфальтобетона;

*F*<sub>cp</sub> – суммарное среднее сечение стружки, определяемое одним оборотом фрезы;

 σ – предел прочности асфальтобетона на одноосное сжатие.

Неработоспособность указанного подхода проявляется в том, что предел прочности стандартных образцов на одноосное сжатие ограничен сцеплением между отдельными зернами асфальтобетона. Однако на силу сопротивления резанию существенное влияние оказывает и прочность самих зерен, которые разрушаются в различной степени в процессе фрезерования.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Глебов Ю. Г., Губанцев А. В. Резание асфальтобетонного покрытия при ямочном ремонте дорог. Тр.Горьковского политехнического института, Горький, 1975. Т. 31, в. 8. С. 18–20.

С точки зрения практического использования обладают результаты экспериментальных исследований [3, 4], авторы которых подробно рассмотрели различные случаи установки режущих элементов и определили усилия, которые постоянно изменяются по величине в процессе резки из-за сколов и хрупкости породы.

Важными полученными данными из работы [5] были факторы, влияющие на энергопотребление холодного фрезерного станка и характеристики нагрузки двигателя.

Авторы работ [6, 7] подробно рассмотрели получение количественных значений нормальной и касательной составляющих сопротивления резания в процессе разработки прочных грунтов.

М. П. Бараташвили [8] приводит конкретные значения удельных нагрузок на режущий элемент. К сожалению, применяемые формы режущих элементов с твердосплавными пластинами, которые использовались при экспериментальных исследованиях В. Ф. Кулепова и М. П. Бараташвили на сегодняшний день не используются. Однако эти и другие работы обладают большой практической ценностью, которая заключается в получении зависимости удельного напряжения резания от угла резания и ширины режущего элемента.

Одним из недостатков указанных работ является неполное соответствие параметров рабочего процесса фрезерования стендовыми рабочими органами в сравнении с реальными машинами.

Аналитическое определение сил сопротивления резанию грунтов и прочных дорожно-строительных материалов отражены в работах [9, 10], авторы предложили новый метод определения мгновенной составляющей силы резания, возникающей на фрезерном барабане, в котором предложили три алгоритма модели сопротивления резанию. Авторы указывают на хорошую достоверность результатов.

Анализ и изучение скоростных характеристик, влияющих на процессы резания, представлены в исследованиях [11, 12], авторы впервые представили расчётные зависимости данных параметров для различных конструкций рабочих органов. Приведён расчёт, по результатам которого определены условия рационального применения того или иного типа установки фрезы в забое. А. А. Машенский<sup>5</sup> рассмотрел процессы, происходящие при скоростном резании грунтов. Установлена зависимость силы сопротивления грунта резанию от скорости взаимодействия с учетом сжимаемости грунта и возникновением силы волнового сопротивления. Привел аналитические зависимости для расчета составляющих полной силы сопротивления скоростного резания грунта. Аналогичные испытания, с разными типами режущих элементов проводились в работе [13].

Несоответствие результатов геометрического моделирования работы фрезы, с колебательным изменением суммарной толщины срезаемой стружки от значений мгновенной нагрузки на фрезерной машине, оснащенное гидроприводом, показано в работе [14]. Это подтверждает нелинейный характер изменения сил резания с увеличением толщины срезаемой стружки. Энергоэффективность фрезерной машины исследуется путем постановки полевого эксперимента в работе [15]. На основе полученных результатов предлагается использовать модель, позволяющую подстраивать параметры привода под используемые режимы работы фрезерного агрегата. Указывается на существенное увеличение коэффициента использования мощности привода и увеличение коэффициента полезного действия.

Работа [16] посвящена стойкости фрезерного инструмента. Применительно к асфальтовым бетонам можно отнести исследование [17], посвященное влиянию свойств материала и режимов работы машины на скорость изнашивания резца.

В процессе фрезерования резец срезает стружку сложной формы. На форму стружки влияют соседние борозды, глубина которых не только различна, она еще меняется по траектории хода резца. В такой ситуации вообще сложно определить, что считать толщиной срезаемой стружки. Для каменных материалов такое исследование проводилось в работе [18] на экспериментальной установке, для асфальтобетонов вопрос остается открытым.

С каждым годом появляется все больше асфальтобетонов новых марок. Небольшое изменение состава повлечет за собой существенное изменение сопротивляемости резания. Наряду с этим происходит модернизация режущих элементов. Однако применительно к

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Машенский А. А., Машенский Ю. А., Синкевич П. Н. Обоснование кинетических параметров почвообрабатывающих фрез // Тракторы, автомобили, мобильные энергетические средства: проблемы и перспективы развития: доклады Международной научно-технической конференции, посвящ. 80-летию со дня рождения д-ра техн. наук, проф. Скотникова В. А., Минск. БГАТУ. 2009. С. 466–473.

существующим машинам и наиболее используемым дорожным покрытиям можно и нужно определять параметры рабочего процесса для создания новых, более эффективных машин и улучшения режимов работы существующих.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучение процесса фрезерования целесообразно выполнять с исследования взаимодействия с материалом одного режущего элемента фрезерного барабана. Поэтому для обоснования возникающих нагрузок на режущем элементе был выбран экспериментальный подход.

С этой целью использовался консольный вертикально-фрезерный станок, который обеспечивает жесткость станины и, как следствие, геометрическую стабильность процесса. Появилась возможность определять силовые и энергетические характеристики процессов резания и дробления, возможность регулирования в широком диапазоне геометрических и динамических параметров процессов резания, таких как тип, способ установки и угол наклона режущего элемента и т. д.

Стенд состоит из вертикального консольно-фрезерного станка модели 6Р12П. На станке установлены: нижняя подвижная плита 1, для фиксации образцов асфальтобетона; линейная направляющая 2. обеспечивающая жёсткость конструкции: два шариковых подшипника 3, предназначенных для возможности перемещения плиты относительно станины станка; кронштейн 4, к которому крепится горизонтальный S-образный датчик 5, соединённый с подвижной плитой. Кроме того, к конусу под шпиндель 6 крепится верхний рычаг 7, передающий усилие на вертикальный S-образный датчик 8. Нижний рычаг 9 соединен со стойкой 10, на которой расположен резцедержатель 11 с режущим элементом. Общий вид стенда показан на рисунке 2, а.



б

Рисунок 2 – Экспериментальный стенд: а – общий вид стенда для исследования процессов резания и динамического разрушения асфальтобетонов; б – функциональная схема измерительной системы Источник: составлено авторами.

> Figure 2 – Experimental bench: a) – general view of the bench for studying the processes of cutting and dynamic destruction of asphalt concrete; b) – functional diagram of the measuring system Source: compiled by the authors.



#### РАЗДЕЛ І ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Измерительная система (рисунок 2, *б*) разработана с учетом требований по чувствительности датчика, скорости записи, возможности анализа полученных результатов и возможности фильтрации сигнала. Система состоит из двух S-образных тензометрических датчиков растяжения-сжатия *5*, *8*, тензометрической станции *12* и персонального компьютера *13*. Перед началом экспериментальных работ была произведена тарировка тензометрических датчиков. В момент резания производится передача усилия через систему рычагов на регистрирующие датчики. Сигнал передается на усилитель с аналого-цифровым преобразователем и далее на персональный компьютер. Схема экспериментального стенда и силы, возникающих на режущем элементе, представлены на рисунке 3.

В ходе проведения опытов определялась зависимость сил резания от площади сечения стружки и характера её развития. Один из вариантов формирования сечения стружки представлен на рисунке 4.



Рисунок 3 – Схема экспериментального стенда а – общий вид; б – силы на режущем элементе Источник: составлено автороми.

Figure 3 – Scheme of the experimental stand. a) general view, b) force on the pass element Source: compiled by the authors.



Рисунок 4 – Схема формирования сечения стружки Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Chip section formation diagram Source: compiled by the authors.

176



Рисунок 6 – Регистрация показаний тензометрических датчиков Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Registration of readings of strain gauges. Source: compiled by the authors.

Проанализировав зависимость силы резания от площади сечения стружки резца, появляется возможность определить оптимальное количество режущих элементов на фрезерном барабане и их расположение.

Режущий элемент любого фрезерного рабочего органа в процессе взаимодействия с материалом совершает вращательное и поступательное движение, выраженное уравнением трохоиды. Геометрические параметры режущего элемента А6/20 [20] представлены на рисунке 5.



Рисунок 5 – Геометрические параметры режущего элемента<sup>6</sup>

Figure 5 – Geometrical parameters of the cutting element<sup>6</sup> Экспериментальные работы производились в следующем порядке:

1) Производится установка образца и его фиксация.

 При помощи ходовых винтов консольного вертикально-фрезерного станка устанавливается нужная глубина фрезерования.

 Настраивается необходимая подача стола.

4) Происходит снятие стружки материала.

В ходе эксперимента происходила запись показаний с двух тензометрических датчиков (рисунок 6).

Наряду с регистрацией показаний происходил замер площади сечения стружки режущего элемента (рисунок 7).

С помощью кузовной линейки, с шириной пластин 1 мм, происходило копирование формы сечения стружки. Полученный результат с исходными данными фотографировался, а дальше в программном комплексе Компас 3Д, происходило масштабирование сечения стружки, с последующим определением площади, ширины и глубины сечения стружки.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> ОАО «K3TC». Оригинальная конструкция дорожных резцов. Режим доступа: http://www.kzts.ru/core/user\_files/Road. pdf (дата обращения: 05.03.22).



Рисунок 7 – Пример определения площади сечения стружки Источник: составлено авторами.

Figure 7 – An example of determining the cross-sectional area of the chips Source: compiled by the authors.



Рисунок 8 – Графики изменения горизонтальных сил резания при различной площади сечения стружки:

а – при резании образцов асфальтобетона марки Б-2;

б – при резании образцов асфальтобетона марки В-3;

в – при резании образцов асфальтобетона марки МЗП-2;

г – при резании образцов асфальтобетона марки ЩМА-20 Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Graphs of changes in horizontal cutting forces for different chip cross-sectional areas: a) when cutting samples of asphalt concrete grade B-2;

b) when cutting samples of asphalt concrete grade V-3;

c) when cutting samples of asphalt concrete grade MZP-2;

d) when cutting samples of asphalt concrete grade ShMA-20

Source: compiled by the authors.

#### Таблица

Зависимости усредненных сил резания от площади следа резца Источник: составлено авторами.

Table

Dependencies of averaged cutting forces on cutter trace area Source: compiled by the authors.

Марка асфальтобетона	Уравнение регрессии	Коэффициент достоверности. R <sup>2</sup>
В-3	F <sub>rop</sub> =-0.752·S <sup>2</sup> +63.659·S	R <sup>2</sup> =0.9258
МЗП-2	F <sub>rop</sub> =190.39⋅S <sup>0.4324</sup>	R <sup>2</sup> =0.6783
Б-2	F <sub>rop</sub> =-1.1403·S <sup>2</sup> +82.605·S-6.3117	R <sup>2</sup> =0.9769
ЩМА-20	F <sub>rop</sub> =-0.2143·S <sup>2</sup> +56.607·S	R <sup>2</sup> =0.873

Для проведения эксперимента были использованы образцы асфальтобетона марок Б-2, В-3, МЗП-2<sup>7</sup> и ЩМА-20<sup>8</sup>.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка мощности привода фрезерного барабана и энергоемкости рабочего процесса фрезерования может быть осуществлена только при известных средних значениях горизонтальной составляющей сил сопротивления резанию. Полученные графики (рисунок 8) хорошо показывают нелинейный характер роста сил сопротивления резанию в зависимости от площади следа резца.

Вертикальная составляющая силы сопротивления резания не определяет энергетических характеристик машины, однако влияет на прочностные показатели фрезерного барабана и тягово-сцепные качества машины в целом. Установлено, что

$$F_{\rm B} = (0.9 - 1.1) \cdot F_{\rm r}. \tag{6}$$

Регрессионные зависимости горизонтальных сил резания, которые могут быть использованы для расчетов при проектировании фрезерного оборудования, для асфальтобетонов различных марок приведены в таблице.

#### ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс фрезерования является сложным и многофакторным процессом. Благодаря полученным экспериментальным данным, были выявлены уравнения зависимости, построены графики, отражающие зависимость сил сопротивления резанию от площади сечения стружки, что подтверждается высоким значением коэффициента достоверности.

По результатам эксперимента было сделано несколько выводов:

 установленные зависимости имеют нелинейный характер;

- опираясь на полученные регрессионные зависимости, было выявлено, что предыдущие исследования не в полной мере отражают определение значения силы резания;

 энергоемкость процесса фрезерования существенно зависит от типа и марки асфальтобетона;

 полученные данные являются исчерпывающими для составления математической модели и методики расчета фрезерного оборудования.

Полученные регрессионные зависимости позволяют не только определять нагрузки на рабочий орган и энергоемкость процесса, но и обоснованно подходить к вопросам размещения режущих элементов на барабане, определять рациональную область режимов работы оборудования, решать задачи выбора режимов работы в зависимости от типа асфальтобетона.

На основании полученных данных не только можно, но и необходимо разработать математическую модель для расчета параметров рабочего оборудования дорожной фрезы.



<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> ГОСТ 9128–2013 Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов.

<sup>&</sup>lt;sup>в</sup> ГОСТ 31015–2002 Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон щебеночно-мастичные.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вершинин А. В. Влияние неравномерности скорости резания мерзлого грунта подкопочной машины на энергоемкость его разрушения // Современные проблемы науки и образования. 2014. №6. URL: https://www.elibrary.ru/ item.asp?id=22877306(дата обращения: 16.12.2020).

2. Николаев В. А. Ориентировочный расчёт мощности циклического резания грунта // Вестник СибАДИ. 2019. № 16(3). С. 228–240. https://doi. org/10.26518/2071-7296-2019-3-228-240

3. Bilgin N., Demircin M. A., Copur H. Dominant rock properties affecting the performance of conical picks and the comparison of some experimental and theoretical results // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2006. №1(43). C. 139–156. URL: https://www.sciencedirect.com/ science/article/pii/S1365160905000572?via%3Dihub. (дата обращения: 20.03.2020).

4. Mostafavi S.S. Effect of attack angle on the pick performance in linear rock cutting // 45th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium. 2011. URL: https://www.researchgate.net/publication/287323602. (дата обращения: 20.03.2020).

5. Peng-yu M., Yong-biao H., Xin-rong Z. Research on adaptive power control parameter of a cold milling machine // Simulation Modelling Practice and Theory. 2008. №9(16). С. 1136-1144. URL: https:// www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/ S1569190X08001184?via%3Dihub. (дата обращения: 20.03.2020).

6. Кабашев Р. А., Тургумбаев С. Д. Экспериментальные исследования процесса копания грунтов роторно-дисковыми рабочими органами под гидростатическим давлением // Вестник СибАДИ. 2016;(4(50)). С. 23–28.

7. Берестов Е. И., Кутынко Р. И. Экспериментальные исследования резания грунта // Вестник Белорусско-Российского университета. 2009. №1(22). С. 92-100.URL: https://cyberleninka.ru/ article/n/eksperimentalnye-issledovaniya-rezaniyagrunta/viewer(дата обращения: 20.03.2020).

8. Бараташвили М. П. Определение влияющих факторов на режимы работы машины и их значение для разрушения поверхностных слоев асфальтобетонных покрытий // Научный электронный архив. URL: http://econf.rae.ru/article/6606 (дата обращения: 10.01.2020).

9. Wang X. Bin, Hu Y.B., Lu P.Z. Calculation model and test correction of single tool's milling resistance force of asphalt concrete // ZhongguoGongluXuebao/ China Journal of Highway and Transport. 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/306182889. (дата обращения: 10.01.2020).

10. Liu C.S., Li D.G. Mathematical model of cutting force based on experimental conditions of single pick cutting // MeitanXuebao/Journal of the China Coal Society. 2011. URL: https://www.researchgate. net/publication/286723599. (Дата обращения: 10.01.2020).

11. Николаев В. А. Анализ циклического резания грунта. Вестник СибАДИ. 2019. № 16(6) С. 642–657. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-642-657.

12. Вершинин А. В., Ерасов И. А., Левшунов Л. С., Янкович А. В. Влияние неравномерности скорости резания мёрзлого грунта подкопочной машины на энергоёмкость его разрушения // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6.; URL: https://science-education.ru/ru/article/ view?id=16611 (дата обращения: 18.03.2022).

13. Семкин Д. С. О влиянии скорости рабочих органов землеройных машин на силу сопротивления грунта резанию // Вестник СибАДИ. 2017. № 1 (53). С. 37–43.

14. Hu Y.B., Ma P.Y., Zhang X.R. Modelling and simulating of cold milling machine // Chang'anDaxueXuebao (ZiranKexue Ban)/ Journal of Chang'an University (Natural Science Edition). 2008. URL: https://www.researchgate. net/publication/298243176. (дата обращения: 13.01.2020).

15. Wang X., Hu Y. Numerical calculation on multitool milling resistance of asphalt pavement milling machine // Hsi-An Chiao Tung Ta Hsueh/Journal of Xi'an Jiaotong University. 2016.URL:https://www. researchgate.net/publication/306193701.(дата обращения: 13.01.2020).

16. Попов С. Н., Антонюк Д. А. Исследование влияния внешних условий изнашивания на износостойкость резцов дорожной фрезы // Новіматеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2008. № 1. С. 25–29. URL: https://cyberleninka.ru/ article/n/issledovanie-vliyaniya-vneshnih-usloviyiznashivaniya-na-iznosostoykost-reztsov-dorozhnoyfrezy/viewer(дата обращения: 24.03.2020).

17. Hekimoglu O.Z. Suggested methods for optimum rotative motion of point attack type drag tools in terms of skew angles // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/336811965. (дата обращения: 13.01.2020).

18. Park J.Y. A study on rock cutting efficiency and structural stability of a point attack pick cutter by lab-scale linear cutting machine testing and finite element analysis // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018.URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S1365160916305445?via%3Dihub.(дата обращения: 31.01.2020).

#### REFERENCES

1. Vershinin A. V. Vlijanie neravnomernosti skorosti rezanija merzlogo grunta podkopochnoj mashinynaj energoemkost' ego razrushenija [The influence of the uneven cutting speed of the frozen soil of the digging machine on the energy intensity of its destruction] *Sovremennye problemynaukii obrazovanija*. 2014; 6. ([n Russ.) URL: https://www.elibrary.ru/item. asp?id=22877306. (assessed: 16.12.2020).

2. Nikolayev V. A. Approximate calculation of the circular soil cutting capacity. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;16(3):228-240. (In Russ.) https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-228-240

3. Bilgin N., Demirkin M. A., Kopur H. The dominant properties of rocks affecting the performance of conical

picks, and a comparison of some experimental and theoretical results. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2006; 1(43): 139-156. (in Russ.) URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160905000572 ?via%3Dihub. (Accessed: 03/20/2020).

4. Mostafavi S. S. The influence of the angle of attack on the performance of a pickaxe in linear cutting of rocks // 45th U.S. Symposium on Mining Mechanics. *Geomechanics*. 2011. URL: https://www.researchgate.net/publication/287323602. (accessed: 03/20/2020).

5.Peng-yu M., Yong-biao H., Xin-rong Z. The study of the adaptive parameter of the power control of a cold milling machine. *Practice and theory of simulation modeling*. 2008; 9(16): 1136-1144. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1569190X08001184 ?via%3Dihub. (accessed: 03/20/2020).

6. Kabashev R. A., Turgumbaev S. J. Experimental research of the process of digging soil rotary-disk working bodies under hydrostatic pressure. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016;(4(50)):23-28. (In Russ.)

7. Berestov E. I., Kutynko R. I. Jeksperimental'nye issledovanija rezanija grunta [Experimental studies of soil cutting. Bulletin of the Belarusian-Russian University]. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta*. 2009; 1 (22): 92-100. (in Russ.)

8. Baratashvili M. P. Opredelenie vlijajushhih faktorov na rezhimy raboty mashiny I ih znachenie dlj arazrushenija poverhnostnyh sloev asfal'tobetonnyh pokrytij [Determination of influencing factors on the operating modes of the machine and their significance for the destruction of surface layers of asphalt concrete coatings]. *Nauchnyjjelektronnyjarhiv*. URL: http://econf. rae.ru/article/6606. (in Russ.) (assessed: 10.01.2020).

9. Wang H. Bin, Hu Yu.B., Lu P.Z. Calculation model and test correction of the resistance force to milling asphalt concrete with one tool. ZhongguoGongluXuebao. *Chinese Journal of Highways and Transport*. 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/306182889. (accessed: 10.01.2020).

10. Liu S.S., Li D.G. Mathematical model of cutting force based on experimental conditions of single cutting. Meitanxuebao. *Journal of the Chinese Coal Society*. 2011. URL: https://www.researchgate.net/publication/286723599. (Date of reference: 10.01.2020).

11. Nikolayev V. A. Analysis of the cyclical ground cutting. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;16(6):642-657. (In Russ.) https://doi. org/10.26518/2071-7296-2019-6-642-657

12. Vershinin A.V., Erasov I.A., Levshunov L.S., Jankovich A.V. Vlijanie neravnomernosti skorosti rezanija mjorzlogo grunta podkopochnoj mashiny na jenergojomkosť ego razrushenija [The influence of uneven cutting speed of frozen soil of a digging machine on the energy intensity of its destruction]. *Sovremennye problem naukii ob razovanija*. 2014; 6. (in Russ.) URL: https://science-education.ru/ru/article/ view?id=16611 (accessed: 18.03.2022).

13. Semkin D. S. About influence of speed working bodies of digging machines on the resistance force of soil cutting. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017;(1(53)):37-43. (In Russ.) https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1(53)-37-43

14. Hu Yu.B., Ma P.Yu., Zhang H.R. Modeling and simulation of a cold milling machine // Changandaxuesuebao (Zirankexue Ban). *Journal of Chang'an University (Natural Sciences publication)*. 2008. URL: https://www.researchgate.net/ publication/298243176. (accessed: 01/13/2020).

15. Wang X., Hu Y. Numerical calculation of resistance to multi-tool milling of a milling machine for asphalt concrete pavement. Xi-An Chao Tong Ta Xue. *Journal of Xi'an Jiaotong University*. 2016. URL:https://www.researchgate.net/публикация/306193701. (Publication date: 13.01.2020).

16. Popov S. N., Antonjuk Ď. A. Issledovanie vlijanija vneshnih uslovij iznashivanija na iznosostojkosť rezcov dorozhnoj frezy [Investigation of the influence of external wear conditions on the wear resistance of road milling cutters]. *Novimateriali i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni*. 2008. No 1. pp. 25-29. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-vneshnih-usloviy-iznashivaniya-na-iznosostoykost-reztsov-dorozhnoy-frezy/viewer. (accessed: 24.03.2020).

17. Hekimoglu O. Z. Proposed methods of optimal rotational motion of point-type drawing tools in terms of tilt angles. *International Journal of Mining, Land Reclamation and the Environment.* 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/336811965. (accessed: 13.01.2020).

18. Park J. Y. Investigation of the efficiency of rock cutting and structural stability of a point-attack milling cutter using laboratory tests of a linear cutting machine and finite element analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* 2018. URL:https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160916305445?via%3Dihub. (accessed: 31.01.2020).

#### ВКЛАД СОАВТОРОВ

Фурманов Д. В. Организация работы авторского коллектива, формирование направления и формулирование проблемы исследования, постановка задач и методики проведения исследования, разработка и создание испытательного стенда, корректирование материала статьи.

Лысаков Н. Э. Обзор предшествующих исследований, разработка и создание испытательного стенда, подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных, подготовка материала для статьи.

Шамахов Л. М. Разработка и создание испытательного стенда, подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных.

#### **CO-AUTHORS' CONTRIBUTION**

Denis V. Furmanov. The organization of the work of the author's team, the formation of the direction and formulation of the research problem, the formulation of tasks and methods of research, the development and creation of a test bench, the correction of the material of the article.

Nikita E. Lysakov. Review of previous studies, development and creation of a test bench, preparation and conduct of experimental studies, processing of the data obtained, preparation of material for the article.

Leonid M. Shamakhov. The development and creation of a test bench, preparation and conduct of experimental studies, processing of the data obtained.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фурманов Денис Владимирович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные и дорожные машины».

Лысаков Никита Эдуардович – аспирант кафедры «Строительные и дорожные машины».

Шамахов Леонид Михайлович – студент кафедры «Строительные и дорожные машины».

#### **INFORMATION ABOUT AUTHORS**

Denis V. Furmanov – Cand. of Sci., Associate Professor of the Construction and Road Machinery Department.

Nikita E. Lysakov – Postgraduate Student of the Construction and Road Machines Department.

Leonid M. Shamakhov – Student of the Construction and Road Machines Department.

# РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT УДК 504:656.13:502.3.054, 504.064.36 https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-184-197 https://elibrary.ru/JGFTGV Научная статья



# СИСТЕМНАЯ ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ НА АТМОСФЕРУ УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ

Е. В. Бондаренко<sup>1</sup>, А. А. Филиппов<sup>1</sup>, И. Ф. Сулейманов<sup>2</sup>, Ш. М. Минатуллаев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия, <sup>2</sup>Набережночелнинский институт (филиал) Казанский федеральный университет, г. Набережные Челны, Россия, <sup>3</sup>Дагестанский государственный аграрный университет имени М.М. Джамбулатова», г. Махачкала, Республика Дагестан, Россия http://orcid.org/0000-0003-2065-9227, aafilippov1979@gmail.com, http://orcid.org/0000-0002-8957-9762 real7best@mail.ru, http://orcid.org/0000-0003-0867-5574 interpol1199@mail.ru, http://orcid.org/0000-0003-3831-688X ზответственный автор

#### АННОТАЦИЯ

Введение. Для исследования урбанизированной территории как системы использован подход, позволяющий оценивать газообразное и дисперсное загрязнения атмосферы с использованием единой шкалы экологической опасности. Рассматривались особенности загрязнения воздуха урбанизированных территорий, где на ограниченных перенаселённых площадях сосредоточено значительное количество стационарных и передвижных источников негативного воздействия на окружающую среду.

**Цель исследования.** использование теоретических основ для системной оценки уровня экологической опасности участка урбанизированной территории при воздействии улично-дорожной сети за счёт совокупности газообразного и дисперсного загрязнений атмосферы.

Методы и материалы. На основе усовершенствованной модели системы «Урбанизированная территория» предложена следующая гипотеза: 1) автотранспортные потоки являются одновременно и самостоятельными источниками образования дисперсных частиц, и источниками взмётывания и распространения частиц, что в присутствии газообразных загрязняющих веществ повышает уровень экологической опасности загрязнения атмосферы урбанизированной территории; 2) загрязнение атмосферы урбанизированной территории формируется при наложении газообразных загрязняющих веществ и дисперсных частиц от улично-дорожной сети на загрязняющий фон других элементов системы «Урбанизированная территория».

**Результаты.** Получены карты распределения расчётного комплексного индекса загрязнения атмосферы на наиболее проблемных участках урбанизированной территории г. Набережные Челны – проспекта Мира и Казанского проспекта. Полученные результаты характеризуют изменение уровня экологической опасности участков урбанизированной территории при наложении газообразных загрязняющих веществ и дисперсных частиц от улично-дорожной сети на загрязняющий фон других элементов системы «Урбанизированная территория».

**Обсуждение и заключение.** На основе обобщения и сравнения результатов предыдущих и настоящих исследований авторов, сопоставления их с результатами других исследователей полностью подтверждена гипотеза.

Заключение. С подтверждением гипотезы достигнута цель исследования, которое имеет научную новизну и практическую значимость для обустройства благоприятной и комфортной городской среды.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** автотранспортные потоки, улично-дорожная сеть, урбанизированная территория, экологическая опасность, дисперсные частицы, загрязняющие вещества.

**БЛАГОДАРНОСТИ**. Авторы выражают искреннюю благодарность и признательность анонимным рецензентам за нелёгкий труд по глубокому анализу работы и ценные замечания, которые взяты в работу и учтены полностью.

© Бондаренко Е. В., Филиппов А. А., Сулейманов И. Ф., Минатуллаев Ш. М., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License. Статья поступила в редакцию 14.11.2021; одобрена после рецензирования 06.03.2022; принята к публикации 12.04.2022.

Авторы прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Бондаренко Е. В. Системная оценка воздействия улично-дорожной сети на атмосферу урбанизированной территории / Е. В. Бондаренко, А. А. Филиппов, И. Ф. Сулейманов, Ш. М. Минатуллаев // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 2(84). С. 184-197. https://doi.org/10.26518/2071-7296- 2022-19-2-184-197

https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-184-197 https://elibrary.ru/JGFTGV Original article

# SYSTEMATIC ASSESSMENT OF STREET AND ROAD NETWORK IMPACT ON ATMOSPHERE OF URBANISED AREA

Elena V. Bondarenko <sup>1</sup>, Andrei A. Filippov <sup>\*</sup>, Ilnar F. Suleymanov <sup>2</sup>, Shamil M. Minatullayev <sup>3</sup> <sup>1</sup>Orenburg State University, Orenburg, Russia, <sup>2</sup>Naberezhnochelninsky Institute (branch) of Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia, <sup>3</sup>Dzhambulatov Dagestan State Agrarian University, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia http://orcid.org/0000-0003-2065-9227, aafilippov1979@gmail.com, http://orcid.org/0000-0002-8957-9762 real7best@mail.ru, http://orcid.org/0000-0003-0867-5574 interpol1199@mail.ru, http://orcid.org/0000-0003-3831-688X \*corresponding autho

#### ABSTRACT

**Introduction.** To study the urbanized territory as a system, an approach was used that allows assessing gaseous and dispersed atmospheric pollution using a unified scale of environmental hazard. The features of air pollution in urban areas were considered, where a significant number of stationary and mobile sources of negative environmental impact are concentrated in limited overpopulated areas.

**The purpose of the study.** the use of theoretical foundations for a systematic assessment of the level of environmental hazard of an urbanized area under the influence of the road network due to a combination of gaseous and dispersed atmospheric pollution.

**Methods and materials.** Based on the improved model of the Urbanized Territory system, the following hypothesis is proposed: 1) motor traffic flows are both independent sources of formation of dispersed particles and sources of uplifting and spreading of particles, which in the presence of gaseous pollutants increases the level of environmental hazard of atmospheric pollution in an urbanized area; 2) atmospheric pollution of an urbanized area is formed when gaseous pollutants and dispersed particles from the street and road network are superimposed on the polluting background of other elements of the Urbanized territory system.

**Results.** The distribution maps of the calculated complex index of atmospheric pollution were obtained for the most problematic areas of the urbanized territory of Naberezhnye Chelny - Prospekt Mira and Kazansky Prospekt. The obtained results characterize the change in the level of environmental hazard of urbanized areas when gaseous pollutants and dispersed particles from the street and road network are superimposed on the polluting background of other elements of the Urbanized territory system.

**Discussion and conclusion.** Based on the generalization and comparison of the results of previous and current studies of the authors, comparing them with the results of other researchers, the hypothesis was fully confirmed. **Conclusion.** With the confirmation of the hypothesis, the goal of the study was achieved, which has scientific novelty and practical significance for the arrangement of a favorable and comfortable urban environment.

KEYWORDS: traffic flows, road network, urbanized area, environmental hazard, dispersed particles, pollutants.

© Bondarenko E. V., Filippov A. A., Suleymanov I. F., Minatullayev S. M., 2022



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



**THANKS.** The authors express sincere gratitude to anonymous reviewers for the difficult work on a deep analysis of the work and valuable comments, which are taken into account and will be fully taken into account.

# The article was submitted 14.11.2021; approved after reviewing 06.03.2022; accepted for publication 12.04.2022.

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:* Elena V. Bondarenko, Andrei A. Filippov, Ilnar F. Suleymanov, Shamil M. Minatullayev Systematic assessment road network impact on atmosphere of urbanized area. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2022; 19 (2): 184-197. https://doi.org/10.26518/2071-7296- 2022-19-2-184-197

#### ВВЕДЕНИЕ

Особенностью урбанизированных территорий является сосредоточение на ограниченных перенаселённых площадях значительного количества стационарных и передвижных источников загрязнения окружающей среды. В этой связи закономерности образования загрязнений урбанизированных территорий имеют сложную многофакторную природу и, как следствие, многообразный характер отрицательного влияния на население. Поэтому обеспечение экологической безопасности урбанизированной территории - проблема, которая не сводится к однонаправленному воздействию на тот или иной источник загрязнения. Требуется принятие мер, базирующихся на системном представлении о процессах загрязнения урбанизированных территорий, где воздействие источников на окружающую среду не сводится к простой аддитивной модели, так как она не учитывает большое число случайных сочетаний различных факторов. Для исследования урбанизированной территории как системы наилучшим образом применим подход, позволяющий оценивать газообразное и дисперсное загрязнения с использованием единой шкалы экологической опасности. Кроме того, системная оценка учитывает уровень экологической опасности урбанизированной территории в целом, а также позволяет ранжировать вклад различных источников в её загрязнение. Именно поэтому такие методики остаются актуальным и востребованным инструментом для системных исследований воздействия автомобильного транспорта на атмосферу урбанизированных территорий, где сочетается действие газообразного и дисперсного загрязнений.

Авторами данной статьи в публикации [1] рассматривались особенности загрязнения воздуха урбанизированных территорий, где дисперсные частицы (ДЧ) выступали в качестве основного загрязнителя воздуха. Газо-

образное загрязнение учитывалось в виде постоянной составляющей, формирующейся в условиях строгих ограничений выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) с отработавшими газами автомобилей и стационарных источников. При этом содержание в воздухе ДЧ, имеющих автотранспортное, промышленное и иное происхождение, значительно меняется во времени и пространстве и зависит от характера протекания процессов взмётывания, распространения и осаждения, которые определяются фракционным составом (дисперсностью) частиц, структурно-функциональными параметрами автотранспортных потоков, природно-климатическими и урбанистическими особенностями территории и метеоусловиями. В результате протекания физико-химических процессов в атмосфере, ДЧ в совокупности с газообразными загрязнителями создаёт опасные для здоровья населения условия, механизм формирования которых изучен недостаточно.

Загрязнение воздуха урбанизированных территорий характеризуется наличием ДЧ различного химического и гранулометрического (фракционного) состава [2-30]. ДЧ образуются в результате сгорания топлива, изнашивания тормозных механизмов, шин, дорожного полотна, заноса извне частиц грунта, антигололёдных реагентов, протекания технологических процессов промышленных предприятий. Поэтому химический состав ДЧ, формирующихся в атмосфере урбанизированной территории, разнообразен. Однако степень вредного действия ДЧ в большей мере определяется не их химическим составом, а дисперсностью. По данным Всемирной организации здравоохранения ДЧ менее десяти микрометров (ДЧ 10, ДЧ 2,5) считаются опасными загрязняющими веществами.

Исследования ряда отечественных учёных посвящены раскрытию закономерностей образования ДЧ от автотранспорта, а также вопросам нормативного и инженерного ограничения их отрицательного действия на здоровье населения и окружающую среду [2, 3, 5, 7, 11, 12, 14, 17, 18]. В том числе исследованы вопросы образования ДЧ при работе силовых установок транспортных средств [3, 11, 18], изнашивании дорожных покрытий, шин [17, 18], тормозных механизмов [18, 19]. Изучены проблемы мониторинга ДЧ с учётом их гранулометрического состава, в том числе мелкодисперсных частиц (ДЧ 10 и ДЧ 2,5) [10, 18, 19, 20, 21, 22, 27]. Оценён риск смертности от мелкодисперсных частиц, выбрасываемых в атмосферу стационарными источниками . Также необходимо отметить значительный вклад зарубежных учёных в исследование данной актуальной темы [26, 28, 29, 30].

Приведённый обзор раскрывает значительные наработки российских и зарубежных учёных в исследуемой области. Установлены закономерности образования, мониторинга и ограничения как газообразных, так дисперсных загрязнений воздуха урбанизированных территорий. Однако открытым остаётся вопрос формирования сложной экологической ситуации, когда при строгих ограничениях выбросов ЗВ от передвижных и стационарных источников наблюдается высокий уровень опасности, являющийся совокупным итогом газообразного и дисперсного загрязнений атмосферы. Урбанизированная территория представляет собой систему, включающую элементы промышленно-транспортной и бытовой инфраструктуры, природно-антропогенных объектов, связанные улично-дорожной сетью, где отдельные виды загрязнений накладываются друг на друга и образуют совокупность со сложным взаимодействием. В таком контексте механизм образования загрязнений невозможно исследовать только на основе закономерностей, описывающих отдельные источники воздействия на окружающую среду. Для решения описанной научной проблемы авторами данной статьи использованы теоретические основы комплексного подхода к оценке экологической опасности урбанизированной территории, которые опубликованы ранее [31]. Целью настоящего исследования является использование разработанных теоретических основ для системной оценки уровня экологической опасности участка урбанизированной территории при воздействии улично-дорожной сети (УДС) за счёт совокупности газообразного и дисперсного загрязнений атмосферы.

Для реализации цели сформулированы следующие задачи исследования:

- усовершенствование модели системы «Урбанизированная территория», позволяющей определить уровень экологической опасности участка урбанизированной территории при воздействии УДС за счёт совокупности газообразного и дисперсного загрязнений атмосферы;

- раскрытие закономерностей изменения уровня экологической опасности участка урбанизированной территории при воздействии УДС за счёт совокупности газообразного и дисперсного загрязнений атмосферы;

- построение и использование карт распределения для оценки уровня экологической опасности загрязнения атмосферы наиболее проблемных участков урбанизированной территории г. Набережные Челны – проспекта Мира и Казанского проспекта.

Настоящая статья включает описание содержания исследования по таким основным структурным элементам, как: 1) методы и материалы; 2) результаты; 3) обсуждение и заключение.

#### МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В основе предлагаемого подхода лежит модель системы «Автотранспортный поток – урбанизированная территория» [31]. В настоящем исследовании предлагается её усовершенствовать, используя методы теории систем (рисунок 1).

В модели системы «Автотранспортный поток – урбанизированная территория» элементами системы являлись автотранспортные потоки и промышленные предприятия. УДС обеспечивала связи между ними. Взаимодействие системы с окружающей средой задавалось условиями окружающей среды (метеоусловиями), а также химическим и физическим (энергетическим) воздействием автотранспортных средств и промышленных предприятий.

В усовершенствованной модели системы «Урбанизированная территория» (рисунок 1) структура более детализирована. Она включает четыре группы элементов.

1) Городская застройка и прилегающие территории. В данную группу элементов системы входят жилые и общественные дома, здания и сооружения, а также прилегающая к ним территория с пешеходными и велосипедными дорожками, детскими и спортивными площадками, местами для движения и остановки личных автотранспортных средств и островками озеленения.



Рисунок 1 – Графическое представление о системе «Урбанизированная территория» Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Graphical representation of the Urbanized Territory system Source: compiled by the authors.

2) Предприятия коммунально-бытового, сервисно-транспортного и промышленного назначения. В данную группу элементов системы входят соответствующие здания, сооружения, площадки, а также санитарно-защитные и другие охранные зоны. Направление сервисно-транспортного назначения включает гаражи, стоянки, сервисы, заправочные станции, пункты продажи запасных частей и эксплуатационных материалов и другие автообслуживающие и автотранспортные предприятия.

3) Природно-антропогенные объекты. К данной группе элементов системы относятся экосистемы, природные ландшафты и составляющие их объекты, сохранившие природные свойства или частично изменённые в результате деятельности человека, имеющие рекреационное и защитное значение. 4) Улично-дорожная сеть. К данной группе элементов системы относятся автомобильные дороги, как инженерные сооружения, автотранспортные потоки, элементы обустройства, предназначенные для движения пешеходов, велосипедистов, остановочно-пересадочные пункты.

Отношение элементов к системе «Урбанизированная территория» определяется, во-первых, их территориальным единством, во-вторых, связями между ними, которые обеспечивает УДС. Третьим важным признаком системности является наличие цели. Выделение всех четырёх элементов из окружающей среды в систему происходит с целью обеспечения благоприятной и комфортной городской среды. Взаимодействие усовершенствованной системы с окружающей средой задаётся параметрами окружающей среды, в том числе метеоусловиями, а также химическим, физическим, биологическим<sup>1</sup> и стациально-деструкционным<sup>2</sup> воздействиями элементов системы на окружающую среду. Цель системы достигается за счёт обеспечения благоприятной окружающей среды<sup>3</sup>, то есть качества окружающей среды<sup>4</sup>. Качество окружающей среды определяется внешними параметрами (естественными факторами) и параметрами функционирования элементов системы «Урбанизированная территория». Совокупность параметров функционирования элементов задают степень негативного воздействия<sup>5</sup> системы на окружающую среду и её качество. При этом на параметры отдельно взятого элемента системы накладываются ограничения, связанные с функционированием других элементов системы (градостроительные, экологические и другие ограничения) и условиями окружающей среды. Такое представление об урбанизированной территории позволяет при исследовании выделять каждый источник негативного воздействия в отдельности с учётом системных связей, что является залогом объективности результатов изучения закономерностей образования, распространения, мониторинга и ограничения загрязнений и, в целом, разработки природоохранных мероприятий адекватно экологической ситуации.

В качестве индикатора качества окружающей среды авторы статьи в работе [31] предложили использовать комплексный индекс экологической нагрузки урбанизированной территории (КИЭН) на окружающую среду:

КИЭН = 
$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \rightarrow min,$$
 (1)

где КИЭН представлен в виде безразмерного критерия, определяющегося совокупностью {*x*<sub>1</sub>, *x*<sub>2</sub>, *x*<sub>3</sub>, ..., *x*<sub>n</sub>} параметров функционирования элементов системы «Урбанизированная территория», связанных взаимодействием между собой и с окружающей средой.

Данный критерий позволяет использовать широкую гамму методов для оценки качества окружающей среды и мониторинга загрязнений по химическому составу, а также акустическим и электромагнитным полям всех природных сред. В частности КИЭН использован авторами для моделирования экологической ситуации урбанизированной территории при различном сочетании способов организации движения автомобилей по выбросам газообразных ЗВ и транспортному шуму [31]. Также данный критерий применялся авторами при разработке концепции благоприятной и комфортной городской среды за счёт безопасного размещения сервисно-транспортной инфраструктуры городских многоэтажных застроек<sup>6,7</sup>.

Отметим, что в более ранних научных работах авторов имело место использование расчётного комплексного индекса загрязнения атмосферы (РКИЗА), предложенного Г.В. Мавриным и И.Ф. Сулеймановым<sup>8</sup>:

<sup>4</sup> Качество окружающей среды – состояние окружающей среды, которое характеризуется физическими, химическими, биологическими и иными показателями и (или) их совокупностью (определение из Федерального закона от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 02.07.2021) «Об охране окружающей среды»).

<sup>5</sup> Негативное воздействие на окружающую среду – воздействие хозяйственной и иной деятельности, последствия которой приводят к негативным изменениям качества окружающей среды (определение из Федерального закона от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 02.07.2021) «Об охране окружающей среды»).

<sup>6</sup> Филиппов А. А., Бондаренко Е. В., Рассоха В. И., Сулейманов И. Ф. Создание сервисно-транспортной инфраструктуры городских многоэтажных застроек по критериям экологической безопасности // Региональные проблемы геологии, географии, техносферной и экологической безопасности: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции (Оренбург, 18–20 ноября 2019 года). Оренбург. Издательство: ИП Востриков К «Полиарт», 2019. С. 352-356.

<sup>7</sup> Третьяк Л. Н., Вольнов А. С., Стрельников А. В. О возможных путях решения проблемы оценки экологической безопасности в местах стоянок и парковок автотранспорта в Оренбурге // Региональные проблемы геологии, географии, техносферной и экологической безопасности: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции (Оренбург, 18–20 ноября 2019 года). Оренбург: Издательство: ИП Востриков К «Полиарт», 2019. С. 338-345

<sup>8</sup> Сулейманов, И.Ф. Организация движения автомобилей на основе экологического мониторинга воздушного бассейна: автореф. дис. ... канд. техн. наук : защищена 05.07.2016; утв. 25.01.2017. Оренбург: ОГУ, 2016. 16 с.



<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Биологическое воздействие – воздействие на состав и структуру популяций живых организмов.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Стациально-деструкционное воздействие – ландшафтное воздействие на место обитание популяции живых организмов.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Благоприятная окружающая среда – окружающая среда, качество которой обеспечивает устойчивое функционирование естественных экологических систем, природных и природно-антропогенных объектов (определение из Федерального закона от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 02.07.2021) «Об охране окружающей среды»).

РКИЗА = 
$$\sum_{i=1}^{r} \left( \frac{C_{\text{м}i(\text{ст.})} + C_{\text{м}i(\text{авт.})}}{\Pi \text{ДK}_{i}} \right)^{\beta_{i}} = \sum_{i=1}^{r} \left( \frac{C_{\text{м}i}}{\Pi \text{ДK}_{i}} \right)^{\beta_{i}}$$
, (2)

где  $C_{Mi(CT.)}$  и  $C_{Mi(aBT.)}$  – максимальные приземные концентрации i-го 3В от стационарных источников и автотранспортных потоков, мг/м<sup>3</sup>;

 $C_{Mi}$  – общая максимальная приземная концентрация i-го 3В от стационарных источников и автотранспортных потоков ( $C_{Mi} = C_{Mi(CT.)} + C_{Mi(aBT.)}$ ), мг/м<sup>3</sup>;

ПДК<sub>*i*</sub> – предельно-допустимая концентрация і-го ЗВ в атмосфере населённого пункта, мг/м<sup>3</sup>;

β<sub>i</sub> – безразмерная константа, позволяющая соотнести степень вредности i-го 3В с вредностью диоксида серы;

*r* – количество 3В.

РКИЗА является индикатором качества атмосферы урбанизированной территории и хорошо вписывается в системные представления об исследуемых процессах, интегрируя экологические характеристики стационарных (С<sub>мі(ст.)</sub>) и передвижных (С<sub>мі(авт.)</sub>) источников по всем ЗВ. РКИЗА разграничивает уровни экологической опасности загрязнения атмосферы урбанизированной территории: низкий (РКИЗА=0...4), повышенный (РКИЗА=5...6), высокий (РКИЗА=7...13), очень высокий (РКИЗА≥14). Данный критерий является частным, производным от КИЭН, и использован авторами в целях настоящего исследования для раскрытия закономерностей изменения уровня экологической опасности участка урбанизированной территории при воздействии УДС за счёт совокупности газообразного и дисперсного загрязнений атмосферы.

Целесообразность использования частного критерия объясняется спецификой задач настоящего исследования, где требуется раскрыть закономерности, обусловленные взаимодействием элементов системы «Урбанизированная территория» между собой и атмосферой – частью окружающей среды, наиболее уязвимой в условиях современного города из-за значительного объёма выбросов газообразных ЗВ и ДЧ от УДС. Целевая функция системы запишется в следующем виде:

РКИЗА = 
$$f(x_1, x_2, x_3, ..., x_n) \to min.$$
 (3)

В таком виде целевая функция характеризует условие формирования благоприятной и комфортной городской среды через минимизацию уровня экологической опасности загрязнения атмосферы урбанизированной территории за счёт разработки природоохранных мероприятий, обеспечивающих необходимое сочетание параметров функционирования элементов системы  $\{x_1, x_2, x_3, ..., x_n\}$ . Таким образом, становится возможным рассматривать сколько угодно разные по протяжённости участки урбанизированной территории и выделять в их границах любые элементы, являющиеся основными источниками выбросов газообразных ЗВ и ДЧ, в том числе элементы УДС, если считать параметры их функционирования взаимосвязанными с параметрами других элементов системы и окружающей среды.

Для исследования выбраны два участка УДС города Набережные Челны, которые полностью соответствуют описанным выше представлениям о системе «Урбанизированная территория». Это проспект Мира и Казанский проспект (таблица 1).

#### Таблица 1

Материалы инвентаризации участков улично-дорожной сети Источник: составлено авторами.

#### Table 1

Materials of road network sections inventory Source: compiled by the authors.

Исследуемый участок	Интенсивность движения по типу автотранспортных средств, авт./20 мин						
	Л	АБ	AД	ГБ	ГД	в совокупности <sup>9</sup>	
1 пр-т Мира	1246	6	83	18	3	1356	
2 Казанский пр-т	1460	2	22	80	224	1788	

Л — легковые; АБ — автобусы бензиновые; АД — автобусы дизельные; ГБ — грузовые бензиновые; ГД — грузовые дизельные

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Доля газобаллонных автотранспортных средств составляет около 5 %.

На выбранных участках УДС наблюдается высокая интенсивность движения автотранспортных потоков. одна из самых высоких в г. Набережные Челны. На обоих участках в составе автотранспортных потоков представлены все типы автотранспортных средств. Имеется развитая городская застройка с прилегающей к исследуемым участкам территорией. Важно отметить, что градообразующим предприятием г. Набережные Челны является автозавод ПАО «КАМАЗ», влияние которого как мощного стационарного источника выбросов газообразных ЗВ и ДЧ равновелико на оба участка. Кроме того, на атмосферу городской застройки, прилегающей к проспектам, негативное воздействие оказывают многочисленные сервисно-транспортные предприятия.

Для оценки уровня экологической опасности загрязнения воздуха газообразными ЗВ использованы материалы ранее проведённых и опубликованных исследований [27, 31].

С помощью расчётно-инструментальной методики экологического мониторинга, разработанной И.Ф. Сулеймановым, выполнен сводный расчет рассеивания 143 ЗВ, образующих 28 групп суммации и составлены цифровые карты распределения приземных концентраций ЗВ г. Набережные Челны. Отмечено превышение ПДК по ЗВ из групп суммации СО и NO... Для CO зоны со значениями максимальных приземных концентраций более одного ПДК наблюдаются у 100 % обследованных участков УДС. Превышение ПДК по NO ожидается более чем у 70 % обследованных участков УДС. Таким образом, выбраны приоритетные газообразные 3В (СО и NO), по которым выполнена оценка. Уровень экологической опасности загрязнения воздуха газообразными ЗВ по проспекту Мира относится к повышенному (), а Казанскому проспекту – к высокому (РКИЗА<sub>тах</sub>=7,5).

На основе установленных для урбанизированной территории закономерностей загрязнения воздуха [1] предложена следующая гипотеза исследования: 1) автотранспортные потоки являются одновременно и самостоятельными источниками образования ДЧ. и источниками взмётывания и распространения частиц, что в присутствии газообразных ЗВ повышает уровень экологической опасности загрязнения атмосферы урбанизированной территории; 2) загрязнение атмосферы урбанизированной территории формируется при наложении газообразных ЗВ и ДЧ от УДС на загрязняющий фон других элементов системы «Урбанизированная территория». Для того, чтобы подтвердить гипотезу получены результаты оценки РКИЗА двух участков урбанизированной территории (проспекта Мира и Казанского проспекта) с учётом загрязнения атмосферы газообразными ЗВ и ДЧ.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе исследования для определения содержания ДЧ в воздухе применён инструментальный метод. Использован пылемер GRIMM Aerosol Spectrometer 1.109. При отборе проб фиксировались метеоусловия - направление и скорость ветра, а также температура и влажность воздуха. При измерении концентрации ДЧ в воздухе охватывался период времени с 8:00 до 20:00 часов. Учитывались параметры автотранспортных потоков исследуемых участков УДС, которые отражены в таблице 1. Исследуемые участки УДС относятся к автомобильным дорогам обычного типа II категории с асфальтобетонным покрытием. Результаты измерения использовались для расчёта средних концентраций ДЧ 10 и ДЧ 2,5 (таблица 2).

На всех исследуемых участках УДС имеется превышение среднесуточной предельно-допустимой концентрации (ПДК<sub>сс</sub>) по ДЧ. Причём кратность превышения ПДК<sub>сс</sub> тем больше, чем выше интенсивность автотранспортного потока. Однако уровень дисперсного загрязнения воздуха определялся не только интенсивностью.

Таблица 2 Концентрации ДЧ 10 и ДЧ 2,5 в точках отбора проб Источник: составлено авторами.

Table 2 Concentrations of PM 10 and PM 2,5 at sampling points Source: compiled by the authors

Точка отбора	Средние концентрации ДЧ, мкг/м <sup>3</sup>		ПДК <sub>с.с.</sub> , мкг/м <sup>3</sup>		Кратность превышения ПДК <sub>с.с.</sub>	
	ДЧ10	ДЧ2,5	ДЧ10	ДЧ2,5	ДЧ10	ДЧ2,5
1 пр-т Мира	317,73	60,35	60	35	5,30	1,73
2 Казанский пр-т	559,22	117,56			9,32	3,36

#### РАЗДЕЛ II ТРАНСПОРТ

Значимым фактором также являлся состав автотранспортного потока. Увеличение доли автобусов и грузовых автотранспортных средств, как наиболее мощных источников загрязнения по сравнению с легковыми, приводит к росту концентрации ДЧ в воздухе. Данный фактор проявлялся отчётливее с увеличением доли автотранспортных средств с дизельными двигателями, которые, по сравнению с бензиновыми, выбрасывают в атмосферу значительно большее количество ДЧ. Также необходимо отметить влияние метеорологических условий на уровень дисперсного загрязнения воздуха, который зависит от температуры и влажности воздуха, а также скорости ветра. Результаты исследования выделенных участков УДС по данным факторам полностью согласуются с установленными и опубликованными авторами ранее закономерностями дисперсного загрязнения воздуха урбанизированной территории [1]:

$$\begin{cases} C_{\mathcal{A}^{\mathsf{U}_{10}}} = 1276,08 - 22,56 \cdot t - 11 \cdot u - 118,96 \cdot v + 0,10 \cdot n \\ C_{\mathcal{A}^{\mathsf{U}_{25}}} = 250,17 - 5,72 \cdot t - 1,98 \cdot u - 20,87 \cdot v + 0,03 \cdot n \end{cases}$$
(4)

где t – температура воздуха, °С;

и – влажность воздуха, %;

v – скорость ветра, м/с;

n – интенсивность автотранспортного потока, авт./20 мин.

Важно отметить равнозначность для обоих исследуемых участков УДС повышенного загрязняющего фона, охватывающего городскую застройку и прилегающие территории, что является негативным результатом совокупного действия всех элементов системы «Урбанизированная территория», включая стационарные источники выбросов газообразных ЗВ и ДЧ. Также для обоих исследуемых участков УДС отмечен минимальный вклад ветровой эрозии в процесс дисперсного загрязнения воздуха, так как прилегающая территория имеет минимум незадернованных поверхностей.

На основе описанных выше исходных данных авторами получены карты распределения РКИ-ЗА на исследуемых участках УДС (рисунки 2, 3).



а) газообразное загрязнение

б) газообразное+дисперсное загрязнения

Рисунок 2 – Карты распределения РКИЗА на участке УДС «Проспект Мира» Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Distribution maps of RKIZA on the section of Prospect Mira street and road network Source: compiled by the authors.





а) газообразное загрязнение

б) газообразное+дисперсное загрязнения

Рисунок 3 – Карты распределения РКИЗА на участке УДС «Казанский проспект» Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Distribution maps of RKIZA on the section of the Kazansky Prospekt street and road network Source: compiled by the authors.

Полученные результаты характеризуют изменение уровня экологической опасности участков урбанизированной территории при наложении газообразных ЗВ и ДЧ от УДС на загрязняющий фон других элементов системы «Урбанизированная территория».

#### ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Максимальное значение РКИЗА наблюдается в зоне влияния автомобильных дорог исследуемых участков УДС. При самых благоприятных метеорологических условиях, когда дисперсное загрязнение отсутствует, уровень экологической опасности загрязнения воздуха по проспекту Мира относится к повышенному (РКИЗА = 5), а Казанскому проспекту – к высокому (РКИЗА = 7,5).

Наложение дисперсного загрязнения на газообразное, в случае неблагоприятных метеорологических условий, приводит к повышению уровня экологической опасности урбанизированной территории в 1,3-1,5 раза, включая и зоны влияния автомобильных дорог (20 м), и прилегающие территории с городской застройкой (200 м). В данном случае участок УДС «Проспект Мира» переходит в категорию урбанизированных территорий с высоким уровнем экологической опасности (РКИЗА = 7,5), что приравнивает его в этом смысле к Казанскому проспекту (РКИЗА = 10) с разницей по РКИЗА в 1,3 раза. Рост значений РКИЗА в зоне влияния автомобильных дорог и на прилегающих территориях с городской застройкой объясняется тем, что ДЧ размером менее 10 мкм имеют схожий с газообразными ЗВ механизм распространения. Более крупные ДЧ не дают такой эффект, так как процесс взмётывания под действием турбулентных вихрей от движущихся автотранспортных средств компенсируется гравитационным осаждением.

При удалении от автомобильной дороги в сторону городской застройки значение РКИ-ЗА уменьшается в 1,3 раза каждые 20 м, что в конечном итоге приводит снижению уровня экологической опасности с высокого до повышенного и низкого. На участке УДС «Проспект Мира» переход к низкому уровню экологической опасности происходит при удалении от автомобильной дороги на расстояние 50 м. На участке УДС «Казанский проспект» такой границей является расстояние 75 м. При отсутствии дисперсного загрязнения безопасные границы начинаются раньше, на расстоянии 35 и 50 м от автомобильной дороги соответственно. Такое распределение РКИЗА позволяет утверждать, что расстояние от участка УДС является значимым фактором, определяющим уровень экологической опасности как по газообразному, так и дисперсному загрязнению. С увеличением расстояния в результате протекания процессов рассеивания и осаждения концентрации газообразных ЗВ и мелкодисперсных частиц убывают, а крупнодисперсные частицы остаются в ближайшей зоне влияния автомобильных дорог. Кроме того, городская застройка препятствует распространению загрязнений на значительные расстояния.

Негативное воздействие на атмосферу остальных элементов, формирующих с УДС систему «Урбанизированная территория», необходимо рассматривать в качестве фонового. К такому выводу авторы пришли при сопоставлении результатов настоящего и предыдущих исследований [1, 27, 31]. Доля фона в общей картине загрязнения варьируется в диапазонах 2-19 % и 4-23 % соответственно для ДЧ 10 и ДЧ 2,5 в зависимости от состава и интенсивности автотранспортных потоков и метеоусловий. Доля фонового газообразного загрязнения составляет около 30 % и определяется параметрами функционирования стационарных источников выбросов газообразных 3В.

Обобщение и сравнение результатов предыдущих и настоящих исследований авторов, сопоставление их с результатами других исследователей показало основной вклад УДС в загрязнение атмосферы урбанизированной территории как по газообразным (более 70 %), так и по дисперсным (более 80 %) ЗВ. Автотранспортные потоки являются одновременно и самостоятельными источниками образования ДЧ, и источником взмётывания и распространения частиц за пределы УДС, что в присутствии газообразных ЗВ в 1,3-1,5 раза повышает уровень экологической опасности загрязнения атмосферы урбанизированной территории. Загрязнение атмосферы урбанизированной территории формируется при наложении загрязнения от УДС на загрязняющий фон остальных элементов системы «Урбанизированная территория». Таким образом, гипотеза, выдвинутая в начале настоящего исследования полностью подтверждается полученными результатами.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С подтверждением гипотезы достигнута цель настоящего исследования, которая заключается в использовании теоретических основ для системной оценки уровня экологической опасности участка урбанизированной территории при воздействии УДС за счёт совокупности газообразного и дисперсного загрязнений атмосферы. Научная новизна настоящего исследования заключается в усовершенствовании модели «Урбанизированная территория», которая определяет системное взаимодействие следующих элементов: 1) городская застройка и прилегающая территория; 2) предприятия; 3) природно-антропогенные объекты; 4) УДС. Уточнена структура и связи системы «Урбанизированная территория», которая позволяет сформировать совокупность показателей благоприятной и комфортной городской среды при наличии ограничений, связанных с взаимодействием всех элементов системы в условиях окружающей среды.

На основе уточнённых модельных представлений получены новые научные результаты по закономерностям изменения уровня экологической опасности участка урбанизированной территории при совокупном газообразном и дисперсном загрязнении атмосферы от УДС и других элементов системы «Урбанизированная территория».

Практическая значимость настоящего исследования заключается в использовании карт распределения РКИЗА для оценки уровня экологической опасности загрязнения атмосферы наиболее проблемных участков урбанизированной территории г. Набережные Челны - проспекта Мира и Казанского проспекта. Результаты оценки дают объективное представление о качестве атмосферы данных участков урбанизированной территории при наложении дисперсного загрязнения на газообразное с учётом совокупного воздействия УДС и других элементов системы «Урбанизированная территория». Карты распределения РКИЗА являются необходимым материалом для обоснования мероприятий по созданию благоприятной и комфортной городской среды. Ранжирование мероприятий по эффективности сокращения загрязнения воздуха газообразными ЗВ и ДЧ является объектом дальнейших исследований.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Филиппов А. А., Сулейманов И. Ф., Якунин С. Н. Особенности загрязнения воздуха дисперсными частицами урбанизированной территории «ИнноКам» // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2021. № 5. С. 72–80. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-5-72

2. Азаров В. К. Новые нормы на чёрный углерод в саже и его влияние с парниковыми газами CO<sub>2</sub> на потепление климата планеты // Журнал автомобильных инженеров. 2012. № 4 (75). С. 54-57. https:// elibrary.ru/download/elibrary\_18622742\_91184518.pdf

3. Азаров В. К., Кутенёв В. Ф., Степнов В. В. О выбросе твёрдых частиц автомобильным транспортом // Журнал автомобильных инженеров. 2012. № 6 (77). C. 55-58. https://elibrary.ru/download/ elibrary\_21972010\_73390786.pdf

4. Азаров В. Н., Кузьмичев А. А., Николенко Д. А., Васильев А. Н., Козловцева Е. Ю. Исследование дисперсного состава пыли городской среды // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. №3. С. 432-442. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.432-442

5. Гудков В. А., Комаров Ю. Я., Федотов В. Н. Методология активного воздействия на экологическую нагрузку городского автотранспорта: монография. – Волгоград: ВолгГТУ, 2009. – 143 с.

6. Денисов В. Н., Загриценко А. В. Микроскопические твердые частицы как приоритетный вид загрязнения атмосферного воздуха мегаполисов России // Охрана атмосферного воздуха. Атмосфера. 2010. № 3. С. 21-22.

7. Денисов В. Н., Федотов В. Н. Инженерный метод очистки воздушной среды городской УДС // Охрана атмосферного воздуха. Атмосфера. 2011. № 3. С. 54-59.

8. Денисов В. Н., Федотов В. Н. Инновации в снижении экологических рисков от воздействия автотранспорта в крупных городах // Дорожная держава. 2012. Специальный выпуск. С. 89-91.

9. Денисов В. Н., Копытенкова О. И. Микроскопические твердые частицы как приоритетный вид загрязнения атмосферного воздуха урбанизированной территории // Техносферная и экологическая безопасность на транспорте: материалы 3-й Международной конференции (Санкт-Петербург, ноябрь 2012 г.). СПб, 2012. С. 72-76.

10. Загороднов С. Ю., Май И. В., Кокоулина А. А. Мелкодисперсные частицы (РМ2,5 и РМ10) в атмосферном воздухе крупного промышленного региона: проблемы мониторинга и нормирования в составе производственных выбросов // Гигиена и санитария. 2019. Т. 98. № 2. С. 142-147.

11. Кульчицкий А. Р. Образование дисперсных частиц при горении топлива в дизелях // Экология и промышленность России. 2009. № 12. С. 35-37.

12. Лагузин А. Б., Карелина М. Ю., Гайдар С. М., Пастухов А. Г. Повышение экологической безопасности двигателей внутреннего сгорания в условиях эксплуатации // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2020. № 3 (27). С. 53-62. https://elibrary.ru/ download/elibrary\_44085221\_33097054.pdf

13. Ложкина О. В., Малышев С. А., Хахленов А. В. Исследование опасного загрязнения придорожного воздуха мелкодисперсными взвешенными частицами РМ10 и РМ2,5 на примере Санкт-Петербурга // Проблемы управления рисками в техносфере. 2021. № 2 (58). С. 96-103. https:// elibrary.ru/download/elibrary\_46260695\_70627725.pdf

14. Рапопорт О. А., Копылов И. Д., Рудой Г. Н. К вопросу о нормировании выбросов мелкодисперсных частиц размерами менее 10 мкм (ДЧ10) и менее 2,5 мкм (ДЧ2,5) // Экологический вестник России. 2012. № 4. С. 47-52.

15. Соболев А. А. К вопросу о движении частиц в воздушном потоке // Экология и промышленность России. 2009. № 2. С. 22-25. https://elibrary.ru/ download/elibrary\_11903334\_31826760.pdf 16. Субботина И. Е., Буевич А. Г., Сергеев А. П., Баглаева Е. М., Косаченко А. И., Москалева А. С. Модификация методики изучения вертикального распределения пыли и ее дисперсного состава в приземленном слое воздуха на примере города Екатеринбурга // Экологические системы и приборы. 2019. № 2. С. 3-8.

17. Третьяков О. Б., Гудков В. А., Тарновский В. Н. Шинная пыль как основной источник загрязнения окружающей среды // Шина плюс. 2004. № 1. С. 2-5.

18. Трофименко Ю. В., Чижова В. С. Обоснование мероприятий по снижению риска здоровью от загрязнения воздуха взвешенными частицами размером менее десяти микрометров (РМ10) на улично-дорожной сети городов // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23 № 7. С. 48-51. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-7-48-51

19. Третьяк Л. Н., Вольнов А. С. Оценка экологической безопасности автотранспортных потоков по концентрациям дисперсных частиц с учётом их гранулометрического состава (на примере Оренбурга) // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2020. № 2. С. 134-147. DOI: 10.25198/2077-7175-2020-2-134

20. Януш Д. Н., Вольнов А. С. Предложения по экологическому мониторингу концентраций дисперсных частиц в придорожной территории автомобильных дорог города Оренбурга // Научное обозрение. Педагогические науки. 2019. № 3-4. С. 125-130. https://elibrary.ru/download/ elibrary\_38506384\_86919076.pdf

21. Aslam A., Ibrahim M., Shahid I., Mahmood A., Irshad M., Yamin M., Ghazala, Tariq M., Shamshiri R. Pollution characteristics of particulate matter (PM2,5 and PM10) and constituent carbonaceous aerosols in a south asian future megacity // Applied Sciences (Switzerland). 2020. No 10(24), pp. 1-17.

22. Lozhkin V., Gavkalyuk B., Lozhkina O., Evtukov S., Ginzburg G. Monitoring of extreme air pollution on ring roads with PM2.5 soot particles considering their chemical composition (case study of Saint Petersburg) // Transportation Research Procedia. 2020. Vol. 50, pp. 381–388. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.10.045

23. Lozhkin V., Lozhkina O., Rogozinsky G., Malygin I. On information technology development for monitoring of air pollution by road and water transport in large port cities // Modern information technology and IT education. SITITO 2018. Communications in computer and information science. 2020. Vol. 1201, pp. 384–396.

24. Lozhkina O., Rogozinsky G., Lozhkin V., Malygin I., Komashinsky V. Smart technologies for decision-support in the management of environmental safety of transportation in big port cities // marine intellectual technologies. 2020. Vol. 1. No. 2 (48), pp. 125–133.

25. Lozhkina O., Lozhkin V., Seliverstov S., Kripak M. Forecasting of dangerous air pollution by cruise ships and motor vehicles in the areas of their joint influence in Sevastopol, Vladivostok and St. Petersburg // Water and Ecology. 2020. No. 1 (81), pp. 38–50.



26. Perez P. Combined model for PM 10 forecasting in a large city // Atmospheric Environment. 2012. Vol. 60. pp. 271-276. https://doi.org/10.1016/j. atmosenv.2012.06.024

27. Suleimanov I. F., Moskova E. V., Sabirov R. G., Kalimullin R. F., Filippov A. A. Organization of vehicle traffic based on environmental monitoring of the air basin // Amazonia Investiga. 2018. Vol. 7. No. 15, pp. 214–221.

28. Tripathi P, Deng F, Scruggs AM, Chen Y, Huang SK. Variation in doses and duration of particulate matter exposure in bronchial epithelial cells results in upregulation of different genes associated with airway disorders // Toxicol In Vitro. 2018. Vol. 51, pp. 95–105.

29. Wu S., Deng F. Blood pressure changes and chemical constituents of particulate air pollution: results from the Healthy Volunteer Natural Relocation (HVNR) Study // Environmental Health Perspectives. 2013. Vol. 121. No 1, pp. 66-72. DOI: 10.1289 / ehp.1104812

30. Yang X, Feng L, Zhang Y, Hu H, Shi Y, Liang S. Cytotoxicity induced by fine particulate matter (PM2.5) via mitochondria-mediated apoptosis pathway in human cardiomyocytes // Ecotoxicol Environ Saf. 2018. Vol. 161, pp. 198–207. DOI: 10.1007 / s11356-021-12431-w

31. Филиппов А.А., Сулейманов И.Ф., Арсланов М.А. Теоретические основы комплексного подхода к оценке экологической опасности автотранспорта на участке урбанизированной территории // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2019. № 1. С. 97-103. DOI: 10.25198/2077-7175-2019-1-97

#### REFERENSES

1. Filippov A. A., Sulejmanov I. F., Yakunin S. N. [Features of air pollution by dispersed particles of the urbanized territory "InnoCam"]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* 2021; 5: 72-80. (In Russ.) DOI: 10.25198/2077-7175-2021-5-72.

2. Azarov V. K. [New standards for black carbon in soot and its effect with CO2 greenhouse gases on global warming]. *Zhurnal avtomobilnyh inzhenerov*. 2012; 4 (75): 54-57. (In Russ.) https://elibrary.ru/ download/elibrary\_18622742\_91184518.pdf

3. Azarov V. K., Kutenyov, V. F., Štepnov V. V. [On the emission of solid particles from road transport]. *Zhurnal avtomobilnyh inzhenerov*. 2012; 6 (77): 55-58. (In Russ.). https://elibrary.ru/download/ elibrary\_21972010\_73390786.pdf

4. Azarov V. N., Kuz'michev A. A., Nikolenko D. A., Vasil'ev A. N., Kozlovceva E. YU. [Urban dust dispersion study]. *Vestnik MGSU*. 20204; Vol. 15. No 3: 432-442. (In Russ.) DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.432-442

5. Gudkov V. A., Komarov YU. YA., Fedotov V. N. *Metodologiya aktivnogo vozdejstviya na ehkologicheskuyu nagruzku gorodskogo avtotransporta.* 2009. Volgograd: VolgGTU, 143 p.

6. Denisov V. N., Zagricenko A. V. [Microscopic solid particles as a priority type of atmospheric air pollution in megalopolises of Russia]. *Ohrana atmosfernogo vozduha. Atmosfera.* 2010; No 3: 21-22. (In Russ.)

7. Denisov, V. N., Fedotov, V. N. [Engineering method of air purification of urban UDS]. *Ohrana atmosfernogo vozduha. Atmosfera*. 2011; No 3: 54-59. (In Russ.)

8. Denisov V. N., Fedotov V. N. [Innovations in reducing environmental risks from road transport in large cities]. *Dorozhnaya derzhava*. 2012. Special issue: 89-91. (In Russ.)

9. Denisov V. N., Kopytenkova O. I. [Microscopic particulate matter as a priority type of atmospheric air pollution in urbanized areas] *Tekhnosfernaya i ehkologicheskaya bezopasnost na transporte: materialy 3-j mezhdunarodnoj konferencii* [Technosphere and environmental safety in transport: materials of the 3 International conference]. 2012. St. Petersburg: SPb: 72-76.

10. Zagorodnov S. YU., Maj I. V., Kokoulina A. A. [Fine particles (PM2,5 and PM10) in the atmospheric air of a large industrial region: problems of monitoring and rationing as part of production emissions]. *Gigiena i sanitariya* 2019; Vol. 98. No 2: 142-147. (In Russ.)

11. Kulchickij A. R. [Formation of dispersed particles during fuel combustion in diesel engines]. *Ehkologiya i promyshlennost Rossii*. 2009;12: 35-37. (In Russ.)

12. Laguzin A. B., Karelina M. YU., Gajdar S. M., Pastuhov A. G. [Improving environmental safety of internal combustion engines in operation]. *Innovacii v APK: problemy i perspektivy.* 2020; 3(27): 53-62. (In Russ.) https://elibrary.ru/download/ elibrary\_44085221\_33097054.pdf

13. Lozhkina Ö. V., Malyshev S. A., Hahlenov A. V. [Study of hazardous pollution of roadside air with fine suspended particles PM10 and PM2,5 using the example of St. Petersburg]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*. 2021; 2 (58):96-103. (In Russ.) https:// elibrary.ru/download/elibrary\_46260695\_70627725. pdf

14. Rapoport O. A., Kopylov I. D., Rudoj G. N. [On the issue of rationing emissions of fine particles with sizes less than 10 microns (PM10) and less than 2,5 microns (PM2,5)]. *Ehkologicheskij vestnik Rossii*. 2012; 4: 47-52. (In Russ.)

15. Sobolev A. A. [On the question of the movement of particles in an air stream]. *Ehkologiya i promyshlennost Rossii*. 2009; 2: 22-25. (In Russ.) https://elibrary.ru/download/elibrary\_11903334\_31826760.pdf

16. Subbotina I. E., Buevich A. G., Sergeev A. P., Baglaeva E. M., Kosachenko A. I., Moskaleva A. S. [Modification of the methodology for studying the vertical distribution of dust and its dispersed composition in the ground layer of air using the example of the city of Yekaterinburg]. *Ekologicheskie sistemy i pribory* 2019; 2: 3-8. (In Russ.)

17. Tretyakov O. B., Gudkov V. A., Tarnovskij V. N. [Tire dust as a major source of environmental pollution]. *Shina-plyus.* 2004; 1:2-5. (In Russ.)

18. Trofimenko Yu, V., Chizhova V. S. [Justification of measures to reduce health risk from air pollution with suspended particles less than ten micrometers in size (PM10) on the street and road network of cities]. *Ehkologiya i promyshlennost Rossii.* 2019; Vol. 23. No. 7: 48-51. (In Russ.) DOI: 10.18412/1816-0395-2019-7-48-51

19. Tretyak L. N., Volnov A. S. [Assessment of the environmental safety of road traffic flows based on the concentration of dispersed particles, taking into account their particle size distribution (by the example of Orenburg)]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intelligence. Innovation. Investments]. 2022; 2:. 134-147. (In Russ.) DOI: 10.25198/2077-7175-2020-2-134

20. Yanush D. N., Vol'nov A. S. [Proposals for environmental monitoring of particulate concentrations in the roadside territory of Orenburg highways]. *Nauchnoe obozrenie. Pedagogicheskie nauki.* 2019; 3-4: 125-130. https://elibrary.ru/download/ elibrary\_38506384\_86919076.pdf

21. Aslam A., Ibrahim M., Shahid I., Mahmood A., Irshad M., Yamin M., Ghazala, Tariq M., Shamshiri R. Pollution characteristics of particulate matter (PM2,5 and PM10) and constituent carbonaceous aerosols in a south asian future megacity. Applied Sciences (Switzerland). 2020; 10(24): 1-17.

22. Lozhkin V., Gavkalyuk B., Lozhkina O., Evtukov S., Ginzburg G. Monitoring of extreme air pollution on ring roads with PM2.5 soot particles considering their chemical composition (case study of Saint Petersburg). Transportation Research Procedia. 2020; Vol. 50: 381–388. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.10.045

23. Lozhkin V., Lozhkina O., Rogozinsky G., Malygin I. On information technology development for monitoring of air pollution by road and water transport in large port cities. Modern information technology and IT education. SITITO 2018. Communications in computer and information science. 2020; Vol. 1201: 384–396.

24. Lozhkina O., Rogozinsky G., Lozhkin V., Malygin I., Komashinsky, V. Smart technologies for decisionsupport in the management of environmental safety of transportation in big port cities. Marine intellectual technologies. 2020; Vol. 1. No. 2 (48): 125–133.

25. Lozhkina O., Lozhkin V., Seliverstov S., Kripak,M. Forecasting of dangerous air pollution by cruise ships and motor vehicles in the areas of their joint influence in Sevastopol, Vladivostok and St. Petersburg. Water and Ecology. 2020; 1 (81): 38–50.

26. Perez P. Combined model for PM 10 forecasting in a large city. Atmospheric Environment. 2012; Vol. 60: 271-276. https://doi.org/10.1016/j. atmosenv.2012.06.024

27. Suleimanov I. F., Moskova E. V., Sabirov R. G., Kalimullin R. F., Filippov A. A. Organization of vehicle traffic based on environmental monitoring of the air basin. Amazonia Investiga. 2018; Vol. 7. No 15: 214–221.

28. Tripathi P, Deng F, Scruggs AM, Chen Y, Huang SK. Variation in doses and duration of particulate matter exposure in bronchial epithelial cells results in upregulation of different genes associated with airway disorders. Toxicol In Vitro. 2018; Vol. 51: 95–105.

29. Wu S., Deng F. Blood pressure changes and chemical constituents of particulate air pollution: results from the Healthy Volunteer Natural Relocation (HVNR) Study. Environmental Health Perspectives. 2013; Vol. 121. No. 1: 66-72. DOI: 10.1289 / ehp.1104812

30. Yang X, Feng L, Zhang Y, Hu, H, Shi Y, Liang S. Cytotoxicity induced by fine particulate matter

(PM2.5) via mitochondria-mediated apoptosis pathway in human cardiomyocytes .Ecotoxicol Environ Saf. 2018; Vol. 161: 198–207. DOI: 10.1007 / s11356-021-12431-w

**31.** Filippov A. A., Sulejmanov I. F., Arslanov M. A. [Theoretical foundations of an integrated approach to assessing the environmental hazard of vehicles in an urbanized area]. Intellekt. Innovacii. Investicii [Intelligence. Innovation. Investments]. 2019; No. 1:97-103. (In Russ.) DOI: 10.25198/2077-7175-2019-1-97

#### ВКЛАД СОАВТОРОВ

Вклад Бондаренко Е. В. Составляет 25% и заключается в научном руководстве и консультировании при написании статьи.

Вклад Филиппова А. А. Составляет 25% и заключается в написании статьи.

Вклад Сулейманова И. Ф. Составляет 25% и заключается в написании статьи.

Вклад Минатуллаева Ш. М. Составляет 25% и заключается в написании статьи.

#### COAUTHORS' CONTRIBUTION

Elena V. Bondarenko. 25% contribution, scientific guidance and advice when writing an article.

Andrei A. Filippov. 25% contribution, writing an article.

Ilnar F. Suleymanov. 25% contribution, writing an article.

Shamil M. Minatullayev. 25% contribution, writing an article.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бондаренко Елена Викторовна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры технической эксплуатации и ремонта автомобилей.

Филиппов Андрей Александрович – канд. техн. наук, доц. кафедры технической эксплуатации и ремонта автомобилей.

Сулейманов Ильнар Фаргатович – канд. техн. наук, доц. кафедры химии и экологии.

Минатуллаев Шамиль Минатуллаевич – канд. техн. наук, доц. кафедры технической эксплуатации автомобилей.

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Elena V. Bondarenko – Dr. Sci., Professor, Professor of the Technical Operation and Car Repairs Department.

Andrei A. Filippov – Cand. of Sci., Associate Professor of the Technical Operation and Car Repairs Department.

Ilnar F. Suleymanov – Cand. of Sci., Associate Professor of Chemistry and Ecology Department, .

Shamil M. Minatullayev – Cand. of Sci., Associate Professor of the Technical Operation and Car Repairs Department. УДК 004.67;656.072; 656.142 https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-198-215 https://elibrary.ru/MZHPSG Научная статья



### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕШЕХОДНОЙ ДОСТУПНОСТИ ОСТАНОВОЧНЫХ ПУНКТОВ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

#### С. С. Войтенков, М. В. Банкет

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), г. Омск, Россия http://orcid.org/ i 0000-0002-7965-5274, e-mail: voiser@mail.ru http://orcid.org/ i 0000-0002-1901-8150, e-mail: mikhail\_banket@mail.ru \*ответственный автор

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Настоящая статья посвящена проблеме определения территориальной (пешеходной) доступности остановочных пунктов в крупных городах, которая является одним из показателей качества транспортного обслуживания населения.

Целью исследования является разработка методики определения территориальной (пешеходной) доступности остановочных пунктов крупного города, насчитывающего тысячу и более остановочных пунктов, на основе общедоступных данных. Причиной исследования послужила сложность решения данной задачи, обусловленная большим количеством как самих остановочных пунктов, так и жилых объектов, непрямолинейностью кратчайшего пешеходного подхода, отсутствием подробных инструкций по выполнению расчетов и т. д. На основе обзора российских и иностранных научных источников рассмотрены подходы к определению территориальной доступности остановочных пунктов с учетом различных дополнительных параметров, таких как количество маршрутов, проходящих через остановочный пункт, интенсивность пассажирообмена, доступность социально значимых объектов и др. Приведены существующие сложности и особенности в определении доступности остановочных пунктов для индивидуальных и многоквартирных жилых домов. В рамках федерального проекта «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства» национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» при подготовке заявки на приобретение подвижного состава пассажирского транспорта для г. Омска авторами была проведена научно-практическая работа, в результате которой разработана методика, позволяющая преодолеть некоторые сложности в определении транспортной доступности остановочных пунктов в условиях крупного города путем использования частично автоматизированного подхода на отдельных ее этапах.

**Материалы и методы.** В частности, были применены такие инструменты, как конструктор карт Яндекс, табличный редактор excel, надстройка xtools для excel, программа QGIS, макрос в excel, использующий JavaScript API и HTTP геокодер.

**Результаты.** Расчет территориальной доступности остановочных пунктов с помощью разработанной методики проведен для г. Омска. Применение данной методики позволяет сократить трудоемкость расчетов до 10 раз.

**Обсуждение.** В обсуждении полученных результатов представлены указания по дальнейшему совершенствованию разработанной методики.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** расстояние кратчайшего пешеходного пути, автоматизация, визуализация, геоинформатика, качество транспортного обслуживания, доступность.

**БЛАГОДАРНОСТИ**. Выражаем благодарность Трегубченко Вячеславу Абдырасуловичу, выпускнику профиля «Транспортная логистика» направления подготовки «Технология транспортных процессов» за активную работу по исследованию вопросов пешеходной доступности остановочных пунктов г. Омска.

Статья поступила в редакцию 02.08.2021; одобрена после рецензирования 04.04.2022; принята к публикации 12.04.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Войтенков С. С., Банкет М. В., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License. Для цитирования: Войтенков С. С., Банкет М. В. Определение пешеходной доступности остановочных пунктов городского пассажирского транспорта // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № (2). С. 198-215. https://doi.org/10.26518/2071-7296- 2022-19-2-198-215

https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-198-215 https://elibrary.ru/MZHPSG Original article

### DETERMINATION OF PEDESTRIAN ACCESSIBILITY FOR URBAN PUBLIC TRANSPORT STOPS

#### Sergei S. Voitenkov<sup>\*</sup>, Mikhail V. Banket

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia http://orcid.org/ i 0000-0002-7965-5274, e-mail: voiser@mail.ru http://orcid.org/ i 0000-0002-1901-8150, e-mail: mikhail\_banket@mail.ru \*corresponding author

#### ABSTRACT

**Introduction.** This article is devoted to the problem of determining the territorial (pedestrian) accessibility of stopping points in large cities, which is one of the indicators of the quality of transport services for the population. The aim of the study is to develop a methodology for determining the territorial (pedestrian) accessibility of stopping points of a large city with a thousand or more stopping points, based on publicly available data. The cause of the study was the dificulty of solving this problem, due to the large number of both stopping points and residential facilities, the straightforwardness of the shortest pedestrian approach, the lack of detailed instructions for performing calculations, etc. Based on the review of Russian and foreign scientific sources, approaches to determining the territorial accessibility of stopping points were considered, taking into account various additional parameters, such as the number of routes passing through a stopping point, the intensity of passenger exchange, the availability of stopping points for individual and multi-apartment residential buildings are given.

In the framework of the System-wide measures for the development of road facilities federal project and the Safe and high-quality roads national project when preparing an application for the purchase of passenger transport rolling stock for Omsk, the authors carried out scientific and practical work, as a result, a methodology has been developed to overcome some difficulties in determining the transport accessibility of stopping points in a large city by using a partially automated approach at its individual stages.

*Materials and methods.* In particular, tools such as Yandex Map Designer, Table Excel Editor, Xtools Add-in for Excel, QGIS program, Macro in Excel using JavaScript API and HTTP geocoder were used.

**Results.** The calculation of territorial accessibility of stopping points using the developed methodology was carried out for Omsk. The application of this technique allows to reduce labour intensity of calculations up to 10 times.

**Discussion.** The discussion of the results presented guidelines for further improvement of the developed methodology.

**KEYWORDS:** *distance of shortest walking path, automation, visualization, geoinformatics, quality of transport service, accessibility.* 

The article was submitted 02.08.2021; approved after reviewing 04.04.2022; accepted for publication 12.04.2022.

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 S. Voitenkov<sup>\*</sup>, Mikhail V. Banket Determination of pedestrian accessibility for urban public transport stops. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2022; 19 (2): 198-215. https://doi.org/10.26518/2071-7296- 2022-19-2-198-215

© Voitenkov S. S., Banket M. V., 2022



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



#### введение

Доступность остановочных пунктов является распространенной темой для исследований ученых-транспортников. При этом пешие передвижения лежат в основе городской мобильности [1, 2], когда они удобны и оптимальны по протяженности. Ряд исследований [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9] рассматривают доступность остановочных пунктов с разных точек зрения и на основе множества критериев: комфорт, удобство, безопасность и т. д.

Территориальная доступность является одним из важных показателей уровня транспортного обслуживания населения, представленного в социальном стандарте<sup>1</sup>. Показатель территориальной доступности остановочных пунктов включен в перечень параметров федерального проекта «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства» национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги», а также прописан в комплексной программе модернизации пассажирского транспорта в городских агломерациях в соответствии с поручением Президента РФ от 04.05.2020<sup>2</sup>. Для данного показателя определен следующий целевой ориентир: 100% доступность для многоквартирных жилых домов и >=90% для индивидуальных жилых домов.

Территориальная доступность остановочных пунктов – это расстояние кратчайшего пешеходного пути следования от ближайшей к остановочному пункту точки границы земельного участка, на котором расположен объект, до ближайшего остановочного пункта, который обслуживается маршрутом регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом с учетом обхода естественных и искусственных преград. Также в документе<sup>1</sup> сказано, что расстояние кратчайшего пешеходного пути не должно превышать для многоквартирных жилых домов 500 м, а для индивидуальных жилых домов 800 м.

Авторы [10, 11] используют графический метод оценки пешеходной доступности остановочных пунктов на основе геоинформационных систем, отображая вокруг каждого остановочного пункта окружности с радиусом, равным величине предельного расстояния пешеходной доступности.

По мнению Л. И. Свердлина<sup>3</sup> подход с использованием расстояний кратчайшего пешеходного пути не более конкретного числа метров не является исчерпывающим потому, что:

1) ставит в одинаковые условия индивидуума, пользующегося остановками, через которые проходят многочисленные и насыщенные подвижным составом маршруты или подходящего к остановке, обслуживающей 1-2 малодеятельных маршрута;

2) не отвечает на вопросы, в какой планировочной зоне города передвижение зарождается и к какой его части это требование относится.

В первом случае не учитывается дополнительное, иногда весьма продолжительное, время на ожидание транспорта, а во втором – отсутствие такового после прибытия на остановку цели передвижения. Кроме этого, остановки общественного транспорта (ОТ) располагаются, как правило, вблизи крупных объектов тяготения жителей, что сокращает путь следования от остановок прибытия к этим объектам.

Также автор статьи<sup>4</sup> Л. И. Свердлин, ссылаясь на мнение Б. В. Черепанова<sup>5</sup>, который утверждает, что пешеходный подход к остановке, ожидание подвижной единицы, следование от остановки до цели передвижения должны рассматриваться как элементы

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Распоряжение Министерства транспорта РФ от 31 января 2017 г. № НА-19-р «Об утверждении социального стандарта транспортного обслуживания населения при осуществлении перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом».

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Комплексная программа модернизации пассажирского транспорта в городских агломерациях: поручение Президента РФ от 04.05.2020 г.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Свердлин Л. И. Пешеходная доступность остановок общественного транспорта. Методический аспект // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния. Материалы X международной (тринадцатой екатеринбургской) научно-практической конференции, 14–15 июня 2004 г. С. 139–142

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Свердлин Л. И. Пешеходная доступность остановок общественного транспорта. Методический аспект // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния. Материалы X международной (тринадцатой екатеринбургской) научно-практической конференции,14–15 июня 2004 г. С. 139–142

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Черепанов Б. В. Методика комплексной оценки территории города по транспортным критериям/ Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния // Материалы V Международной конференции. Екатеринбург. 1999. С. 34–38.

общей транспортной доступности городских объектов, измеряемые во времени, говорит, что таким образом открывается возможность нормировать предельную доступность остановочных пунктов не только по дальности, а по продолжительности пешеходного подхода и включать в нее время ожидания транспорта.

Л. И. Свердлин<sup>4</sup> приводит накладные затраты времени на поездку, куда входят: продолжительность подхода к остановке посадки, ожидания транспорта на остановке, а также следования от остановки высадки до цели передвижения, которые составляют 13-20 мин в зависимости от доли передвижений с пересадками, по опыту градостроительного проектирования и многочисленным публикациям, ссылаясь на Ф. А. Касумова<sup>6</sup> и А. Е. Роговина<sup>7</sup>.

В нормально организованном городе накладные затраты времени не должны превышать 15 мин<sup>4</sup>. Средние затраты времени на пешеходный подход к остановке по обследованиям составляет 6-7 мин<sup>8</sup>, максимальные, исходя из предельной нормативной дальности 500 м и скорости пешехода 4 км/ч – 7,5 мин. Время ожидания транспорта на остановке может достигать в среднем 3-4 мин. Суммарная величина этой части накладных затрат равна 10 мин<sup>4</sup>.

Далее автор делает вывод о том, что зона пользования остановкой при ее графическом воспроизведении на плане города по своей форме не является кругом, очерченным относительно конкретной остановки, а эллипсом<sup>4</sup>.

В исследовании [12] авторы предприняли попытку использовать генетический алгоритм для совершенствования пешеходной доступности остановочных пунктов.

Компания Transport for London (TfL) для оценки уровня доступа к общественному транспорту использует показатель PTAL (Public transport accessibility level), который оценивает выбранное место в зависимости от того, насколько близко оно находится к общественному транспорту и насколько часты услуги в этом районе [13]. Использование карт уровней территориальной доступности общественного транспорта (карт PTAL) также представлено в исследованиях на примере городов Индии и Северной Ирландии [14, 15] с использованием современных геоинформационных систем и средств пространственной визуализации.

Описанные в научных исследованиях подходы и решения основаны на готовых базах данных координат остановочных пунктов, жилых домов и учреждений различного назначения, маршрутов общественного транспорта, расписаний. Однако не для всех городов такие базы данных созданы и их формирование является не простой и трудоемкой задачей. В настоящей статье рассмотрен вариант определения пешеходной доступности остановочных пунктов на основе данных общего доступа.

На данный момент существуют следующие сложности в определении территориальной доступности остановочных пунктов:

 в нормативных документах нормируется только расстояние от участка объекта до остановочного пункта;

 существует мало баз данных с подробной информацией о работе общественного транспорта и сфер деятельности, связанных с ним;

- требуется затрачивать большое количество времени на поиск и подсчет данных об адресах и их координат;

- нет подробно описанных инструкций по нахождению территориальной доступности остановочных пунктов и ее обоснованию без специального программного обеспечения в условиях отсутствия данных о расстояниях, координат домов и остановочных пунктов.

Социальный стандарт транспортного обслуживания населения по территориальной доступности остановочных пунктов дает только расстояние кратчайшего пешеходного пути от границ участков объектов до остановочных пунктов. Данное расстояние не может полностью оценить доступность остановочных пунктов, что может привести к недостаточной доступности остановочных пунктов и негативно отразиться на использовании транспорта общего пользования населением.



<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Касумов Ф. А. Исследование пешеходных составляющих транспортных передвижений // Город и пассажир. Тезисы докладов ко II Ленинградской науч. конф. Л., 1971. С. 207–214.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Роговин А. Е., Белинский А. Ю., Аванесов И. Г. Закономерности передвижений населения Минска // Проблемы комплексного развития транспортных систем городов. Тезисы докладов и сообщений Всесоюзного науч.-техн. семинара. Минск. 1978. С. 138–141.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Ваксман С. А., Штыро Я. И. О влиянии возраста на затраты времени при подходе к остановочному пункту ГПТ // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния. Материалы VI Международной конференции. Екатеринбург. 2000. 51 с.

Поэтому необходимо учитывать как можно больше факторов, влияющих на территориальную доступность остановочных пунктов, чтобы оценить данный показатель обоснованно, что и продемонстрировано в исследовании<sup>9</sup>. Необходимо учитывать такие данные, как количество маршрутов, проходящих через конкретный остановочный пункт, интервал движения подвижного состава на данных маршрутах, пассажирообмен остановочного пункта, плотность населения конкретного района, среднее время подхода к остановочному пункту, координаты остановочных пунктов, координаты жилых домов, тип жилого дома, а также адреса жилых домов для обоснования точности полученных данных.

Некоторые из выше перечисленных данных, такие как интервал движения подвижного состава и пассажирообмен остановочных пунктов не всегда возможно получить без проведения специальных обследований, так как не весь городской общественный транспорт работает по расписанию и предоставляет сведения GPS-навигатора для отслеживания интервала движения по маршруту, а также терминалы оплаты проезда с отслеживанием географического расположения подвижного состава на маршруте во время оплаты пассажиром проезда, что позволило бы наблюдать пассажирообмен конкретного остановочного пункта.

Согласно обзору российских и иностранных источников, существуют разные подходы и методы оценки территориальной доступности остановочных пунктов. Одни из них учитывают дополнительные условия и ограничения, другие содержат возможность визуализации, но все они оперируют наличием определенной исходной информации (плотность населения, разбивка на транспортные районы, данные о пассажирообмене, интервалах движения, базах данных остановочных пунктов и различных объектов и т. д.), которую не всегда возможно получить, не прибегая к дорогостоящим транспортным обследованиям.

Целью исследования, отдельные результаты которого изложены в данной статье, является разработка методики определения территориальной (пешеходной) доступности остановочных пунктов крупного города, насчитывающего тысячу и более остановочных пунктов, на основе общедоступных данных.

#### Существующие методы и подходы определения территориальной доступности остановочных пунктов

Метод определения территориальной доступности остановочных пунктов с учетом продолжительности пешеходного подхода и времени ожидания транспорта.

Л. И. Свердлин<sup>₄</sup> приводит формулы для нахождения радиусов пешеходной доступности *R<sub>max</sub>* и *R<sub>min</sub>*:

$$R_{\rm max} = 55.8 *$$
 (1)

$$R_{min} = 67,0 *$$
 (2)

где  $M_{\rm Tp}, M_{\rm a}$  – количество маршрутов троллейбуса и автобуса, проходящих через данную остановку, ед.;

Ì

*I*<sub>тр</sub>, *I*<sub>а</sub> – средний маршрутный интервал движения по троллейбусу и автобусу, мин.

Для более правильного расчета показателя территориальной доступности остановочных пунктов можно использовать круги не с одним радиусом пешеходной доступности, взятым из нормативных документов, а эллипсы с минимальными и максимальными радиусами пешеходной доступности, посчитанными на основе количества проходящих маршрутов и их интервалу движения<sup>4</sup>. Использование эллипсов в данном подходе приводит к усложнению подсчета количества домов, входящих в зону данного эллипса.

Метод определения территориальной доступности остановочных пунктов для социально значимых объектов города. В [16] приведен подход к оценке транспортно-пешеходной доступности микрорайонов, медицинских и других (социально значимых) учреждений г. Ижевска к остановочным пунктам общественного транспорта. Данный метод был использован в 2016 г. для г. Ижевска.

Для моделирования доступности авторами был применен метод оценки пространственного разграничения, который подразумевает расчет сложности преодоления пространства, разделяющего начальный и конечный пункт. В качестве меры преодоления пространства авторами было использовано время.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Морозов А. С. Способы расчёта показателя пешеходной доступности остановочных пунктов общественного пассажирского транспорта для жилых домов / А. С. Морозов, А. А. Черников, К. В. Молоденов, М. А. Колесникова // Транспортное планирование и моделирование: Сборник трудов V Международной научно-практической онлайн-конференции, Москва, 16–17 апреля 2020 года. Москва: Российский университет транспорта, 2020. С. 126–137



Множество начальных пунктов, от которых была рассчитана доступность, – это центроиды всех кварталов, имеющих сквозной проезд.

При моделировании использована «парная» доступность – от одной до другой точки, то есть для каждого центроида жилого дома определяется расстояние только до ближайшего остановочного пункта.

Доступность измеряется в минутах, потраченных человеком для преодоления расстояния от центроида квартала до ближайшего остановочного пункта.

Особенность данного метода в том, что город делится на участки с «центроидами» размером 100 на 100 м, расстояние от центроида квартала до ближайшего остановочного пункта берется с учетом реальных маршрутов, учитывается время подхода к остановочному пункту пешеходом и интервалы движения общественного транспорта.

Достоинство данного метода состоит в том, что:

- оценить среднюю доступность конкретного района можно сразу, не прибегая к дополнительным расчетам;

 простота визуализации доступности конкретных районов города.

Недостатки данного метода заключаются в:

- сложности производства расчетов;

- отсутствии возможности оценить пешеходную доступность остановочного пункта для конкретного дома.

Подход определения территориальной доступности остановочных пунктов с учетом деления города на транспортные районы и интенсивности пассажирообмена. В статье Д. К. Тимофеевой<sup>10</sup> приведен подход к определению территориальной доступности остановочных пунктов с учетом деления города на транспортные районы и интенсивности пассажирообмена.

Для работы с картой в данном метода использовалась программа КОМПАС-3D, которая позволяет с помощью внутренних инструментов работать с загруженной картой, а также «SAS. Планета», имеющая возможность загрузки и просмотра карт и спутниковых фотографий земной поверхности из большого количества картографических сервисов. Данный метод основывается на расстояниях кратчайших пешеходных путей от границ участков объектов до остановочных пунктов, утвержденных Министерством транспорта РФ, то есть:

1) для остановочных пунктов, расположенных в культурно-бытовых и общественно-деловых зонах, принято расстояние пешей доступности 500 м;

 для остановочных пунктов, расположенных в промышленных зонах, принято расстояние кратчайшего пешеходного пути 800 м;

 остановочные пункты с малой интенсивностью пассажиропотоков для рассмотрения не принимаются.

В данном методе для анализа остановочных пунктов проводится их классификация по критерию интенсивности пассажирообмена.

Для упрощения анализа остановочных пунктов производится транспортное районирование города. На карте отмечаются транспортные районы, которые были получены при классификации остановочных пунктов.

Далее отмечаются предельные расстояния кратчайшего пешеходного пути от границ участков объектов до остановочных пунктов. В графическом виде эти расстояния изображены в виде окружностей, центрами которых являются остановочные пункты.

Затем выделяются полученные предельные расстояния в зависимости от значений пассажирообмена. В графическом виде это окружности разных цветов, так как пассажирообмен делится на 3 группы: большой, средний и малый. Большой пассажирообмен обозначается красным, средний пассажирообмен – оранжевым, а малый пассажирообмен – зеленым (рисунок 1).

После получения карты с наглядным изображением территориальной доступности можно проанализировать полученные данные. Сделать это можно как отдельно для каждого транспортного района, так и для всего города в целом.

203

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Тимофеева Д. К. Способ решения задачи территориальной доступности остановочных пунктов // Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации. Сборник статей XXXII Международной научно-практической конференции, 25 ноября 2019 г. С. 33–36.




Метод, указанный в данной статье, позволяет анализировать территориальную доступность остановочных пунктов по конкретному транспортному району, учитывая его плотность населения и количество остановочных пунктов с тем или иным пассажирообменом как по отдельному району, так и по всему городу.

Достоинства данного подхода:

- возможность оценить важность доступности конкретного остановочного пункта по интенсивности пассажирообмена;

 позволяет увидеть конкретный участок с менее развитой доступностью остановочных пунктов. Недостатком такого подхода является то, что в нем приводится только способ классифицирования и визуализации данных о пешеходной доступности остановочных пунктов, то есть он может применяться только для оценки доступности остановочных пунктов.

# Методы определения территориальной доступности остановочных пунктов в зарубежных источниках

Компания Transport for London (TfL), которая отвечает за планирование и эксплуатацию транспортной системы Лондона, приводит описание различных инструментов, используемых для оценки «связности», и методов, на которых они основаны [13].

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Тимофеева Д. К. Способ решения задачи территориальной доступности остановочных пунктов // Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации. Сборник статей XXXII Международной научно-практической конференции, 25 ноября 2019 г. С. 33–36.

TfL под словом «связность» понимает то, насколько хорошо различные места связаны друг с другом с помощью транспортной системы. Если подвижной состав разных видов городского транспорта работает более эффективно, то уровень связности улучшается.

TfL указывает, что вместо этого нередко используется слово «доступность». Но в TfL термин «доступность» используют, когда речь идет конкретно об общественном транспорте, который является шаговым и подходит для людей с различными потребностями. Шаговая доступность является одним из аспектов хорошей связности, но оценка связности с конкретным местом также включает в себя другие факторы, касающиеся качества транспортных связей.

TfL представляет и описывает три основных типа оценки связности для транспортной сети:

Показатель PTAL (Public transport accessibility level) (уровень доступа к общественному транспорту), который оценивает выбранное место в зависимости от того, насколько близко оно находится к общественному транспорту и насколько часты услуги в этом районе.

Отображение времени в пути, графически отображающее, сколько времени требуется для перемещения из выбранного места в другое место или как далеко вы можете проехать за заданное количество времени.

Анализ «пассажиро-сбора», описывающий, сколько рабочих мест или различных видов

услуг существует в течение определенного времени движения из выбранного места.

Первый метод является основным в определении уровня доступности общественного транспорта, остальные два метода дополняют его, привнося дополнительную информацию для полной оценки доступности общественного транспорта.

Для вычисления значений PTAL используется четыре набора данных:

1) Список мест, для которых нужны значения PTAL, которые могут представлять собой дома, офисы, магазины и т. д.

2) Данные о местоположении всех станций и остановок общественного транспорта. TfL называет их точками доступа к услугам (service access points).

3) Пешеходная сеть города, описывающая все улицы и тропинки, которые можно использовать для прогулок. Это необходимо для расчета времени ходьбы от начала поездок людей до сети общественного транспорта.

4) Данные по всем маршрутам общественного транспорта в городе, точкам доступа к услугам, которые обслуживает каждый из них, и их частотам. Это могут быть либо текущие услуги, либо ожидаемые будущие услуги, в зависимости от того, какой тип PTAL мы хотим рассчитать.

Представление PTAL на карте осуществляется с помощью квадратов с размерами одной стороны от 50 до 100 м и определенным цветом в соответствии с полученным индексом доступа AI (таблица 1).

### Таблица 1 Цветовое обозначение уровней доступности [13]

Table 1 Color explanation of availability levels [13]

Уровень доступа к общественному транспорту РТАL	Диапазон индекса доступа АI	Цвет квадрата	
0 (наихудший)	0		
1a	0.01–2.50		
1b	2.51–5.0		
2	5.01–10.0		
3	10.01–15.0		
4	15.01–20.0		
5	20.01–25.0		
6a	25.01–40.0		
6b (наилучший)	40.01+		

К примеру, для Лондона было подсчитано около 150 000 квадратов для отображения уровня доступа к общественному транспорту (рисунок 2).

205



Рисунок 2 – Карта уровня доступа к общественному транспорту Лондона [14]

Описанный метод PTAL является сложным и требует большого количества данных об общественном транспорте и сфер деятельности, связанных с ним.

Данный метод определения уровня доступа к общественному транспорту был также применен и адаптирован к тематическому исследованию г. Ахмадабада (Индия), который был описан в статье [17]. Было получено визуальное представление уровней доступности общественного транспорта с учетом средней скорости и времени ходьбы, расстояний до остановок общественного транспорта и частот движения в часы пик различных видов общественного транспорта, использован картографический инструмент GIS. Данная статья завершается инициированием дискуссии о потенциальном использовании РТАL - картирования для улучшения практики планирования, такой как разработка генеральных планов с интеграцией землепользования и транспорта, определение приоритетов общественного транспорта и поддержка инвестиций, разработка политики парковки и разработка правил транзитно-ориентированного зонирования.

Преимущества метода РТАL в том, что доступность к общественному транспорту оценивается полностью, включая разные сопутствующие данные, позволяя оценивать данный показатель под разными углами.

Figure 2 – London public transport access level map [14]

Недостатками метода являются:

- необходимость создания большого количества баз данных о множестве показателей (расстояний пеших и транспортных передвижений, времени на выполнение передвижений, частот движения различных видов общественного транспорта в разное время суток, список и координаты всех домов, остановочных пунктов и станций и т. д.);

- сложность расчета доступности без специально разработанного программного обеспечения;

 сложность объединения данных из различных сопутствующих областей.

Также существуют и другие методы оценки территориальной доступности остановочных пунктов в иностранных источниках, например, в статьях [18, 190] описана многоступенчатая методика оценки доступности автобусных остановок, исходящая из кластера из семи показателей, описывающих объективные и субъективные особенности, влияющие на выбор пассажирами той или иной автобусной остановки. Эти показатели взвешиваются с помощью вопросника, представленного экспертам.

Затем разрабатывается многокритериальный анализ для получения окончательной

PART II

оценки, однозначно описывающей доступность каждой остановки. Результаты сопоставляются, и в качестве примера приводится тематическое исследование в Риме, где оценивается 231 автобусная и трамвайная остановка.

Полученные результаты показывают актуальность городской сети и окружающей среды для оценки доступности и содействия более устойчивым моделям мобильности. Исследовательские инновации опираются на возможность объединения данных из различных областей в конкретную GIS-карту и легко выделяют для каждой автобусной остановки взаимосвязи между построенной средой, комфортом пассажиров и доступностью с конечной целью предоставления передовых знаний для дальнейшего применения.

Как видно из представленных выше зарубежных исследований, определение территориальной доступности остановочных пунктов активно ведется и включает в себя большое количество оценок, сопутствующих данному показателю для более полного его анализа. Это требует большого количества информации об общественном транспорте и различных программных средств.

Также в данных методах не указаны способы подсчета конкретного количества объектов с низким или высоким уровнем доступности на основе общедоступных данных, таких как координаты и адреса, для более полного понимания и обоснования уровня доступности конкретного объекта.

# Методика определения территориальной доступности остановочных пунктов и расчет данного показателя на примере г. Омска

Для определения показателя пешеходной доступности необходимо знать общее количество жилых домов (кроме дач и различных садоводческих товариществ) в городе, а также количество домов, находящихся внутри и вне радиуса пешеходной доступности остановочных пунктов.

Для этого необходимы следующие базы данных о жилых домах и остановочных пунктах в пределах территории города: - координаты жилых домов;

- тип жилого дома, то есть индивидуальный жилой дом ИЖД (с числом квартир менее 9) или многоквартирный жилой дом МЖД (с числом квартир более 9)<sup>12</sup>;

- координаты остановочных пунктов;

- адреса жилых домов (для подтверждения полученных результатов).

Схема методики по определению территориальной доступности остановочных пунктов представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Схема методики определения территориальной доступности остановочных пунктов Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Scheme of the methodology for determining the territorial accessibility of stopping points Source: compiled by the authors.

На первом этапе производится поиск координат жилых домов. Быстрый поиск координат жилых домов осуществляется через конструктор Яндекс. Карт<sup>13</sup>, который позволяет отмечать дома на карте, как это показано на примере индивидуальных жилых домов (рисунок 4).

© 2004–2022 Вестник СибАДИ The Russian Automobile and Highway Industry Journal



<sup>&</sup>lt;sup>12</sup>. Порядок определения субъектов РФ для реализации мероприятия по обновлению подвижного состава наземного общественного пассажирского транспорта в рамках федерального проекта «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства» национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги». Утверждённый протоколом заседания проектного комитета по национальному проекту «Безопасные и качественные автомобильные дороги» от 19 ноября 2019 г. №8.

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup>. Конструктор карт. Яндекс [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://yandex.ru/support/maps-builder/concept/ index.html

# РАЗДЕЛ II ТРАНСПОРТ



Рисунок 4 – Разметка ИЖД с помощью конструктора Яндекс. Карт Источник: составлено авторами

Figure 4 – Layout of the individual residential building (IRB) using the Yandex map constructor Source: compiled by the authors.

Данный способ позволяет сократить время на поиск координат всех жилых домов города в 7-8 раз. Ручным способом с копированием каждой координаты получается примерно 400 адресов в час, в то время как представленным методом – примерно 3000 адресов в час. Карта города делится на районы, и в каждом районе отдельно отмечаются многоквартирные жилые дома, а также отдельно индивидуальные жилые дома, для их дальнейшей сортировки по типам.



Рисунок 5 – Карта координат всех жилых домов г. Омска Источник: составлено авторами с помощью программы QGIS.

Figure 5 – The map of the all residential buildings coordinates in the city of Omsk Source: compiled by the authors using QGIS software.

208

PART II

	A	P				
1	А Объект для поиска (адрес либо координаты)	Адрес Yande×				
2	73.40276235713155 55.004431462529844	Россия, Омск, Барнаульская улица, 14				
3	73.40295011176258 55.00428654322158	Россия, Омск, 3-я Восточная улица, 24	получить координаты			
4	73.40304130686913 55.00420020806772	Россия, Омск, 3-я Восточная улица, 26				
5	73.40319687499195 55.00406453816311	Россия, Омск, 3-я Восточная улица, 28				
6	73.40333634986074 55.003928867797605	Россия, Омск, 3-я Восточная улица, 30				
7	73.40341681613118 55.00384561529968	Россия, Омск, 3-я Восточная улица, 32				
8	73.40352946890984 55.003771612933605	Россия, Омск, 3-я Восточная улица, 34				
9						
10						
11						
12						

Рисунок 6 – Результаты поиска адресов через координаты Источник: составлено авторами.

Figure 6 – The results of searching for addresses through coordinates Source: compiled by the authors.

	А	В	С	D	
1	Коорд	инаты 👻	▼	-	
2	Широта	Долгота	Адрес	Тип дома	
3	55.0269647	73.2833292	Россия, Омск, микрорайон Городок Нефтяников, бу	МЖД	
4	55.0276846	73.2831874	Россия, Омск, микрорайон Городок Нефтяников, бу	МЖД	
5	55.0283928	73.2832828	Россия, Омск, микрорайон Городок Нефтяников, бу	МЖД	
6	54.9560666	73.3805856	Россия, Омск, бульвар Победы, 1	МЖД	
7	54.9548874	73.3846408	Россия, Омск, бульвар Победы, 10	МЖД	
8	54.954604	73.3811845	Россия, Омск, бульвар Победы, 2А	МЖД	

Рисунок 7 – Файл excel с данными для поиска пешеходной доступности остановочных пунктов Источник: составлено авторами.

> Figure 7 – An excel file with data to search for pedestrian accessibility of stopping points Source: compiled by the authors.

Карта с координатами жилых домов представлена на рисунке 5.

Данная карта получена с помощью программы QGIS, которая позволяет отобразить большое количество точек.

На втором этапе производится поиск адресов жилых домов через координаты. Все координаты и адреса берутся с Яндекс. Карты. Автоматизация для повышения производительности по поиску адресов жилых домов достигается с помощью JavaScript API и HTTP геокодера<sup>14</sup>, выполняющего поиск адресов по координатам через файл excel с записями макросов (рисунок 6). На третьем этапе происходит объединение всех полученных данных. Все данные с координатами, типами домов и адресами собираются в одном файле excel для более простой работы с ними (рисунок 7).

На четвертом этапе производится поиск координат остановок общественного транспорта. Также как и для жилых домов необходимо с помощью Яндекс конструктора создать базу данных координат по всем остановкам общественного транспорта.

На пятом этапе происходит подсчет количества жилых домов, входящих в радиус пешеходной доступности остановочных пунктов.



<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Автоматизация повседневных задач. Excel Store [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://excelstore.pro/ download-page.html?s=189

#### РАЗДЕЛ II ТРАНСПОРТ



а

Рисунок 8 – Карта г. Омска с кругами радиусов пешеходной доступности общественного транспорта: а – для МЖД; б – для ИЖД Источник: составлено авторами.

Figure 8 – The Map of Omsk with walking radius circles public transport: (a) for the MRB; (b) for IRB Source: compiled by the authors.

Для поиска количества жилых домов, входящих в радиус пешеходной доступности остановочных пунктов, используются координаты остановочных пунктов с радиусами кругов для ИЖД 667 м, для МЖД 417 м (рисунок 8).

Данные радиусы взяты из источника<sup>15</sup>, где указано, что при отсутствии данных о сети пешеходных путей допускается использование радиусов с учетом коэффициента непрямолинейности сети улиц и дорог, равного 1,2, и соответственно радиус круга доступности должен составлять 667 м для ИЖД и 417 м для МЖД.

Пример того, как визуально выглядят окружности определенных радиусов с центрами в виде координат остановок (4 остановки ул. Рабиновича) и находящиеся вблизи остановок многоквартирные жилые дома, показан на рисунке 9.

Для того чтобы узнать, входит тот или иной дом в данную окружность, рассчитывается расстояние от каждой остановки до каждого жилого дома. Для этого необходимо воспользоваться теоремой Пифагора по нахождению гипотенузы или расстояния от остановочного пункта до жилого дома. Данная формула для нахождения расстояния в градусах и их переводе в метры представлена в формуле (3).

$$C = \sqrt{(xa * 111,111 - xb * 111,111)^2 + (ya * cosxa * 111,111 - yb * cosxb * 111,1]},$$
(3)

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Порядок определения субъектов РФ для реализации мероприятия по обновлению подвижного состава наземного общественного пассажирского транспорта в рамках федерального проекта «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства» национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги». Утверждённый протоколом заседания проектного комитета по национальному проекту «Безопасные и качественные автомобильные дороги» от 19 ноября 2019 г. № 8.



Рисунок 9 – Координаты МЖД с окружностями от остановочных пунктов радиусами 417 м Источник: составлено авторами с помощью программы Яндекс. Карты.

Figure 9 – MRB coordinates with circles from stopping points with radius of 417 meters Source: compiled by the authors using Yandex. Maps.

где С – расстояние от остановочного пункта до жилого дома, м;

ха – координата широты жилого дома, градусы°;

xb – координата широты остановочного пункта, градусы°;

уа – координата долготы жилого дома, градусы°;

уb – координата долготы остановочного пункта, градусы°;

111,111 – перевод градусов в километры (в одном градусе широты 111,111 километров), км;

cos() – перевод градусов долготы в километры (один градус долготы в километрах на определенной широте равен cos (широты°), умноженный на 111,111 км);

1000 – перевод километров в метры, м.

Применение данной формулы для большого числа координат возможно с помощью excel.

К формуле (3) при расчете расстояния необходимо добавить функцию «ЕСЛИ», которая будет выдавать 1, если расстояние меньше или равно 667 м для ИЖД и 417 м для МЖД, иначе будет выдаваться 0 (рисунок 10).

С	ЧЁТЕСЛИ 🔻	: ×	<ul><li>✓ j</li></ul>	б =ЕСЛІ ОКРУ	и(корень <mark>(</mark> ГЛ(COS <mark>(Н\$</mark>	(\$A7*11 5*ПИ()/:	1,111- <mark>H\$5</mark> * 180);2)*11:	'111,111)^2+( 1,111))^2)*10	\$87*(OKP) 00<=667;1;	/ГЛ(COS <mark>(\$</mark> / 0)	<mark>47*ПИ()/1</mark>	80 <mark>);2)*111</mark> ,	111)-H\$6*
	A	в	с	D	E	F	G	н	I.	J	к	L	м
1													
2	В 1 градусе	111,1349	KM										
3	Радиус ПД	667	метров				Коорди	наты остано	вок				
4								11-й микр	11-й микр	11-й микр	11-й микр	12-й микр	12-й микр
5	Координа	ты ИЖД					x	54,97897	54,98029	54,98079	54,98124	54,98072	54,98092
6	x	y	12	Доступ -	сть ИЖД		У	73,32102	73,32245	73,32328	73,32281	73,30531	73,3063
7	54,894404	73,47523		1				=ЕСЛИ(КС	0	0	0	0	0
8	54,894451	73,47485		1				0	0	0	0	0	0
9	54,894461	73,47451		1				0	0	0	0	0	0

Рисунок 10 – Подсчет количества ИЖД, входящих в радиус пешеходной доступности с помощью excel Источник: составлено авторами.

> Figure 10 – Calculation of the number of IRB included in the radius of walking distance using Excel Source: compiled by the authors.

38193	54,9181939	73,36705		1		0	0	0
38194	54,9180734	73,36727		1		0	0	0
38195	54,9185987	73,36724		1		0	0	0
38196	54,9186049	73,36762		1		0	0	0
38197	54,9183206	73,36768		1		0	0	0
38198	54,9182093	73,36759		1		0	0	0
38199								
38200	Кол. ИЖД в	ход. в рад	иус ПД	36418				
38201	Кол. ИЖД н	е вход. в	радиус ПД	1774				
38202								
38203	Общее кол	ичество И	жд	38192				

Рисунок 11 – Результаты расчета количества ИЖД, входящих в радиус пешеходной доступности с помощью excel Источник: составлено авторами.

> Figure 11 – The results of calculating the number of IRB included in the radius of walking distance using Excel Source: compiled by the authors.

Далее необходимо найти сумму всех единиц для каждой строки жилого дома, и если сумма будет больше 1, то в данной ячейке отобразится 1, которая будет означать, что данный ИЖД входит в радиус пешеходной доступности, в противном случае 0, который подтверждает, что данный ИЖД находится вне радиуса.

Далее рассчитывается количество единиц и отдельно количество нулей, которые покажут количество ИЖД или МЖД, входящих в радиус пешеходной доступности и не входящих в него (рисунок 11).

Те же действия необходимо провести и для МЖД.

На шестом этапе производится оценка полученных результатов, то есть полученное количество жилых домов, входящих в радиус пешеходной доступности, в процентах сравнивается с ориентиром транспортного обслуживания по доступности остановочных пунктов, указного в [3, c.5].

# РЕЗУЛЬТАТЫ

Согласно основным положениям комплексной программы модернизации пассажирского транспорта в городских агломерациях в соответствии с поручением Президента РФ от 04.05.2020 г. целевой ориентир транспортного обслуживания для оптимизации маршрутных сетей в отношении доступности остановок общественного транспорта для МЖД составляет 100%, для МЖД больше или равно 90%.

Территориальная доступность остановочных пунктов г. Омска, рассчитанная по разработанной методике, представлена в таблице 2.

#### Таблица 2

Территориальная доступность остановочных пунктов г. Омска Источник: составлено авторами.

### Table 2

Territorial accessibility of stopping points in Omsk Source: compiled by the authors.

Показатель	Тип дома			В общем		
	МЖД, ед.	ИЖД, ед.	МЖД, %	ИЖД, %	ед.	%
Количество входящих в радиус пешеходной доступности	5116	36418	91,41	95,36	41534	94,85
Количество не- входящих в радиус пешеходной доступности	481	1774	8,59	4,64	2255	5,15
Общее количество	5597	38192	100,00	100,00	43789	100,00

Согласно таблице 2 для достижения стандартов по доступности остановок общественного транспорта необходимо предусмотреть строительство остановок для 481 многоквартирного жилого дома для обеспечения доступности в 100%. Для индивидуальных жилых домов доступность соблюдается так, как она выше 90%, но для достижения 100% необходимо строительство остановок для 1774 индивидуальных жилых домов.

Полученные результаты по доступности (в процентах) могут быть выше, если для полученных адресов домов, не вошедших в радиус пешеходной доступности по предыдущим расчетам, определить расстояние пешеходного подхода по действующим тропинкам пешеходного передвижения. При этом полученные расстояния нужно сравнивать с указанными расстояниями кратчайшего пешеходного пути до остановочного пункта согласно стандарту<sup>16</sup>.

### ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная методика основывается на подсчете жилых домов, входящих в зону пешеходной доступности из всех имеющихся жилых домов города только на основе расстояний кратчайшего пешеходного пути от границ участков объектов до остановочных пунктов согласно требованиям<sup>25</sup>. Это дает лишь приблизительную оценку транспортной доступности остановочных пунктов и не выявляет конкретного транспортного района с «плохой» доступностью, а также не учитывает:

- интервал движения подвижного состава на маршрутах, проходящих через конкретные остановочные пункты;

- количество маршрутов, проходящих через остановочный пункт;

- пассажирообмен остановочного пункта;

 плотность населения для конкретного остановочного пункта;

- среднее время подхода к остановочному пункту.

Кроме того, методика учитывает жилые дома не по их географическим контурам, а в виде одной точки в условном центре здания. Для повышения точности отображения результатов можно использовать расстояния от контуров домов до остановочных пунктов, но это приведет к увеличению времени на поиск координат как минимум в 4 раза, в зависимости от геометрической формы дома в плане.

Тем не менее применение данной методики значительно уменьшает время для определения показателя территориальной доступности остановочных пунктов, так как подсчет количества всех жилых домов города и домов, не входящих в радиус пешеходной доступности остановочных пунктов, занимает большое количество времени. Учитывая большое количество жилых домов в городах, это имеет существенное значение.

Такая методика имеет свои ограничения и недостатки, но может служить основой для дальнейшего улучшения.

Направлениями совершенствования данной методики являются:

 учет пассажирообмена и интервала движения городского пассажирского транспорта;

 более точный учет непрямолинейности пеших передвижений;

- поиск мест для строительства новых остановок.

Разработка данной методики позволила существенно сократить трудоемкость решения задачи определения территориальной доступности остановочных пунктов в границах г. Омска, что позволило вовремя и более точно рассчитать и обосновать долю жилых домов, входящих в радиус территориальной доступности остановочных пунктов.

В качестве улучшения полноты и большей точности показателя территориальной доступности остановочных пунктов можно использовать метод по нахождению радиуса пешеходной доступности, описанный Л. И. Свердлиным, который учитывает при расчете радиуса интервалы движения городского пассажирского транспорта. Интервал движения можно определить по данным тренинга общественного транспорта с учетом потерь времени каждого пассажира в пути. Метод. позволяющий это сделать, разработан и показан в статье [20]. Методика, описанная в статье, позволяет накапливать и обрабатывать большое количество данных в динамике за определенный период, что дает возможность оценить доступность того или иного района города либо остановочного пункта более точнее, так как ,например, при использовании данной методики в Москве было выяснено, что чем блице

<sup>&</sup>lt;sup>16.</sup> Распоряжение Министерства транспорта РФ от 31 января 2017 г. № НА-19-р «Об утверждении социального стандарта транспортного обслуживания населения при осуществлении перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом».

к центру Москвы, тем больше времени уходит на поездку в пересчете на 1 км пути. Это свидетельствует о том, что хоть остановка и входит в радиус пешеходной доступности, но она может нести куда меньше пользы по сравнению с остальными, что в свою очередь зависит не только от времени в движении на 1 км пути, но и от количества проходящих через остановочный пункт маршрутов пассажирского общественного транспорта. В то же время такие методы не требуют так много данных для более полной оценки территориальной доступности остановочных пунктов в сравнении с методом РТАL, указанным в настоящей статье.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cervero R.; Guerra, E.; Al, S. Beyond Mobility: Planning Cities for People and Places; Island Press: Washington, DC, USA, 2017; pp. 109–117.

2. Razmik Agampatian. Using GIS to measure walkability: A Case study in New York City, Master's of Science Thesis in Geoinformatics TRITA-GIT EX 14-002, April 2014, 65 p.

3. Littman T. Transit Oriented Development: Using Public Transit to Create More Accessible and Livable Neighborhoods. In *TDM Encyclopedia*; Victoria Transport Policy Institute: Victoria, BC, USA, 2017.

4. Sinha K. C.; Labi S. Transportation Decision Making; Wiley and Sons: Hoboken, NJ, USA, 2007; pp. 23–27.

5. Banister D. Unsustainable Transport; Routledge: London, UK, 2005. pp. 124–128.

6. Ardeshiri A.; Willis, K.; Ardeshiri, M. Exploring preference homogeneity and heterogeneity for proximity to urban public services. Cities 2018, 81. Pp. 190–202.

7. Ding J.; Yi, Z.; Li, L. Accessibility measure of bus transit networks. IET Intell. Transp. Syst. 2018, 12. Pp. 682–688.

8. Danilina N., Elistratov D. Organization of municipal transport access control system. Passenger service models // Transportation Research Procedia. 2017. Vol. 20. Pp. 132-137. DOI: 10.1016/j. trpro.2017.01.034

9. Lakhotia S., Rao K.R., Tiwari G. Accessibility of bus stops for pedestrians in Delhi // Journal of Urban Planning and Development. 2019. Vol. 145. No. 4. Pp. 050190151. DOI: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000525

10.Головнин О. К., Кондратьева Е. О. Исследование методов оценки пешеходной доступности остановок общественного транспорта // Intelligent Technologies for Intelligent Decision Making Support. 2016. С. 182–185.

11. Михеев С. В., Кондратьева Е. О., Головнин О. К. Моделирование пешеходной доступности общественного транспорта // ИТ & Транспорт: сб. науч. статей; под ред. Т. И. Михеевой. Самара: Интелтранс, 2015. Т.4.

12.Zubkova E. & Saprykin, Oleg & Saprykina, O & Tihonov A. (2019). A method of improving the

pedestrian accessibility of the urban public transport stops based on a genetic algorithm. Journal of Physics: Conference Series. 1368.042027.10.1088/1742-6596/1368/4/042027. https://www.researchgate.net/ publication/337550977\_A\_method\_of\_improving\_ the\_pedestrian\_accessibility\_of\_the\_urban\_public\_ transport stops based on a genetic algorithm

13. Transport for London. "Measuring Public Transport Accessibility Level PTALS Summary" http:// content.tfl.gov.uk/connectivity-assessment-guide.pdf, Transport for London Windsor House 42-50 Victoria Street London SW1H 0TL April 2015 tfl.gov.uk;

14.Adhvaryu, Bhargav; Chopde, Abhay; Dashora, Lalit. Mapping public transport accessibility levels (PTAL) in India and its applications: A case study of Surat. Case Studies on Transport Policy, 2019, Vol. 7, Iss. 2, pp. 293–300. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/331759277\_ Mapping\_public\_transport\_accessibility\_levels\_PTAL\_ in\_India\_and\_its\_applications\_A\_case\_study\_of\_ Surat. DOI: 10.1016/j.cstp.2019.03.004.

15.Wu, B. M., Hine, J. P. A PTAL approach to measuring changes in bus service accessibility. Transport Policy, 2003, Vol. 10, Iss. 4, pp. 307–320. DOI: 10.1016/ S0967-070X (03)00053-2.

16.Сидоров В. П., Ситников П. Ю. Транспортная доступность как показатель рациональной организации работы городского пассажирского транспорта // Вестник Удмуртского университета. Биология. Науки о Земле. 2017. Т. 27, Вып. 4. С. 547–553.

17.Shah, Jay S & Adhvaryu, Bhargav. 2016. Public Transport Accessibility Levels for Ahmedabad, India. Journal of Public Transportation: https://core.ac.uk/ download/pdf/194961932.pdf, accessed November 10. 2020.;

18.A Methodology to Evaluate Accessibility to Bus Stops as a Contribution to Improve Sustainability in Urban Mobility / Corazza, M. V.; Favaretto, N. In: SUSTAINABILITY. ISSN 2071-1050. 11:3(2019).

19.Corazza M. V.; Musso A.; Karlsson M. Á. More accessible bus stops: Results from the 3iBS research project. In Transport Infrastructure and Systems; Dell'Acqua, G., Wegman, F., Eds.; CRC Press/Taylor & Francis Group: London, UK, 2017; pp. 641–650.

20.Шитова Ю., Шитов Ю., Власов Д. ГИС-мониторинг потерь времени на маршруте дом-работа (на примере маршрута Подмосковье–Москва) / Ю. Шитова, Ю. Шитов, Д. Власов // Проблемы теории и практики управления. 2017. № 11. С. 103–114.

### REFERENCES

1. Cervero R., Guerra, E., Al, S. Beyond Mobility: Planning Cities for People and Places. *Island Press*: Washington, DC, USA, 2017. pp. 109–117.

2. Razmik Agampatian. Using GIS to measure walkability: A Case study in New York City. Master's of Science *Thesis in Geoinformatics TRITA-GIT EX 14-002*, April 2014. 65 p.

3. Littman T. Transit Oriented Development: Using Public Transit to Create More Accessible and Livable Neighborhoods. In TDM Encyclopedia, *Victoria Transport Policy Institute*: Victoria, BC, USA, 2017. 4. Sinha K.C., Labi, S. Transportation Decision Making, Wiley and Sons: Hoboken, NJ, USA, 2007. pp. 23–27.

5. Banister D. Unsustainable Transport, *Routledge*: London, UK, 2005. pp. 124–128.

6. Ardeshiri A., Willis, K., Ardeshiri, M. Exploring preference homogeneity and heterogeneity for proximity to urban public services. Cities 2018, 81. Pp. 190–202.

7. Ding J., Yi, Z., Li, L. Accessibility measure of bus transit networks. *IET Intell. Transp. Syst.* 2018, 12. Pp. 682–688.

8. Danilina N., Elistratov D. Organization of municipal transport access control system. Passenger service models. Transportation Research Procedia, 2017. Vol. 20. Pp. 132-137.

9. Lakhotia S., Rao K.R., Tiwari G. Accessibility of bus stops for pedestrians in Delhi. Journal of Urban Planning and Development. 2019. Vol. 145. No. 4. Pp. 050190151. DOI: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000525

10.Golovnin O. K. *Issledovanie metodov* ocenki peshekhodnoj dostupnosti ostanovok obshchestvennogo transporta [Study of methods for assessing the pedestrian accessibility of public transport stops]. Intelligent Technologies for Intelligent Decision Making Support. 2016. pp. 182-185.

11. Miheev S. V., Kondrat'eva E. O., Golovnin O. K. Modelirovanie peshekhodnoj dostupnosti obshchestvennogo transporta [Modeling the pedestrian accessibility of public transport]. *IT & Transport: sb. nauch. statej, pod red. T.I. Miheevoj.* Samara: Inteltrans, 2015. T.4.

12.Zubkova E, Saprykin O, Saprykina O., Tihonov A. A method of improving the pedestrian accessibility of the urban public transport stops based on a genetic algorithm. *Journal of Physics: Conference Series*. 1368.042027.10.1088/1742-6596/1368/4/042027. URL:https://www.researchgate. net/publication/337550977\_A\_method\_of\_improving\_ the\_pedestrian\_accessibility\_of\_the\_urban\_public\_ transport\_stops\_based\_on\_a\_genetic\_algorithm.

13. Transport for London. Measuring Public Transport Accessibility Level PTALS Summary URL:http://content.tfl.gov.uk/connectivity-assessment-guide.pdf, Transport for London Windsor House 42-50 Victoria Street London SW1H 0TL April 2015 tfl.gov.uk.

14.Adhvaryu, Bhargav, Chopde, Abhay, Dashora, Lalit. Mapping public transport accessibility levels (PTAL) in India and its applications: A case study of Surat. *Case Studies on Transport Policy*. 2019; 7, Iss. 2: 293–300. URL: https://www.researchgate.net/ publication/331759277\_Mapping\_public\_transport\_ accessibility\_levels\_PTAL\_in\_India\_and\_its\_ applications\_A\_case\_study\_of\_Surat.

15.Wu B. M., Hine, J. P. A PTAL approach to measuring changes in bus service accessibility. *Transport Policy*. 2003; Vol. 10, Iss. 4: 307–320.

16.Sidorov V. P., Sitnikov P. YU. Transportnaya dostupnosť kak pokazateľ racionaľnoj organizacii raboty gorodskogo passazhirskogo transporta [Transport accessibility as an indicator of the rational organization of urban passenger transport]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta*. Biologiya. Nauki o Zemle. 2017; Vol. 27. Iss. 4: 547-553.

17.Shah, Jay S & Adhvaryu, Bhargav. 2016. Public Transport Accessibility Levels for Ahmedabad, India. *Journal of Public Transportation*, URL: https:// core.ac.uk/download/pdf/194961932.pdf, accessed November 10. 2020.

18.A Methodology to Evaluate Accessibility to Bus Stops as a Contribution to Improve Sustainability in Urban Mobility / Corazza M. V., Favaretto, N. In: SUSTAINABILITY. ISSN 2071-1050. 11:3 (2019).

19.Corazza M.V., Musso, A., Karlsson, M.A. More accessible bus stops: Results from the 3iBS research project. *In Transport Infrastructure and Systems*. Dell'Acqua, G., Wegman, F., Eds., CRC Press/Taylor & Francis Group: London, UK, 2017. pp. 641–650.

20.SHitova Y. U., SHitov Y. U., Vlasov D. GISmonitoring poter' vremeni na marshrute dom-rabota (na primere marshruta Podmoskov'e-Moskva) [GISmonitoring of time losses on the route home-work (on the example of the Moscow region-Moscow route)]. *Problemy teorii i praktiki upravleniya*. 2017; No. 11: 103-114. (in Russ.)

### ВКЛАД СОАВТОРОВ

Войтенков С. С. Общее руководство, постановка задачи, оформление статьи, формулировка выводов.

Банкет М. В. Организационная поддержка, оформление статьи.

### COAUTHOR'S CONTRIBUTION

Sergei S. Voitenkov Overall management, problem statement, article design, conclusion statement.

Mikhail V. Banket Organisational support, article design.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Войтенков Сергей Сергеевич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Организация перевозок и управление на транспорте».

Банкет Михаил Викторович – канд. техн. наук, доц., декан факультета «Автомобильный транспорт».

# **INFORMATION ABOUT AUTHORS**

Sergei S. Voitenkov – Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor of the Organization of Transportation and Management in Transport Department.

Mikhail V. Banket – Cand. of Sci., Associate Professor, Dean of the Automobile Transport Faculty.



УДК 656.13 https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-216-223 https://elibrary.ru/OBHJGY Научная статья



# ФУНКЦИОНАЛ ПУТЕВОГО ЛИСТА В TRANSPORTATION MANAGEMENT SYSTEM

В. М. Курганов<sup>\*</sup>, А. Н. Дорофеев<sup>2</sup>, М. В. Грязнов<sup>3</sup> <sup>1</sup>Тверской государственный университет, г. Тверь, Россия <sup>2</sup>Финансовый университет при Правительстве РФ, г. Москва, Россия <sup>3</sup>Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Россия glavreds@gmail.com, http://orcid.org/0000-0001-8494-2852, andorofeev@fa.ru, http://orcid.org/ 0000-0002-0689-8881, gm-autolab@mail.ru, http://orcid.org/ 0000-0003-3142-1089 <sup>\*</sup>ответственный автор

# аннотация

**Введение.** В условиях цифровизации экономики практическое значение имеет использование в транспортной деятельности электронного документооборота. Нормативными актами установлено, что в пакет сопроводительных товарно-транспортных документов при автомобильных перевозках входит путевой лист автомобиля. В связи с этим актуально исследование возможностей электронного путевого листа в цифровой системе управления автотранспортным предприятием для повышения эффективности его деятельности.

**Материалы и методы.** В исследованиях использованы методы анализа и синтеза цифрового моделирования, методы сравнения и анализа статистических данных.

**Результаты.** На основе системного анализа нормативных актов дана характеристика правового статуса путевого листа. Впервые сформирована обобщённая схема информационных потоков в цифровой модели автотранспортного предприятия, в которой центральное место занимает путевой лист. Реализация процедуры Process Mining в информационной системе управления автотранспортным предприятием, созданной с применением концепции «цифровых двойников», позволила получить количественные характеристики операций с путевыми листами, выполняемым персоналом.

**Обсуждение и заключение.** Полученные результаты обладают научной новизной и представляют практический интерес для предприятий, имеющих в собственности автотранспортные средства и осуществляющих перевозки грузов как для собственных нужд, так и по заказам.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** автомобильный транспорт, путевой лист, информационная система управления, электронный документооборот, Process Mining.

**БЛАГОДАРНОСТИ.** Авторы благодарны рецензентам, взявшим на себя труд изучить статью. В результате работы рецензентов удалось предпринять усилия по улучшению текста статьи. Отдельные аспекты исследований, изложенных в статье, обсуждались на ряде конференций, организаторам и участникам которых авторы выражают свою благодарность.

Статья поступила в редакцию 16.02.2022; одобрена после рецензирования 13.03.2022; принята к публикации 12.04.2022.

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: Курганов В. М. Функционал путевого листа в transportation management system / В. М. Курганов, А. Н. Дорофеев, М. В. Грязнов // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 2(84). С. 216-223. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-216-223

© Курганов В. М., Дорофеев А. Н., Грязнов М. В., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.



https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-216-223 https://elibrary.ru/OBHJGY Original article

# WAYBILL FUNCTIONALITY IN TRANSPORTATION MANAGEMENT SYSTEM

Valerii M. Kurganov<sup>†</sup>, Aleksei N. Dorofeev<sup>2</sup>, Mikhail V. Griaznov<sup>3</sup> <sup>1</sup>Tver State University, Tver, Russia <sup>2</sup>Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia <sup>3</sup>Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia glavreds@gmail.com, http://orcid.org/0000-0001-8494-2852, andorofeev@fa.ru, http://orcid.org/0000-0002-0689-8881, gm-autolab@mail.ru, http://orcid.org/0000-0003-3142-1089 \*corresponding author

# ABSTRACT

**Introduction.** In the conditions of digitalization of the economy, the use of electronic document management in transport activities is of practical importance. Regulatory acts have established that the package of accompanying goods and transport documents for road transport includes the waybill of the car. In this regard, it is important to study the possibilities of an electronic waybill in the digital management system of a motor transport enterprise to increase the efficiency of its activities.

*Materials and methods.* The research uses methods of analysis and synthesis, digital modeling, methods of comparison and analysis of statistical data.

**Results.** Based on the system analysis of normative acts, the characteristic of the legal status of the waybill is given. A generalized scheme of information flows in the digital model of a motor transport enterprise has been formed, in which the waybill occupies a central place. The implementation of the Process Mining procedure in the information management system of a motor transport enterprise, created using the digital twins concept, made it possible to obtain quantitative characteristics of operations with waybills performed by the staff.

**Discussion and conclusion.** The results obtained have scientific novelty and are of practical interest for enterprises that own motor vehicles and carry out cargo transportation both for their own needs and on orders.

**KEYWORDS:** road transport, waybill, management information system, electronic document management, *Process Mining.* 

**ACKNOWLEDGEMENTS:** The authors are grateful to the reviewers who took the trouble to study the article. As a result of the reviewers' work, the efforts were made to improve the text of the article. Some aspects of the research presented in the article were discussed at a number of conferences, to the organizers and participants of which the authors express their gratitude.

The article was submitted 16.02.2022; approved after reviewing 13.03.2022; accepted for publication 12.04.2022.

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:* Valerii M. Kurganov, Aleksei N. Dorofeev, Mikhail V. Griaznov. Waybill functionality in transportation management system. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2022; 19 (2): 216-223. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-216-223

© Kurganov V. M., Dorofeev A. N., Griaznov M. V., 2022



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

# введение

Цифровые технологии требуют организации безбумажного документооборота. Это справедливо для всех отраслей экономики, и в полной мере относится к транспорту, особенно в сфере грузовых автомобильных перевозок. Автомобильный транспорт, пожалуй, имеет одну из самых объемных систем документального оформления деятельности. Министерство транспорта Российской Федерации в 2021 г. организовало тестирование прототипов электронного путевого листа (ЭПЛ) и электронной транспортной накладной (ЭТрН). По итогам реализации пилотного проекта принято решение провести очередной эксперимент по применению в реальных условиях электронных товарно-транспортных документов.

Эксперимент в части использования электронного документооборота в автомобильных перевозках отражает общий тренд цифровизации транспортной отрасли [1, 2], а также логистики [3] и в целом экономики [4]. Предполагается, что цифровая трансформация [5, 6] охватит не только перевозочную деятельность, а преобразует в целом деятельность транспортных предприятий<sup>1</sup>.

Отмеченные процессы ведут к новому импульсу развития информационных систем управления. Программные продукты решения отдельных задач управления, например нормирования и экономии расхода топлива [7, 8], дополняются другими с целью формирования целостной системы поддержки управленческих решений [9, 10]. Важными факторами обеспечения эффективности транспортировки грузов являются сокращение времени доставки [11], увеличение скорости доставки [12] и комплексные мероприятия по сокращению различных видов потерь [13].

Перспективным направлением эволюции информационных технологий в управлении является создание цифровых двойников [14], в том числе и на транспортно-логистических предприятиях [15]. Ожидается, что данная концепция положительно повлияет на изменения в экономических показателях [16].

В этой связи имеет актуальность проработка функционала электронного путевого листа в условиях распространения цифровых технологий управления. Под функционалом авторы в данной статье понимают совокупность возможностей электронного путевого листа для повышения эффективности автотранспортной деятельности.

Цель работы – исследование возможностей электронных путевых листов и анализа процессов их обработки системой управления автотранспортного предприятия для повышения эффективности его деятельности.

# МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В исследованиях использованы методы анализа и синтеза, цифрового моделирования, методы сравнения и анализа статистических данных.

Использование путевого листа в грузовых автомобильных перевозках регулируется разветвленной системой транспортного права, в которую входят федеральные законы, подзаконные акты и официальные разъяснения министерств и ведомств. Проведен анализ нормативно-правовых документов с целью определения правового статуса путевого листа в системе документооборота автотранспортных предприятий.

Проведено аналитическое исследование бизнес-процессов автотранспортного предприятия, для осуществления которых требуется использование путевых листов, после чего проведен синтез системы информационных связей путевого листа с плановыми и учетными документами.

Создана информационная модель asтотранспортного предприятия, для чего использованы элементы концепции «цифровых двойников». Исследована информация, содержащаяся в лог-файлах журнала событий информационной системы управления. Реализация процедуры Process Mining обеспечила получение статистических данных, характеризующих выполнение функций персоналом по видам выполняемых операций. Сравнение и анализ полученной статистики позволили дать количественную характеристику операций диспетчеров с путевыми листами и оценить неравномерность загрузки сотрудников в течение смены.

# РЕЗУЛЬТАТЫ

По сравнению с другими видами транспорта автомобильные перевозки характеризуются значительно большим количеством оформляемых сопроводительных документов.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Дорофеев А. Н., Курганов В. М. Цифровая трансформация транспортно-логистического предприятия // Материалы VI Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте». Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева. Под редакцией А. Н. Новикова. 2020. С. 8-12.



Рисунок 1 — Путевой лист в цифровой модели транспортного предприятия Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Waybill in digital model of transport enterprise. Source: compiled by the authors.

Во многом это объясняется сравнительно небольшим количеством груза, перевозимого одним транспортным средством за один рейс. Состав необходимых товарно-транспортных документов различается в зависимости от вида груза, например, их перечень увеличивается при перевозке опасных грузов, а также крупногабаритных и тяжеловесных грузов. Пакет документов, оформляемых при международной перевозке, отличается от того, который необходим при перевозке внутри Российской Федерации.

Однако во всех случаях в России необходимо оформление путевого листа на автомобиль, выполняющий перевозку груза<sup>2</sup>. Это обстоятельство характерно для российского транспортного права, т. к. во многих странах мира сопроводительные документы оформляются на перевозимый груз, а не на транспортное средство, осуществляющее перевозку. В ряде случаев на автомобиль оформляются страховые полисы гражданской ответственности (например «зеленая карта») или КАСКО, но эти документы имеют совершенно другой характер и назначение, чем путевой лист.

Наличие путевого листа в пакете сопроводительных товарно-транспортных документов вызвано целым рядом обстоятельств. Наиболее важным из них является подтверждение в путевом листе исправности автомобиля и допуска водителя к работе по медицинским показаниям. Поскольку к обязательным реквизитам путевого листа<sup>3</sup> относятся показания одометра при выезде на линию и при возвращении на место стоянки, а также дата и время выезда и возвращения, то становится возможным проверять соблюдение водителем режима труда и отдыха, контролировать обоснованность затрат на перевозки, в том числе на топливо, и, в зависимости от принятой формы оплаты труда, правильность начисления заработной платы.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Устав автомобильного транспорта и городского наземного электрического транспорта. Федеральный закон от 8.11.2007 № 259-ФЗ.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Об утверждении обязательных реквизитов и порядка заполнения путевых листов. Приказ Минтранса РФ от 11.09.2020 № 368.



Рисунок 2 – «Цифровые следы» операций диспетчера Lebedev Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Lebedev Manager Digital Footprints. Source: compiled by the authors.

В настоящее время обязательной формы путевого листа не существует, т. к. постановление Госкомстата России<sup>4</sup>, в котором содержались бланки для разных видов перевозок, утратило директивный характер. Это открывает широкие перспективы совершенствования электронного документооборота в автотранспортном предприятии.

Предприятия вправе самостоятельно разрабатывать удобную для них форму путевого листа<sup>5</sup> при условии наличия в нем обязательных реквизитов. Возможно утверждение в учетной политике предприятия не только самого путевого листа<sup>6</sup>, но и приложения к нему (например маршрутного листа), чтобы отражать с необходимой степенью детализации дневное задание на перевозку и фактические данные о его выполнении.

Фиксация планового и фактического времени прибытия автомобиля в пункты маршрута, времени начала и окончания погрузочно-разгрузочных работ, пробегов между пунктами маршрута дает возможность выявить отклонения от графика перевозок, сверхнормативные простои, перерасход топлива и другие отклонения от выданного дневного задания. Для занесения в путевые листы фактических сведений о работе автомобиля данные могут подгружаться из спутниковой системы мониторинга.

В путевом листе сосредотачивается плановая и учетная информация, необходимая для управления транспортной деятельностью и функционирования всех основных функциональных служб автотранспортного предприятия: бухгалтерии, отдела труда и заработной платы, службы технического обслуживания и ремонта и других (рисунок 1). При таком подходе путевой лист занимает центральное место в организации информационных потоков в цифровой системе управления транспортной деятельностью – Transportation Management System (TMS).

Реализация в информационной системе управления автотранспортным предприятием (TMS) элементов модели «цифрового двойника»<sup>7</sup> позволила получить «цифровые следы» выполнения диспетчерским персоналом операций с путевыми листами. Информацию содержит лог-файл журнала событий.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Дорофеев А. Н., Курганов В. М. Реализация концепции «Цифровых двойников» для управления транспортно-логистической компанией. Автомобильные перевозки и транспортная логистика: теория и практика // Сборник научных трудов кафедры «Организация перевозок и управление на транспорте» (с международным участием). Под научной редакцией Е. Е. Витвицкого. Омск, 2020. С. 26–32.



<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Об утверждении унифицированных форм первичной учетной документации по учету работы строительных машин и механизмов, работ в автомобильном транспорте. Постановление Госкомстата РФ от 28.11.1997 № 78.

<sup>5</sup> О бухгалтерском учете. Федеральный закон от 06.12.2011 №402-ФЗ.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Положение по бухгалтерскому учету «Учетная политика организации»(ПБУ 1/2008). Приказ Минфина РФ от 06.10.2008 г. № 106н.

PART II



Рисунок 3 – Количество операций по выписке и закрытию путевых листов в течение суток Источник: составлено авторами.

Figure3 – Number of trip tickets issued and closed during the day. Source: compiled by the authors.

Для получения количественных характеристик целесообразно использовать процедуру Process Mining [17]. Она представляет новый этап применения информационных технологий в бизнесе [18], в том числе при управлении цепями поставок [19]. Исследование с использованием процедуры Process Mining дала возможность установить [20], что диспетчеры вносят изменения в справочники водителей и транспортных средств, выполняют операции, связанные с нормированием и контролем расхода топлива, контролем износа шин и их списанием и так далее.

Путевой лист как документ первичного учета должен храниться в течение 5 лет. Однако анализ «цифровых следов» действий диспетчеров установил нарушения этого требования. В течение года удалено 1829 путевых листов или 3% от оформленных за год. Например, статистика операций диспетчера Lebedev (рисунок 2) показывает максимум операций по таксировке путевых листов (операция UPDATE DBA. LIST) и обработке маршрутных листов (операция UPDATE DBA.LIST\_MARSHRUT). Тем не менее заметны операции по удалению из базы данных ранее оформленных путевых листов DELETE FROM DBA.LIST.

Собранная статистика путем реализации процедуры Process Mining позволила установить, насколько равномерно загружены диспетчеры в течение суток (рисунок 3). Пиковые нагрузки в утренние и вечерние часы в два-три раза превышают средний уровень. Напряженность в работе приводит к стрессам, появлению ошибок и в целом снижает эффективность управления транспортным процессом.

Статистическая информация и знание реально выполняемых диспетчерами операций и их загрузки в течение смены – важный этап аудита бизнес-процессов в компании. На этой основе проводится рациональное распределение функций персонала и организуется совершенствование функционирования деятельности автотранспортного предприятия для повышения эффективности.

# ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований обладают научной новизной и могут быть использованы в практической деятельности предприятий, осуществляющих автомобильные перевозки грузов. В статье впервые с системных позиций дан анализ правового статуса путевого листа в пакете сопроводительной товарно-транспортной документации. Показаны перспективы электронного путевого листа и его центральная роль в организации документооборота автотранспортного предприятия и совершенствования бизнес-процессов. По результатам натурных исследований установлены фактически выполняемые диспетчерами операции с путевым листом, на основе чего можно проводить рациональное распределение функций среди персонала.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов А. Л., Кириченко А. В., Щербакова-Слюсаренко В. Н. Направления цифровизации транспортной отрасли // Вестник ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. 2018. Т. 10, № 6. С. 1179– 1190. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1179-1190

2. Моросанова Н. А., Мелешкина А. И., Маркова О. А. Цифровая трансформация на транспорте: возможности развития и риски ограничения конкуренции // Современная конкуренция. 2019. Т. 13, № 3 (75). С. 73–90. DOI: 10.24411/1993-7598-2019-10307

3. Федотова С. Н. Цифровизация транспортно-логистических услуг // Journal of Economy and Business. 2019. Vol. 11-3 (57). С. 124–127. DOI: 10.24411/2411-0450-2019-11407

4. Бубнова Г. В. Экономика и логистика в условиях цифровизации транспортной отрасли / Г. В Бубнова, Е. В. Емец, П. В. Куренков, А. В. Астафьева, А. А. Тюгашев // Тренды экономического развития транспортного комплекса России: 2018. № 2. С. 44–53. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=%20 37304688 (дата обращения: 16.03.2022).

5. Kozak-Holland M., Procter C. The Challenge of Digital Transformation. Managing Transformation Projects. 2020. Palgrave Pivot. Pp. 1-11.

6. Boureanu L. From Customer Service to Customer Experience: The Drivers, Risks and Opportunities of Digital Transformation. In: Klewes J., Popp D., Rost-Hein M. (eds) Out-thinking Organizational Communications. Management for Professionals. 2017. Springer. pp. 145-155.

7. Курганов В. М., Дорофеев А. Н., Грязнов В. М. Нормирование расхода топлива с использованием информационных технологий // Вестник СибАДИ. 2018. Т. 15. № 2(60). С. 237–248. DOI: https://doi. org/10.26518/2071-7296-2018-2-237-248.

8. Yao Y., Zhao X., Liu C., Rong J., Zhang Y., Dong Z., Su Y. Vehicle fuel consumption prediction method based on driving behavior data collected from smartphones // Journal of Advanced Transportation. Vol. 9263605, 2020. Pp. 1-11.

9. Журавлева Н. А. Проблемы внедрения информационных технологий на транспорте // Транспорт Российской Федерации. 2019. № 3 (82). С. 19–22.

10. Дорофеев А. Н. Системный подход при подготовке и принятия решений для управления АТП // Грузовое и пассажирское автохозяйство. 2013. № 7. С. 42–48.

11. Курганов В. М., Грязнов М. В., Тимофеев Е. А. Фактор времени в ситуационном управлении автомобильными перевозками живой птицы // Транспорт Урала. 2021. № 3 (70). С. 15–21. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-15-21/

12. Журавлева Н. А. Проблемы экономической оценки скорости в транспортно-логистических системах в новом технологическом укладе // Транспортные системы и технологии. 2017. Том 3, № 4. С. 150–178.

13. Эртман Ю. А. Потери транспортного производства: монография / Ю. А. Эртман, С. А. Эртман, О. Ю. Смирнова, А. В. Медведев. Тюмень: ТИУ, 2021. 160 с.

14. Riss U.V., Maus H., Javaid S., Jilek C. Digital Twins of an Organization for Enterprise Modeling // Lecture Notes in Business Information Processing. Vol. 400. 2020. Pp. 25-40.

15. NekrasovA., SinitsynaA. Complex Digital Model of Transport Logistic System Transformation. Reliability and Statistics in Transportation and Communication. RelStat 2019. Lecture Notes in Networks and Systems. 2020. Vol 117. Springer. Pp. 244-251.

16. Римская О. Н., Анохов И. В. Цифровые двойники и их применение в экономике транспорта // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2021. № 12 (2). С. 127–137. DOI: 10.17747/2618-947X-2021-2-127-137.

17. Lorenz R., Senoner J., Sihn W., Netland T. Using process mining to improve productivity in make-tostock manufacturing. International Journal of Production Research, 59:16, 2021, pp. 4869-4880. DOI:10.1080/00 207543.2021.1906460.

18. Dreher S., Reimann P., Gröger, C. Application fields and research gaps of Process Mining in Manufacturing Companies. In: Reussner, R. H., Koziolek, A. & Heinrich, R. (Hrsg.), Informatik. 2020. GesellschaftfürInformatik, Bonn. pp. 621-634.

19. Schwaickardt E., Dantas M. J.P. Process Mining applied in Supply Management Processes. European Journal of Scientific Research. Vol. 151. №. 2. 2018. pp. 160-171.

20. Kurganov V., Dorofeev A., Gryaznov M., Yakimov M., Process Mining as a means of improving the reliability of road freight transportations // Transportation Research Procedia. Volume 54, 2021. P. 300-308. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.076

# REFERENCES

1. Kuznetsov A. L., Kirichenko A. V., Shcherbakova-Slyusarenko V. N. Napravleniya tsifrovizatsii transportnoi otrasli [Directions of digitalization of the transport industry]. *Vestnik GUMRF imeni admirala S. O. Makarova.* 2018; t. 10, no 6:1179-1190. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1179-1190 (in Russ.)

2. Morosanova N. A., Meleshkina A. I., Markova O. A. Tsifrovaya transformatsiya na transporte: vozmozhnosti razvitiya i riski ogranicheniya konkurentsii [Digital transformation in transport: development opportunities and risks of limiting competition]. *Sovremennaya konkurentsiya*. 2019; t. 13, no 3 (75): 73-90. (in Russ.) DOI: 10.24411/1993-7598-2019-10307

3. Fedotova S. N. Tsifrovizatsiya transportno-logisticheskikh uslug [Digitalization of transport and logistics services]. *Journal of Economy and Business*. 2019; 11-3 (57):124-127. (in Russ.) DOI: 10.24411/2411-0450-2019-11407

4. Bubnova G.V., Emets E. V., Kurenkov P. V. Ekonomika i logistika v usloviyakh tsifrovizatsii transportnoi otrasli [Economics and logistics in the context of digitalization of the transport industry]. *Trendy ekonomicheskogo razvitiya transportnogo kompleksa Rossii*. 2018; no 2: 44-53. (in Russ.) URL: https://elibrary.ru/ item.asp?id=%2037304688 (assessed at 16.03.2022).

5. Kozak-Holland M., Procter C. The Challenge of Digital Transformation. Managing Transformation Projects. 2020. Palgrave Pivot. pp. 1-11.

6. Boureanu L. From Customer Service to Customer Experience: The Drivers, Risks and Opportunities of Digital Transformation. In: Klewes J., Popp D., Rost-Hein M. (eds) Out-thinking Organizational Communications. Management for Professionals. 2017. Springer. pp. 145-155.

7. Kurganov V. M., Mukayev V. N., Gryaznov M. V. Optimization of automobile transportation costs in industrial enterprise. *The Russian Automobile and High-way Industry Journal*. 2018;15(5):672-685. (In Russ.) https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-5-672-685

8. Yao Y., Zhao X., Liu C., Rong J., Zhang Y., Dong Z., Su Y. Vehicle fuel consumption prediction method based on driving behavior data collected from smartphones. *Journal of Advanced Transportation*. Vol. 9263605, 2020. pp. 1-11. 9. Zhuravleva N. A. Problemy vnedreniya informatsionnykh tekhnologii na transporte Rationing of fuel consumption using information technology [Problems of introduction of information technologies in transport]. *Transport Rossiiskoi Federatsii.* 2019; 3 (82): 19-22. (in Russ.)

10. Dorofeev A. N. Sistemnyi podkhod pri podgotovke i prinyatiya reshenii dlya upravleniya ATP [A systematic approach to the preparation and decision-making for ATP management]. *Gruzovoe i passazhirskoe avtokhozyaistv*o. 2013; 7: 42-48. (in Russ.)

11. Kurganov V. M., Gryaznov M. V., Timofeev E. A. Faktor vremeni v situatsionnom upravlenii avtomobil'nymi perevozkami zhivoi ptitsy [Time factor in situational management of live poultry road transport]. *Transport Urala*. 2021; 3 (70): 15-21. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-3-15-21 (in Russ.)

12. Zhuravleva N. A. Problemy ekonomicheskoi otsenki skorosti v transportno-logisticheskikh sistemakh v novom tekhnologicheskom uklade [Problems of economic assessment of speed in transport and logistics systems in a new technological way]. *Transportnye sistemy i tekhnologii*. 2017; 3, no 4: 150-178. (in Russ.)

13. Ertman Yu. A., Ertman S. A., Smirnova Ó. Yu., Medvedev A. V. Poteri transportnogo proizvodstva [Losses of transport production]. Tyumen': TIU, 2021. pp.160. (in Russ.)

14. Riss U. V., Maus H., Javaid S., Jilek C. Digital Twins of an Organization for Enterprise Modeling. *Lecture Notes in Business Information Processing*. Vol. 400. 2020: 25-40.

15. Nekrasov A., Sinitsyna A. Complex Digital Model of Transport Logistic System Transformation. Reliability and Statistics in Transportation and Communication. RelStat 2019. Lecture Notes in Networks and Systems. 2020. Vol 117. Springer. Pp. 244-251.

16. Rimskaya O. N., Anokhov I. V. Tsifrovye dvoiniki i ikh primenenie v ekonomike transporta [Digital twins and their application in the transport economy]. *Strategicheskie resheniya i risk-menedzhment*. 2021; 12(2): pp. 127–137. (in Russ.) DOI: 10.17747/2618-947X-2021-2-127-137.

17. Lorenz R., Senoner J., Sihn W., Netland T. Using process mining to improve productivity in make-tostock manufacturing. International Journal of Production Research, 59:16, 2021, pp. 4869-4880. DOI:10.1080/00 207543.2021.1906460.

18. Dreher S., Reimann P., Gröger, C. Application fields and research gaps of Process Mining in Manufacturing Companies. In: Reussner, R. H., Koziolek, A. & Heinrich, R. (Hrsg.), *Informatik*. 2020. GesellschaftfürInformatik, Bonn. pp. 621-634.

19. Schwaickardt E., Dantas M. J.P. Process Mining applied in Supply Management Processes. *European Journal of Scientific Research*. 2018; 151. no. 2: 160-171.

20. Kurganov V., Dorofeev A., Gryaznov M., Yakimov M., Process Mining as a means of improving the reliability of road freight transportations. *Transportation Research Procedia*. 2021; Volume 54: 300-308. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.076

### ВКЛАД СОАВТОРОВ

Курганов В. М. Научное руководство исследованием, включая формулировку проблемы, ее актуальности, идеи работы, постановку задач, формирование общей методологии проведения исследования, исследование правового статуса путевого листа, разработка концептуальной схемы электронного документооборота и связей информационных потоков, подготовка и редакция статьи.

Дорофеев А. Н. Разработка и реализация цифровой модели предприятия, реализация процедуры Process Mining, формирование массива исходной статистической информации, разработка методики и проведение натурных исследований и их интерпретация, описание результатов натурных исследований, участие в написании и редактировании статьи.

Грязнов М. В. Анализ научной и нормативно-правовой литературы по изучаемой проблеме, систематизация организационно-правовых аспектов использования электронного путевого листа, проработка методических вопросов использования путевого листа в системе электронного документооборота предприятия, участие в написании и редактировании статьи.

### **COAUTHORS' CONTRIBUTION**

Valerii M. Kurganov. Research management, including problem statement, its relevance, the idea of the work, the problem statement, the formation of a general methodology for conducting research, the study of the legal status of the waybill, the development of a conceptual scheme of electronic document flow and the links of information flows, the preparation and edition of the article.

Aleksei N. Dorofeev. Development and implementation of the digital model of the enterprise, implementation of the Process Mining procedure, formation of an array of initial statistical information, development of methods and conducting field studies and their interpretation, description of the results of field studies, participation in writing and editing the article.

Mikhail V. Griaznov. Analysis of scientific and regulatory literature on the studied problem, systematization of organizational and legal aspects of the use of an electronic waybill, elaboration of methodological issues of the use of a waybill in the electronic document management system of the enterprise, participation in the writing and editing of the article.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Курганов Валерий Максимович – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры экономики предприятия и менеджмента.

Дорофеев Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доц. кафедры бизнес-информатики.

Грязнов Михаил Владимирович — д-р техн. наук, доц., проф. кафедры логистики и управления транспортными системами.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valerii M. Kurganov – Dr. Sci., Associate Professor, Professor of the Enterprise Economics and Management Department.

Aleksei N. Dorofeev – Cand. of Sci., Associate Professor of the Business Informatics Department.

Mikhail V. Griaznov – Dr. of Sci., Associate Professor, Professor of the Logistics and Management of Transport Systems Department.





УДК 656.08 https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-224-235 https://elibrary.ru/OOKGPG Научная статья



# ФАКТОРЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ С ОСОБО ТЯЖКИМИ ПОСЛЕДСТВИЯМИ

Е. В. Печатнова<sup>1\*</sup>, В. Н. Кузнецов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» г. Барнаул, Россия <sup>2</sup>Алтайский государственный аграрный университет, г. Барнаул, Россия http://orcid.org/0000-0001-9182-2365, phukcia@yandex.ru http://orcid.org/0000-0002-4338-971X, kusnezow-vn@yandex.ru бответственный автор

# АННОТАЦИЯ

Введение. Основной государственной целью в области обеспечения безопасности дорожного движения является сокращение числа погибших в ДТП и стремление к нулевой смертности к 2030 г. Одним из вариантов ее достижения является предупреждение ДТП с особо тяжкими последствиями. Основой эффективной системы их предупреждения является анализ основных факторов возникновения таких ДТП. Обзор научной литературы показывает недостаток знаний в этой области.

**Материалы и методы.** Исследование выполнено на основе выборки ДТП с особо тяжкими последствиями, которые были зафиксированы на территории Сибирского федерального округа в период с 2017 по 2020 г. Анализировались следующие параметры: количество погибших и пострадавших, вид ДТП, период суток, день недели, месяц года, состояние погоды и проезжей части. Исследование основано на многомерном частотном распределении. Расчеты и графики выполнены с помощью MS Excel и Statistica.

**Выводы.** Результаты представлены графически, в виде двух- и трехмерных гистограмм, а также с помощью таблиц сопряженности. Анализ структуры аварийности с особо тяжкими последствиями позволил выделить две группы ДТП, различающихся между собой по количеству раненых и погибших. Определена роль анализируемых факторов в рамках аварий с особо тяжкими последствиями.

**Практическое значение.** Новые знания о влиянии выделенных факторов на частоту возникновения ДТП с особо тяжкими последствиями позволят ответственным службам более эффективно планировать мероприятия по предупреждению таких аварий, а также реагировать на них, предупреждая тем самым увеличение числа летальных исходов.

**Оригинальность.** В исследовании впервые определены и обоснованы две группы ДТП с особо тяжкими последствиями, выявлено, что ряд факторов оказывает различное влияние на распределение аварий этих групп. Также получены новые знания относительно факторов возникновения ДТП с особо тяжкими последствиями.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** безопасность дорожного движения (БДД), дорожно-транспортные происшествия (ДТП), ДТП с особо тяжкими последствиями, тяжесть аварий, факторы аварийности, чрезвычайные ситуации на транспорте, ДТП–ЧС, распределение ДТП во времени.

**БЛАГОДАРНОСТИ.** Авторы выражают благодарность редакции журнала «Вестник СибАДИ» и рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 23.02.2022; одобрена после рецензирования 04.04.2022; принята к публикации 12.04.2022.

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: Печатнова Е. В., Кузнецов В. Н. Факторы возникновения дорожно-транспортных происшествий с особо тяжкими последствиями // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 2(84). С. 224-235. https://doi.org/10.26518/2071-7296- 2022-19-2-224-235

© Печатнова Е. В., Кузнецов В. Н., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.



https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-224-235 https://elibrary.ru/OOKGPG Original article

# FACTORS CAUSING ROAD TRAFFIC ACCIDENTS WITH PARTICLARLY SERIOUS CONSEQUENCES

Elena V. Pechatnova<sup>1\*</sup>, Vasiliy N. Kuznetsov<sup>2</sup> <sup>1</sup> Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia <sup>2</sup> Altai State Agricultural University, Barnaul, Russia http://orcid.org/0000-0001-9182-2365, phukcia@yandex.ru http://orcid.org/0000-0002-4338-971X, kusnezow-vn@yandex.ru \*corresponding author

# ABSTRACT

**Introduction.** Reducing the number of road traffic fatalities and aiming for zero deaths by 2030 is a key road safety government goal. The prevention of especially serious road accidents is one of the elements of achieving this goal. Analysis of the main factors contributing to the especially serious road accidents occurrence is the basis of an effective system for their prevention. A review of the scientific literature reveals a lack of knowledge in this area.

**Materials and methods.** The study was performed on the basis of especially serious road accidents sample. The accidents that occurred in the regions of the Siberian Federal District in the period from 2017 to 2020 were analyzed. The following parameters were analyzed: the number of dead and injured, the type of accident, the period of the day, the day of the week, the month of the year, the weather conditions and the condition of roadway. The study is based on a multidimensional frequency distribution. The calculations and graphs were made using MS Excel and Statistica.

**Results.** The results are presented using 2D and 3D histograms and cross tables. An analysis of the especially serious road accidents structure made it possible to distinguish two groups of accidents that differ in the number of the injured and dead. The influence of the analysed factors contributing to the especially serious road accidents occurrence is determined.

**Practical importance.** Knowledge of the factors influence on the frequency of especially serious road accidents occurrence will allow public services to effectively plan measures to prevent such accidents and respond to them. This will reduce the number of road accidents deaths.

**Originality.** Two groups of road accidents with especially serious consequences are identified and substantiated. It was found that the factors have different effects on the distribution of accidents in these groups. The study contains new knowledge of the factors contributing to the especially serious road accidents occurrence.

**KEYWORDS:** road safety (RTS), road traffic accidents (RTA), especially serious road accidents, severity of accidents, accident factors, emergency situations in transport, emergency road accidents, distribution of road accidents in time.

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

The article was submitted 23.02.2022; approved after reviewing 04.04.2022; accepted for publication 12.04.2022.

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:* Pechatnova Elena V., Kuznetsov Vasiliy N. Factors causing road traffic accidents with particularly serious consequence. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2022; 19 (2): 224-235. https://doi.org/10.26518/2071-7296- 2022-19-2-224-235

© Pechatnova E. V., Kuznetsov V. N., 2022



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



# введение

Безопасность дорожного движения (БДД) является одним из приоритетов государственной политики на мировом уровне [1, 2, 3]. Резолюцией Генеральной ассамблеи ООН «Повышение безопасности дорожного движения во всем мире» <sup>1</sup> период с 2021 по 2030 г. определен как «второе десятилетие действий по обеспечению безопасности дорожного движения» и на это время поставлена цель по сокращению числа погибших и раненых в ДТП не менее чем на 50%. Задача является достаточно амбициозной и требует от правительств государств активных усилий по борьбе с дорожно-транспортной аварийностью [4].

Страны различным образом выполняют задачи по снижению уровня дорожно-транспортной аварийности [5]. В России основой для планирования действий по повышению БДД является Стратегия безопасности дорожного движения в России на 2018–2024 годы<sup>2</sup>. Долгосрочной национальной целью является «стремление к нулевой смертности в ДТП к 2030 г.», что соответствует мировым приоритетам. При этом показатели дорожно-транспортной аварийности в России продолжают оставаться высокими в сравнении с большинством стран Европейского региона ВОЗ, а тенденции их снижения не позволят достичь заявленных целей. Для существенного повышения уровня безопасности движения разработка и планирование мероприятий по предупреждению ДТП должны основываться на системном научном подходе, включающем в себя детальные исследования причин и приоритетных факторов дорожно-транспортной аварийности [6,7, 8, 9].

ДТП различаются по видам и степени тяжести последствий, и каждому типу аварии способствуют свои причины и факторы. Исследование и моделирование этих связей позволит в дальнейшем разработать эффективную систему предупреждения ДТП.

В соответствии с принципом Парето, который применительно к обеспечению безопасности дорожного движения можно сформулировать как «20% усилий по снижению дорожно-транспортной аварийности позволят снизить ее показатели на 80%», для достижения значительных результатов в краткие сроки необходимо уделить внимание наиболее проблемным зонам. Учитывая мировые и национальные цели по снижению числа погибших, необходимо исследовать причины аварий с высоким числом погибших – ДТП с особо тяжкими последствиями (ДТП с ОТП), к которым относятся «ДТП, в котором погибло 5 человек и более, пострадало 10 человек и более»<sup>3</sup>. Определение факторов и причин возникновения ДТП с тяжелыми последствиями позволит определить зоны повышенного риска, разработать систему предупреждения таких аварий и значительно снизить количество погибших [10].

Вопросу определения причин возникновения ДТП с ОТП и моделированию взаимосвязей их числа с различными факторами посвящены отдельные исследования российских и зарубежных авторов. В работе<sup>4</sup> проведен корреляционный анализ между числом ДТП с ОТП и различными внешними показателями в регионах, наиболее сильная связь выявлена с социально-транспортным риском, плотностью автомобильных дорог и природными условиями. Анализ ДТП с ОТП на федеральной автомобильной дороге М-8 представлен в статье [11].

Ряд зарубежных исследований посвящены анализу различных факторов возникновения ДТП с тяжелыми последствиями. Анализ пространственного распределения ДТП с учетом их тяжести в Нигерии представлен в [12]; определены географические зоны с вы-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Резолюция Генеральной ассамблеи ООН «Повышение безопасности дорожного движения во всем мире» А / 74 / L.86. [Электронный ресурс]. URL: https://www.un.org/pga/74/wp-content/uploads/sites/99/2020/08/Draft-Resolution-Road-Safety.pdf (дата обращения: 07.02.2022).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Распоряжение Правительства Российской Федерации от 8 января 2018 года № 1-р «Об утверждении Стратегии безопасности дорожного движения в Российской Федерации на 2018–2024 годы». [Электронный ресурс]. URL: https://www. garant.ru/products/ipo/prime/doc/71760528/ (дата обращения: 01.02.2022).

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> ОДМ 218.6.015-2015 Рекомендации по учету и анализу дорожно-транспортных происшествий на автомобильных дорогах Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200120721 (дата обращения: 08.02.2022).

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Капитанов В. Т., Сильянов В. В., Чубуков А. Б., Монина О. Ю. Модельная оценка числа погибших в ДТП с особо тяжкими последствиями // В сборнике: Совершенствование автотранспортных систем и сервисных технологий. Сборник научных трудов по материалам XIV Международной научно-технической конференции, посвященной 95-летнему юбилею доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РФ Авдонькина Фёдора Николаевича (1923–1996). 2018. С. 450–455.

сокой частотой возникновения ДТП с тяжелыми последствиями; сделаны предположения о предпосылках пространственной неравномерности распределения тяжких ДТП, среди которых низкая грамотность населения, ведущая к нарушению ПДД и авариям, а также неэффективная работа системы реагирования на ДТП скорой медицинской помощи в этих районах страны. Аналогичное пространственное распределение ДТП с учетом их тяжести представлено в [13]. В исследовании [14] сообщается, что качественное дорожное покрытие и освещение снижает вероятность ДТП с тяжелыми последствиями. Авторы работы [15] провели анализ факторов возникновения тяжелых и легких аварий; выявлено, что в случае серьезных ДТП значимыми являются среднесуточная интенсивность движения, интенсивность движения грузовых транспортных средств. Также подмечена следующая особенность: водители-женщины чаще попадают в тяжелые ДТП на сухом покрытии, а мужчины - на мокром. Некоторые другие исследования также посвящены анализу взаимосвязи характеристик водителей и тяжестью аварий, например [16, 17].

Исследования влияния погодных условий, времени суток, времени года представлены в разных работах. Оценена зависимость тяжести ДТП от погодных условий и времени суток в [18], выявлено, что тяжесть ДТП возрастает при хорошей погоде в темное время суток. Авторы работы [19] указывают на, что «чрезвычайно тяжелые ДТП» (более 10 погибших) происходят при неблагоприятных погодных условиях, так в туманную погоду процент таких аварий в восемь раз превышает процент более легких ДТП. Более углубленное изучение авторами аварий этого типа в статье [20] позволило дополнительно определить, что такие ДТП преимущественно регистрируются в выходные дни, а их наименьшее число - в среду и четверг. Также установлено, что наиболее распространены изучаемые ДТП в марте и апреле, а минимальное их число приходится на май и июнь. Наиболее критичным временем является промежуток с 14:00 до 07:00. Сообщается о влиянии дождливой погоды на вероятность возникновения тяжелых ДТП в [21]. В исследовании [22] указывается, что «чрезвычайно серьезные аварии» (в статье под ними понимается ДТП с двумя и более погибшими) более чем в половине случаев происходят в темное время суток. Влияние ночного времени суток на тяжесть аварии подтверждено также в работах [23, 24].

Несмотря на то, что в сфере анализа факторов возникновения ДТП с тяжелыми последствиями проведены отдельные исследования, все еще отмечается недостаток знаний в данной области. Кроме того, учеными получены различные выводы по некоторым аспектам, что может быть связано с тем, что в странах различно определятся термин «ДТП с особо тяжкими последствиями», а также с тем, что на тяжесть ДТП могут влиять региональные особенности дорожной транспортной системы. Поэтому необходимо детальное исследование факторов возникновения ДТП с ОТП в российских условиях, в частности на примере регионов СФО.

Целью работы является исследование факторов, сопутствующих ДТП с ОТП на примере регионов Сибирского федерального округа (СФО).

# МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

ДТП с ОТП можно отнести к редким событиям. Для получения корректных результатов объем выборки исходных данных должен быть достаточен. Большое количество исходных данных можно получить, анализируя ДТП с ОТП, произошедшими на территории всей страны, но в то же время обзор научной литературы показал, что действие факторов возникновения ДТП с ОТП может отличаться в разных территориальных зонах, поэтому анализ таких аварий по всем регионам может показать некорректные результаты. В связи с этим принято решение проанализировать ДТП с ОТП в регионах СФО: в пределах округа остаются относительно постоянными климатические и дорожные условия, что позволит получить обобшенные корректные результаты: в то же время объем выборки будет достаточным при условии анализа данных за несколько лет.

Получены сведения о ДТП с ОТП в период с 2017 по 2020 г. Объем выборки составил 93 ДТП. По каждой аварии собрана следующая информация: дата, время, место и вид ДТП, количество погибших и пострадавших, состояние погоды и проезжей части. На основании этого определены день недели и месяц для каждой аварии. На основании места, даты, времени ДТП и специализированного сервиса определены периоды суток в соответствии с их классическим астрономическим делением: ночь, астрономические, навигационные, гражданские сумерки, день. Эта необходимость вызвана тем, что предыдущие исследования [25] показали значительное влияние сумеречного времени на аварийность, а исходные сведения об освещении в момент ДТП не содержат такую информацию.

Набор анализируемых параметров включал в себя 8 элементов: количество погибших и пострадавших, вид ДТП, период суток, день недели, месяц года, состояние погоды и проезжей части. Первые три параметра – характеристика аварии, последние пять рассматривались как факторы, влияющие на возникновение ДТП с ОТП.

Анализ факторов основан на многомерном частотном распределении, при этом показатели факторов измерены в номинальной шкале, поэтому для визуального представления результатов в работе представлены таблицы сопряженности, а также двух- и трехмерные графики.

Для обработки данных расчета статистических показателей использовались программы MS Excel и Statistica.

# РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании количества погибших и раненых в каждой из анализируемых аварий определена структура аварийности ДТП с ОТП. На рисунке 1 представлена диаграмма частот (выбросы исключены), круговыми маркерами пропорционально отражено количество аварий с одинаковыми показателями погибших и раненых. Наиболее распространенным сочетанием является 10 раненых без погибших (8 ед. ДТП с ОТП) и 5 погибших без пострадавших (8 ед. ДТП с ОТП). Выделяется два класса ДТП с ОТП: красная рамка на рисунке 1 (группа 1) – с большим числом раненых (от 7 человек) и небольшим количеством погибших (до 4 человек) и зеленая рамка на рисунке 1 (группа 2) - с большим числом погибших (от 5 человек) и невысоким количеством раненых (до 5 человек). Аварии «красной рамки» могут быть свидетельством участия в ДТП пассажироперевозящего транспорта и характеризуются



Рисунок 1 – Количество погибших и раненых в ДТП с ОТП Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The number of deaths and injuries in especially serious road accidents Source: compiled by the authors.

### Таблица 1

Распределение ДТП с ОТП по видам и группам Источник: составлено авторами.

### Table 1

### Distribution of especially serious road accidents by types and groups Source: compiled by the authors.

		Распределение по группам, % от количества ДТП в группе			
		Группа 1 (число раненых ≥7, число погибших <4)	Группа 2 (число раненых ≤5, число погибших ≥5)		
Вид ДТП	Столкновение	72,9	100,0		
	Опрокидывание	14,6	0,0		
	Иные виды	12,5	0,0		

### Таблица 2

### Распределение ДТП с ОТП по периоду суток и группам Источник: составлено авторами.

### Table 2

#### Distribution of especially serious road accidents by time of day and groups Source: compiled by the authors.

		Распределение по группам, % от количества ДТП в группе			
		Группа 1 (число раненых ≥7, число погибших <4)	Группа 2 (число раненых ≤5, число погибших ≥5)		
Период	День	70,8	64,8		
суток	Гражданские сумерки	8,3	15,2		
	Навигационные сумерки	6,3	0		
	Астрономические сумерки	6,3	0		
	Ночь	8,3	20,0		

меньшей условной тяжестью последствий (отношение погибших к общему числу жертв ДТП), в то время как ДТП «зеленой рамки» могут быть следствием участия любого вида транспорта и отличаются более высокими показателями условной тяжести.

Анализ видов ДТП показал, что наиболее распространенным является столкновение (81%), также отмечаются опрокидывания (10%), остальные виды занимают менее 10%. Определена распространенность видов ДТП в каждой из двух выделенных выше групп, результаты представлены в таблице 1. Выявлено, что в группе 2 отмечаются только столкновения, т. е. большое число погибших характерно для этого вида ДТП.

В отношении времени суток определено, что 69% анализируемых ДТП с ОТП произошли в дневное время, что в целом не представляет собой отличительную черту, поскольку в среднем день занимает наибольшую часть суток по всем регионам СФО. Интересной характеристикой является достаточно высокая доля аварий, произошедших в гражданских сумерках – 10%. Сравнение распределения аварий по группам представлено в таблице 2. В группе 2 достаточно значительная часть аварий (в сумме 35,2%) приходится на ночь и гражданские сумерки.

Исследование дня недели как фактора возникновения ДТП с ОТП показало, что чаще всего аварии этого типа происходят в пятницу, что соответствует общим характеристикам аварийности и может быть связано с более высокой интенсивностью движения в такие дни. Минимальное число ДТП с ОТП фиксируется в понедельник. Более интересным выглядит распределение изучаемых аварий по группам, которое представлено на рисунке 2. В данном случае рассчитана доля аварий, произошедших в рассматриваемый день недели, по отношению к общему объему выборки, а не к количеству ДТП в группе, как это было сделано при анализе видов ДТП и периода суток. Это позволило оценить общую динамику изменения числа ДТП с ОТП в течение недели.





Рисунок 2 – Распределение ДТП по дням недели и группам Источник: составлено авторами.





Рисунок 3 – Распределение ДТП по месяцам и группам Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Distribution of especially serious road accidents by months and groups Source: compiled by the authors.

230

# Таблица 3

Распределение ДТП с ОТП по состоянию проезжей части и группам Источник: составлено авторами.

Table 3

Distribution of especially serious road accidents by the condition of the roadway and groups Source: compiled by the authors.

		Распределение по группам, % от количества ДТП в группе			
		Группа 1 (число раненых ≥7, число погибших <4)	Группа 2 (число раненых ≤5, число погибших ≥5)		
	Сухое	54	70		
Состояние проезжей части	Мокрое	15	5		
	Гололедица, обработанное противогололедными материалами, заснеженное, снежный накат	31	25		

Анализ графика позволяет определить, что понедельник, в сравнении с другими днями недели, отличается достаточно высокой долей ДТП с ОТП, принадлежащих второй группе, т. е. группе условно более тяжелых аварий. Среду можно отнести к наименее опасным дням: в течение этого дня недели регистрируется небольшое число ДТП с ОТП и при этом почти все из них относятся к первой группе.

Распределение ДТП с ОТП по месяцам года рассчитано аналогичным образом и представлено на рисунке 3.

Максимум по количеству ДТП с ОТП достигается в августе, что соответствует характеристикам общей аварийности. Отличительной особенностью является высокое число рассматриваемых аварий в холодное время года – в период с октября по февраль. Особенно опасным месяцем является январь: в течение этого месяца отмечается высокое число ДТП с ОТП (свыше 10% от суммарного годового числа ДТП с ОТП), и при этом почти половину занимают аварии второй группы.

Проанализировано состояние погоды, отмечались следующие показатели: ясно, пасмурно, снегопад, дождь, метель. Более 45% ДТП с ОТП произошло при ясной погоде, при пасмурной – 31%, снегопад – 13%, при остальных показателях – менее 10%. Между группами значимой разницы не обнаружено.

Среди показателей состояния проезжей части фиксировались следующие: сухое, мокрое, гололедица, обработанное противогололедными материалами, заснеженное и со снежным накатом. Более половины ДТП с ОТП (58%) зарегистрированы на сухой проезжей части, на обработанной противогололедными материалами – 14% от всех анализируемых аварий, при других показателях – менее 12%. Различия распределений в группах представлены в таблице 3. 70% аварий произошло на сухой проезжей части, т. е. большая часть аварий с условно более тяжелыми последствиями происходит при нормальном состоянии проезжей части.

Проанализировано двухвходовое распределение выбранных факторов. Новые знания получены при исследовании пары день недели – состояние погоды, распределение представлено на рисунке 4.



Рисунок 4 – Распределение ДТП с ОТП по дням недели и состоянию погоды Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Distribution of especially serious road accidents by days of the week and weather conditions Source: compiled by the authors.



Выявлено, что несмотря на то, что большая часть ДТП с ОТП регистрируется при ясной погоде, более свойственно это выходным дням (суббота и воскресенье). По всей видимости это вызвано пренебрежением опасности водителями при движении в ясную погоду на отдых. В это же время в выходные дни при пасмурной погоде или дожде практически не отмечаются ДТП с ОТП. Аварии при снегопаде распределены в течение недели достаточно равномерно.

Вывод о меньшем влиянии внешних условий в выходные дни подтверждается исследованием факторов день недели – состояние проезжей части, распределение представлено на рисунке 5.



Рисунок 5 – Распределение ДТП с ОТП по дням недели и состоянию проезжей части Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Distribution of especially serious road accidents by days of the week and condition of the roadway Source: compiled by the authors.

В воскресенье ДТП с ОТП происходили только на сухом покрытии. Большая часть анализируемых аварий, фиксировавшихся не на сухом покрытии (мокром, заснеженном, обработанном противогололедными материалами, гололедице), происходили в будние дни.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ ДТП с ОТП, зарегистрированных в регионах СФО в 2017–2020 гг. позволил разделить их на две группы – с повышенным числом пострадавших и с повышенным числом погибших. Также на основе проведенного исследования определены основные факторы возникновения таких аварий и особенностей сопутствующих условий. В частности, выявлено, что основным видом происшествия являются столкновения. Определено, что наиболее распространены ДТП с ОТП днем, при этом также опасным периодом суток являются сумерки. Наиболее часто происходят изучаемые аварии в пятницу, однако доля условно наиболее тяжелых аварий высока в понедельник. Август является месяцем, для которого характерно наибольшее количество ДТП с ОТП, однако при этом особого внимания заслуживает период с ноября по февраль, поскольку частота таких аварий также высока. Около половины ДТП с ОТП отмечаются при ясной погоде, и также около половины - на сухом покрытии. При это выявлено, что те ДТП с ОТП, которые произошли в выходные дни, в основном случились при ясной погоде или сухом покрытии; дождь, мокрое или заснеженное покрытие регистрируются в будние дни.

Результаты исследования могут быть использованы при планировании профилактических мероприятий, направленных на предупреждение ДТП с ОТП. Новые знания, полученные в рамках исследования, позволят более эффективно выстраивать систему предупреждения и реагирования на аварии, что позволит снижать количество погибших в ДТП и приближаться к поставленной государственной цели.

В связи с тем, что обнаружены взаимосвязи между ДТП с ОТП и условиями внешней среды, перспективно продолжать исследования в сфере определения функциональных зависимостей элементов внешней среды, их сочетаний на вероятность возникновения ДТП с ОТП. Другим перспективным направлением исследований является углубление знаний в области влияния различных факторов на возникновение ДТП с ОТП в рамках каждой из выделенных групп.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сафронов Э. А., Сафронов К. Э. Особенности реализации проекта безопасности дорожного движения до 2024 года в Омской области // Вестник СибАДИ. 2021. Т. 18, № 1 (77). С. 96–104. https://doi. org/ 10.26518/2071-7296-2021-18-1-96-104.

2. Ваньков А. В. Актуальные вопросы обеспечения безопасности дорожного движения // Право и государство: теория и практика. 2020. № 9 (189). С. 264–265.

3. Гатиятуллин М. Х., Волкова Р. Ю. Мировой опыт в обеспечении безопасности движения на российских дорогах // Техника и технология транспорта. 2018. № 1 (6). 8 с. 4. Ricardo Pérez-Núñez, Elisa Hidalgo-Solórzano, Martha Híjar Impact of Mexican Road Safety Strategies implemented in the context of the UN's Decade of Action // Accident Analysis & Prevention. 2021. V. 159. 106227 https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106227.

5. Zanne M., Groznik A. The impact of traffic flow structure on traffic safety: the case of Slovenian motor-ways. Transport. 2018. 33(1). pp. 216-222. https://doi. org/10.3846/16484142.2016.1153519.

6. Печатнова Е. В., Сафронов К. Э. Оценка влияния количества осадков на аварийность на дорогах вне населенных пунктов // Вестник СибАДИ. 2020. Т. 17. № 4 (74). С. 512–522.

7. Pugachev I., Kuliko Y., Markelov G., Sheshera N. Factor Analysis of Traffic Organization and Safety Systems // Transportation Research Procedia. 2017. 20. pp. 529–535. https://doi.org/10.1016/j.tr-pro.2017.01.086.

8. Pechatnova E., Kuznetsov V., Pavlov S. Road accident risk modeling based on the machine learning // Safety in Aviation and Space Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2022. pp. 335-343. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9\_29

9. Simul M. G. and Porkhacheva S. M. Road safety strategies in the Russian Federation for 2018–2024 in Omsk Region // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. 786. 012050.

10. Afghari A. P., Haque M. M., Washington S. Applying a joint model of crash count and crash severity to identify road segments with high risk of fatal and serious injury crashes // Accident Analysis & Prevention. 2020. 144. 105615. https://doi.org/10.1016/j. aap.2020.105615.

11. Баранов А. В., Барачевский Ю. Е. Анализ дорожно-транспортных происшествий с особо тяжкими последствиями на федеральной автомобильной дороге М-8 «Холмогоры» // Вестник Совета молодых учёных и специалистов Челябинской области. 2016. Т. 3, № 4 (15). С. 38–40.

12. Ayodeji E. Iyanda Geographic analysis of road accident severity index in Nigeria // International Journal of Injury Control and Safety Promotion. 2018. pp.1– 10. https://doi.org/10.1080/17457300.2018.1476387.

13. Amin Azimian, V. Dimitra Pyrialakou, Steven Lavrenz, Sijin Wen Exploring the effects of area-level factors on traffic crash frequency by severity using multivariate space-time models // Analytic Methods in Accident Research. 2021. Vol. 31. 100163. https://doi.org/10.1016/j.amar.2021.100163.

14 Yolania Sari, Muhammad Halley Yudhistira Bad light, bad road, or bad luck? The associations of road lighting and road surface quality on road crash severities in Indonesia // Case Studies on Transport Policy. 2021. Vol. 9, Issue 3. pp. 1407-1417 https://doi. org/10.1016/j.cstp.2021.07.014.

15. Kassu A., Anderson, M. Analysis of severe and non-severe traffic crashes on wet and dry highways // Transportation Research Interdisciplinary Perspectives. 2019. 2. 100043. https://doi.org/10.1016/j. trip.2019.100043. 16. Razi-Ardakani, H., Mahmoudzadeh, A., Kermanshah, M. What factors results in having a severe crash? a closer look on distraction-related factors // Cogent Engineering. 2019. 6 (1). 1708652. https://doi.org /10.1080/23311916.2019.1708652.

17. Xintong Yan, Jie He, Changjian Zhang, Ziyang Liu, Chenwei Wang, Boshuai Qiao Temporal analysis of crash severities involving male and female drivers: A random parameters approach with heterogeneity in means and variances // Analytic Methods in Accident Research. 2021. Vol. 30. 100161 https://doi.org/10.1016/j.amar.2021.100161.

18. George, Y., Athanasios, T., George, P. Investigation of road accident severity per vehicle type // Transportation Research Procedia. 2017. 25. pp. 2076– 2083. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.401.

19. Xu, C., Wang, C., Ding, Y., Wang, W. Investigation of extremely severe traffic crashes using fault tree analysis // Transportation Letters. 2018. pp. 1–8. https://doi.org/10.1080/19427867.2018.1540146.

20. Xu, C., Bao, J., Wang, C., Liu, P. Association rule analysis of factors contributing to extraordinarily severe traffic crashes in China // Journal of Safety Research. 2018. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2018.09.013.

21. Quan Yuan, Yibing Li, Kang Chen Characteristics of significant factors in severe traffic accidents and countermeasures for safety // Chinese Journal of Forensic Sciences. 2015. No 5. Total No 82. pp. 34–40 https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-2072.2015.05.006.

22. Das, S., Dutta, A. Extremely serious crashes on urban roadway networks: Patterns and trends // IATSS Research. 2020. 44(3). pp. 248–252. https://doi.org/ 10.1016/j.iatssr.2020.01.003.

23. Hong Chen, Yang Zhao, Xiaotong Ma Critical Factors Analysis of Severe Traffic Accidents Based on Bayesian Network in China // Journal of Advanced Transportation. 2020, pp.1 – 14. https://doi.org/10.1155/2020/8878265.

24. Wu H., Malipeddi, S. Influential factors for severe traffic crashes // Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety. 2011. pp. 71–75. https://doi.org/10.1109/ icves.2011.5983749

25. Печатнова Е. В. Влияние времени суток на дорожно-транспортную аварийность // Мир транспорта. 2016. Т. 14, № 2 (63). С. 194–200.

### REFERENCES

1. Safronov E.A., Safronov K.E. Features of road safety project implementation until 2024 in Omsk region. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2021;18(1):96-104. (In Russ.) https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-96-104

2. Van'kov A.V. Aktual'nye voprosy obespechenija bezopasnosti dorozhnogo dvizhenija. *Pravo i gosudarstvo: teorija i praktika*. 2020; 9 (189): 264-265. (in Russ.)

3. Gatijatullin M.H., Volkova R.Ju. Mirovoj opyt v obespechenii bezopasnosti dvizhenija na rossijskih dorogah [World experience in ensuring traffic safety on Russian roads]. *Tehnika i tehnologija transporta*. 2018; 1 (6); 8. (in Russ.) 4. Ricardo Pérez-Núñez, Elisa Hidalgo-Solórzano, Martha Híjar Impact of Mexican Road Safety Strategies implemented in the context of the UN's Decade of Action. *Accident Analysis & Prevention*. 2021. V. 159, 106227 https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106227.

5. Zanne M., Groznik, A. The impact of traffic flow structure on traffic safety: the case of Slovenian motorways. *Transport*. 2018; 33 (1): 216-222. https://doi.org/ 10.3846/16484142.2016.1153519.

6. Pechatnova E.V., Safronov K.E. Precipitation influence assessment on accidents risk outside built-up areas. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2020;17(4):512-522. (In Russ.) https://doi. org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-512-522

7. Pugachev I., Kulikov Y., Markelov G., Sheshera N. Factor Analysis of Traffic Organization and Safety Systems. *Transportation Research Procedia*. 2017. 20. pp. 529–535. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.01.086.

8. Pechatnova E., Kuznetsov V., Pavlov S. Road accident risk modeling based on the machine learning. Safety in Aviation and Space Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2022. pp. 335-343. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9 29

9. Simul M. G., Porkhacheva S. M. Road safety strategies in the Russian Federation for 2018–2024 in Omsk Region. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020. 786. 012050.

10. Afghari A. P., Haque M. M., Washington S. Applying a joint model of crash count and crash severity to identify road segments with high risk of fatal and serious injury crashes. *Accident Analysis & Prevention*. 2020. 144, 105615. https://doi.org/10.1016/j. aap.2020.105615.

11. Baranov A. V., Barachevskij Ju. E. Analiz dorozhno-transportnyh proisshestvij s osobo tjazhkimi posledstvijami na federal'noj avtomobil'noj doroge M-8 «Holmogory». *Vestnik Soveta molodyh uchjonyh i specialistov Cheljabinskoj oblasti*. 2016; 3. No 4 (15): 38-40.

12. Ayodeji E. Iyanda Geographic analysis of road accident severity index in Nigeria. *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*. 2018: 1–10. https://doi.org/10.1080/17457300.2018.1476387.

13. Amin Azimian V. Dimitra Pyrialakou, Steven Lavrenz, Sijin Wen Exploring the effects of area-level factors on traffic crash frequency by severity using multivariate space-time models. *Analytic Methods in Accident Research*. 2021; 31. 100163. https://doi.org/10.1016/j.amar.2021.100163.

14 Yolania Sari, Muhammad Halley Yudhistira Bad light, bad road, or bad luck? The associations of road lighting and road surface quality on road crash severities in Indonesia. *Case Studies on Transport Policy.* 2021; Vol. 9, Issue 3: 1407-1417 https://doi. org/10.1016/j.cstp.2021.07.014.

15. Kassu A., Anderson M. Analysis of severe and non-severe traffic crashes on wet and dry highways. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2019. 2. 100043. https://doi.org/10.1016/j. trip.2019.100043.

16. Razi-Ardakani H., Mahmoudzadeh A., Kermanshah M. What factors results in having a severe crash? a closer look on distraction-related factors. *Cogent Engineering*. 2019; 6 (1). 1708652. https://doi.org/10.108 0/23311916.2019.1708652.

17. Xintong Yan, Jie He, Changjian Zhang, Ziyang Liu, Chenwei Wang, Boshuai Qiao Temporal analysis of crash severities involving male and female drivers: A random parameters approach with heterogeneity in means and variances. *Analytic Methods in Accident Research*. 2021; Vol. 30. 100161 https://doi.org/10.1016/j.amar.2021.100161.

18. George Y., Athanasios T., George P. Investigation of road accident severity per vehicle type. *Transportation Research Procedia*. 2017; 25: 2076–2083. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.401.

19. Xu C., Wang C., Ding Y., Wang W. Investigation of extremely severe traffic crashes using fault tree analysis. *Transportation Letters*. 2018. pp. 1–8. https:// doi.org/10.1080/19427867.2018.1540146.

20. Xu C., Bao J., Wang C., Liu P. Association rule analysis of factors contributing to extraordinarily severe traffic crashes in China. *Journal of Safety Research*. 2018. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2018.09.013.

21. Quan Yuan, Yibing Li, Kang Chen Characteristics of significant factors in severe traffic accidents and countermeasures for safety. *Chinese Journal of Forensic Sciences*. 2015; 5 (82): 34–40 https://doi. org/10.3969/j.issn.1671-2072.2015.05.006.

22. Das S., Dutta A. Extremely serious crashes on urban roadway networks: Patterns and trends. *IATSS Research*. 2020. 44 (3). pp. 248–252. https://doi.org/ 10.1016/j.iatssr.2020.01.003.

23. Hong Chen, Yang Zhao, Xiaotong Ma Critical Factors Analysis of Severe Traffic Accidents Based on Bayesian Network in China. *Journal of Advanced Transportation*. 2020: 1–14. https://doi. org/10.1155/2020/8878265.

24. Wu H., Malipeddi, S. Influential factors for severe traffic crashes. *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*. 2011. pp. 71–75. https://doi.org/10.1109/icves.2011.5983749

25. Pechatnova E.V. Vlijanie vremeni sutok na dorozhno-transportnuju avarijnosť [Influence of the time of day on road traffic accident rate]. *World of transport and transportation.* 2016; Vol. 14. Iss. 2: 194–200.

# ВКЛАД СОАВТОРОВ

Печатнова Е. В. Вклад в общую работу составил 75%, что является ¾ доли при разработке следующих разделов научной статьи: аннотации, введения, материалов и методов, результатов, обсуждения и заключения.

Кузнецов В. Н. Вклад в общую работу составил 25%, что является 1/4 доли при разработке следующих разделов научной статьи: аннотации, введения, результатов, обсуждения и заключения.

# **CO-AUTHORS' CONTRIBUTION**

Elena V. Pechatnova. The contribution to the general work made 75% that is <sup>3</sup>/<sub>4</sub> shares when developing the following sections of the scientific article: summaries, introductions, materials and methods, results, discussion and conclusion.

PART II

Vasiliy N. Kuznetsov. The contribution to the general work amounted to 25%, which is 1/4 of the share in the development of the following sections of the scientific article: annotation, introduction, results, discussion and conclusion.

# ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Печатнова Елена Владимировна – ассистент кафедры «Организация и безопасность движения».

Кузнецов Василий Николаевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Сельскохозяйственная техника и технологии».

# INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Elena V. Pechatnova – Assistant of the Organization and Road Safety Department.

Vasiliy N. Kuznetsov – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Agricultural Machinery and Technology Department.



УДК 656.025.4 https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-236-245 https://elibrary.ru/OPSKEE Научная статья



# ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗКИ СВЕРХНОРМАТИВНЫХ ГРУЗОВ АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ

О. Ю. Смирнова<sup>\*</sup>, Ю. А. Эртман Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия Уральский государственный университет путей сообщения, филиал в г. Тюмени, г. Тюмень, Россия smirnovaoy@tyuiu.ru, http://orcid.org/0000-0001-8951-6449, JuliaByn@mail.ru, http://orcid.org/0000-0003-0442-4807 \*ответственный автор

# аннотация

Веедение. Планирование маршрута перевозки крупногабаритного и тяжеловесного груза на автомобильном транспорте необходимо выполнять с учетом обеспечения безопасности дорожного движения и сохранности искусственных инженерных сооружений (мостовые сооружения, железнодорожные переезды, путепроводы и др.), контроль этих процедур осуществляется в России посредством действия разрешительной системы. В ходе перевозки водитель должен выполнять перевозку такого груза по согласованному маршруту, указанному в специальном документе (разрешение), который должен находиться на борту транспортного средства. Затруднения чаще всего возникают при организации первой перевозки, в тех случаях, когда маршрут проходит вне постоянного места дислокации автотранспортных средств, когда улично-дорожная сеть и схемы движения по объездным дорогам мало знакомы водителю, а существующие навигационные системы не имеют в своей базе официальных названий автомобильных дорог согласно государственному реестру. Авторы считают, что применение цифровых технологий должно существенно облегчить выполнение перевозки сверхнормативных грузов без нарушений.

**Материалы и методы.** В ходе исследования построена модель организации перевозочного процесса сверхнормативного груза с использованием нотации BPMN. На основании собственного опыта авторами были определены ключевые точки контроля и построена карта рисков.

**Результаты.** Разработана информационная модель формирования и передачи перевозчику разрешения на перевозку сверхнормативного груза по согласованному маршруту. В разрешении в одно из полей QR Code вставляется ссылка на картографический ресурс. Такой подход дает возможность наглядно и однозначно идентифицировать согласованный маршрут.

**Оригинальность и практическое значение.** Оригинальность информационной модели заключается в использовании QR Code для передачи согласованного маршрута движения не в виде перечисления транзитных населенных пунктов, а в виде картографического ресурса. Практическая реализация такого решения направлена на помощь перевозчику (водителю) в неукоснительном соблюдении требований к перевозке сверхнормативного груза по согласованному маршруту.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** грузовой автомобильный транспорт, крупногабаритные и тяжеловесные грузы, цифровые технологии.

Статья поступила в редакцию 02.12.2021; одобрена после рецензирования 09.03.2022; принята к публикации 12.04.2022.

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: Смирнова О. Ю., Эртман Ю. А. Цифровые технологии при организации перевозки сверхнормативных грузов автомобильным транспортом // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 2(84). С. 236-245. https://doi.org/10.26518/2071-7296- 2022-19-2-236-245

© Смирнова О. Ю., Эртман Ю. А., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.



https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-236-245 https://elibrary.ru/OPSKEE Original article

# DIGITAL TECHNOLOGIES FOR OVERSIZE GOODS ROAD TRANSPORTATION

Olga Y. Smirnova \*, Yuliya A. Ertman

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia smirnovaoy@tyuiu.ru, http://orcid.org/0000-0001-8951-6449, JuliaByn@mail.ru, http://orcid.org/0000-0003-0442-4807 \*corresponding author

# ABSTRACT

**Introduction.** The scheduling a transportation route of overweight and oversize goods by road is necessary to perform taken into account road traffic safety and security of artificial engineering structures (bridges, railway crossing and others). The monitoring and control of these procedures are performed by a licensing system in Russia. During the delivery a driver must carry out the transportation of such cargo within the approved route that is specified in a particular paper (authorization) located in the vehicle. Issues appear mostly during first shipment organization and when the route is outside the permanent vehicles location, when road network and bypass schemes are not familiar for the driver and the current GPS-systems bases do not include formal designations of roads according to state register. The authors suppose digital technologies implementation has to facilitate easier abnormal load shipments violations-free sufficiently.

**The Materials and methods.** A transportation organisation model of abnormal loads by BPMN notation has been developed. The key control points have been determined by the authors on the base of their own experience. **The results.** An information model of forming and transmitting to the carrier authorization to transport abnormal load within the approved route has been developed. In the authorization the link to the cartographic resource is inserted in one of the QR-code field. Such approach makes possible to identify approved route clearly and unambiguously. **Uniqueness and practical meaning.** The information model uniqueness consists of the transmission way of approves route to the customer – not the sequence of transit localities, but the cartographic resource. The practical implementation of such decision is addressed to help a carrier (a driver) to perform the abnormal load transportation strictly within the approved route.

KEYWORDS: freight road transport, oversize and overweight vehicles, digital technologies.

The article was submitted 02.02.2021; approved after reviewing 09.03.2022; accepted for publication 12.04.2022.

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:* Olga Y. Smirnova, Yulia A. Ertman Digital technologies for oversize and heavy cargo road transportation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2022; 19 (2): 236-245. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-20-2-236-245

© Smirnova O. Y., Ertman Y. A., 2022



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

### введение

В нефтегазовой и строительной отрасли и при перевозке сельскохозяйственной техники часто возникает вопрос о транспортировке груза, масса и габариты которого существенно превышают допустимые значения, установленные для провоза по автомобильным дорогам. Технология перевозки крупногабаритного и тяжеловесного груза характеризуется длительным временем получения разрешения на движение по определенному маршруту движения [1, 2, 3] и высокой стоимостью перевозки [4, 5, 6, 7, 8]. В некоторых источниках такие грузы называют сверхнормативными [9] (Abnormal Loads [10, 11]). На практике можно выделить три варианта организации перевозки сверхнормативных грузов:

- когда грузоотправитель и перевозчик (один из них или оба) по незнанию законодательных требований или в надежде, что удастся выполнить перевозку груза без государственного контроля, выполняют перевозку на свой страх и риск, подвергаются административному наказанию вплоть до запрета на движение;

 когда перевозчик принял груз к перевозке, не имея информации о временном ограничении по общей массе автопоезда и нагрузки на ось (ограничения такого рода имеют право принимать владельцы и уполномоченные органы);

 когда оба участника договора перевозки принимают решение по оформлению спецразрешения.

Аудиторы Счетной палаты России в 2019 г. рассчитали, что наибольший вред тяжеловесный транспорт наносит именно автомобильным дорогам с нормативной нагрузкой на ось 6 т. При этом размер вреда достигает 8500 руб. на 100 км. Учитывая, что грузовой транспорт ежегодно наносит ущерб дорогам, государство решает эту проблему многовариантно: работает система весогабаритного контроля, утверждены самые высокие штрафы за превышение допустимых значений, производится взимание платы за проезд тяжеловесного транспорта. Так Ространснадзор за восемь месяцев 2020 г. наложил более 15 тыс. штрафов на общую сумму в 739 млн руб. за превышение веса грузовыми автомобилями во внутрироссийских перевозках. За 2019 г. в ходе весового контроля выявлено 85 тыс. нарушений и вынесено около 40 тыс. постановлений о штрафах на общую сумму в 1,5 млрд руб.<sup>1</sup> Государственные органы вправе затягивать сроки оформления специальных разрешений, в результате большая часть перевозок сверхнормативных грузов осуществляется с нарушением правил и требований [12].

Планирование маршрута перевозки сверхнормативных грузов на автомобильном транспорте необходимо выполнять с учетом обеспечения безопасности дорожного движения и сохранности искусственных инженерных сооружений (мостовые сооружения, железнодорожные переезды, путепроводы и др.). Контроль за выполнением этих процедур осуществляется в России посредством действия разрешительной системы. Выдача специального разрешения осуществляется в компетентных органах в зависимости от того, в чьём ведении находятся участки автомобильных дорог по маршруту следования (федеральные, региональные, муниципальные). Согласование маршрута можно осуществить путем применения единой системы межведомственного электронного взаимодействия с использованием электронно-цифровой подписи. Заявленный маршрут при необходимости корректируется, согласовывается со всеми владельцами автомобильных дорог, по дорогам которых проходит данный маршрут, балансодержателями искусственных сооружений (туннели, линии электропередач, надземные пешеходные переходы), отделениями железных дорог при наличии на маршруте железнодорожного переезда.

В результате перевозчик получает на руки на бумажном носителе специальное разрешение, в котором подробно указан согласованный маршрут перевозки, с официальными названиями автомобильных дорог по участкам и их идентификационными номерами. Формулировка такого маршрута порой занимает полстраницы самого документа. Для выполнения перевозки перевозчик должен знать офици-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Отчет о результатах контрольного мероприятия «Проверка правильности исчисления, полноты и своевременности уплаты, начисления, учета, взыскания и принятия решений о возврате (зачете) излишне уплаченных (взысканных) платежей в счет возмещения вреда, причиняемого транспортными средствами, осуществляющими перевозки тяжеловесных и (или) крупногабаритных грузов по автомобильным дорогам общего пользования федерального значения, а также взыскания уполномоченными органами денежных штрафов при осуществлении весогабаритного контроля в 2017–2018 годах и за 9 месяцев 2019 года. Официальный сайт Счетной палаты РФ https://ach.gov.ru/ " [Электронный ресурс]. Available at: https://ach.gov.ru/upload/iblock/c95/c9512c1a8e3fabf14b8beed86d0b3ea8.pdf.

альные наименования и идентификационные номера автомобильных дорог, однако такой информации в открытом доступе нет.

Сложность трассирования маршрута возникает в том случае, когда маршрут проходит вне постоянного места дислокации и выполнения перевозок автотранспортных средств, когда улично-дорожная сеть и схемы движения по объездным дорогам мало знакомы водителю, а общеизвестные мобильные приложения выстраивают кратчайший маршрут и предлагают несколько вариантов. К тому же в разных интернет-ресурсах Российской Федерации наименования автомобильных дорог, особенно при транзите крупных городов, указаны по-разному.

Несовершенство процедуры трассирования маршрута перевозки крупногабаритных и тяжеловесных грузов приводит к многочисленным нарушениям существующих требований в части движения по согласованному маршруту и при наличии разрешения. Использование цифровых технологий может существенно упростить организацию и выполнение перевозки крупногабаритных и тяжеловесных грузов, что позволяет сделать вывод об актуальности исследования.

# ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕВОЗКИ СВЕРХНОРМАТИВНОГО ГРУЗА АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Согласно Правилам дорожного движения, на территории России негабаритным считается транспортное средство (автопоезд) с грузом, габариты которого не соответствуют следующим значениям: длина свыше 20 м; ширина более 2,55 (2,6) м; высота выше 4 м над уровнем полотна дороги. Транспортное средство с грузом признается тяжеловесным в случае превышения нормативных значений по общей массе автопоезде и нагрузке на ось в зависимости от технических характеристик (количество осей, расстояние между осями, категории автомобильных дорог), максимально – 44 т с 1 января 2021 г. [13]. При этом допускаются отклонения в 2 % от допустимых значений, и в этом случае не требуется оформлять спецразрешение.

При перевозке сверхнормативного груза требуется выполнить ряд процедур и, кроме согласования заявки на перевозку, необходимо подобрать транспортное средство, проконтролировать его техническое состояние, оснастить дополнительным оборудованием и опознавательными знаками, в некоторых случаях проработать план организации дорожного движения, получить спецразрешение, выполнить погрузку, непосредственно транспортировать груз при необходимости в сопровождении автомобилями прикрытия/ патрульными машинами, осуществить выгрузку. Отдельно существуют требования к обозначению транспортного средства и автомобилей прикрытия (опознавательные знаки, дополнительные желтые или оранжевые фонари, в том числе мигающие). Дополнительно с 2016 г. действует обязательное требование по оснащению транспортных средств, используемых для перевозки крупногабаритным и тяжеловесным грузом аппаратурой спутниковой навигации. Следовательно, весь процесс организации и выполнения перевозки сверхнормативного груза можно условно разделить на подпроцессы: согласование заявки на перевозку, получение специального разрешения, выпуск подвижного состава на линию, погрузка, движение с грузом, выгрузка.

При перевозке груза из пункта А в пункт Б возможно спланировать несколько вариантов маршрута перевозки. Однако при перевозке крупногабаритного и/или тяжеловесного груза необходимо знать и учитывать такую информацию, как состояние дорожного полотна, насколько большой уклон и радиус поворотов, какова ширина дороги, есть ли мосты, железнодорожные насыпи, переезды, линии электропередач, надземные пешеходные переходы, мосты и другие искусственные технические сооружения. Такая информация находится в ведении владельцев дорог. Процесс усложняется при транзите крупных городов. Подъезды к ним, многоуровневые развязки и некоторые участки могут находиться в ведении разных владельцев (федерального, регионального или межмуниципального значения, муниципального уровня), которые имеют право вводить временные ограничения на эксплуатацию дороги при неблагоприятных природно-климатических условиях, например, в период летней жары, весенней распутицы и/или гололеда. Дополнительно необходимо учитывать интенсивность движения и уровень аварийности, объезды и сужения автодороги в период планового и срочного ремонта (разрушение моста в период половодья, крупные аварии), вследствие чего самый короткий маршрут движения не всегда может быть самым безопасным. При превышении определенных значений по ширине транспортного
средства с грузом необходимо разработать проект организации дорожного движения и обеспечить наличие автомобилей прикрытия (легковых автомобилей сопровождения) на всем маршруте движения или его участке.

Отдельно стоит вопрос об актуализации информации, особенно если маршрут протяженностью 1000 км и более выходит за рамки одного субъекта РФ. Во время перевозки сверхнормативного груза водителю запрещается отклоняться от согласованного маршрута движения. Если же маршрут необходимо изменить, то придется снова получать специальное разрешение. Информация об уполномоченных организациях по приему, рассмотрению заявок и выдаче специальных разрешений размещается Федеральным дорожным агентством РФ на официальном сайте Росавтодора РФ. Заявку на получение специального разрешения подает владелец транспортного средства или заказчик либо по месту регистрации заявителя, либо в ближайшую уполномоченную организацию, расположенную на маршруте следования транспортного средства [14].

Бланки специальных разрешений относятся к защищенной полиграфической продукции. На обратной стороне спецразрешения наносится QR Code, в котором зашифрован номер разрешения и регистрационные номера транспортного средства. Все нарушения согласованного маршрута и установленного порядка фиксируются посредством государственного контроля (система пунктов весового и габаритного контроля) на автомобильных дорогах. Размер административных штрафов на перевозчика определяется в соответствии с размерами перегруза и варьируется от 1000 руб. до 500 000 руб.

Грузовой автомобиль (автопоезд) при перевозке сверхнормативного груза представляет существенную угрозу для всех участников движения [15, 16]:

- движение такого транспортного средства нестабильно, так как в большинстве случаев центр тяжести груза не совпадает с центром тяжести автопоезда;

 превышение нагрузки на ось может привести к её внезапной технической неисправности (отказу);

- тормозной путь более длинный, что может привести к аварии;

- превышение допустимого веса ведёт к разрушению дорожного полотна и других искусственных сооружений [17].

Мировая практика грузовых перевозок ориентирована на обязательное страхование водителя, груза, транспортного средства. Но стоимость страхового покрытия существенно увеличивает грузовой фрахт и не снимает ответственности с перевозчика. В советские годы существовала практика составления технологических карт любого производственного процесса. Современные цифровые технологии в части моделирования позволяют построить модель организации перевозочного процесса. Авторы выбрали нотацию BPMN для моделирования в системе Bizagi Modeler, так как на диаграмме наглядно видно, какие процессы планирования и организации и в какой последовательности должны происходить, какая информация поступает на каком этапе (рисунок 1).



Рисунок 1 – Модель организации перевозки крупногабаритного груза в нотации ВРМN Источник: составлено авторами.

> Figure 1 – Model of large-size transportation organisation load in BPMN notation Source: compiled by authors.

#### Таблица

Карта рисков, возникающих в процессе перевозки сверхнормативного груза Источник: составлено авторами.

Table

#### Map of risks arising during oversize goods transportation Source: compiled by the authors.

Риски	Факторы риска
Подпроцесс «Согласование заявки на перевозку груза»	
<ul> <li>Риск нарушения договорных обязательств о сохранности груза и соблюдения согласованных сроков выполнения перевозки;</li> <li>риск получения административных штрафных санкций за несоблюдение нормативно-законодательных требований</li> </ul>	Получение недостоверной или неполной информации о грузе, заявленном к перевозке, и/или отсутствие документов на груз, разрешения на движение по согласованному маршруту. Отсутствие анализа маршрута, его проработки
Подпроцесс «Движение с грузом»	
<ul> <li>Риск несохранности груза (порча, утрата);</li> <li>риск несоблюдения согласованных и/или нормативных сроков доставки;</li> <li>риск несоблюдения других дополнительно согласованных условий перевозки;</li> <li>риск ДТП (риск увечий и гибели водителя, третьих лиц, повреждения и ущерба АТС без возможности восстановления);</li> <li>риск получения административных штрафных санкций за несоблюдение нормативно-законодательных требований</li> </ul>	Нарушение Правил дорожного движения. Техническая неисправность транспортного средства, крепежного оборудования. Отсутствие сопроводительных документов на груз. Нарушение режима труда и отдыха водителя. Резкое изменение дорожных и погодно-климатических условий. Форс-мажорные обстоятельства

Анализ моделей организации перевозки крупногабаритного и тяжеловесного груза в нотации BPMN позволяет выделить ключевые точки контроля и построить карту рисков. Фрагмент карты рисков в отдельных подпроцессах указан в таблице.

Процесс организации перевозки в ходе исследования был разделен на подпроцессы и по каждому разработаны чек-листы для контроля.

# ОПЫТ И ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Первым шагом при использовании цифровых технологий для грузовых перевозок было использование геоинформационных систем [18, 19]. Какой-либо единой платформы, сервиса не существует, на рынке много предложений, и зачастую при использовании возникает много ошибок (с помощью навигаторов можно заехать в тупик, в глушь, где даже развернуться длинномерному транспортному средству будет проблематично). Контроль с помощью систем ГЛОНАСС в большинстве случаев использовался для таможенных органов при транзите через страну. Протестированы и локально работают навигационные пломбы – специальные электронные устройства, которые могут не просто сообщать данные о местонахождении груза, но и выполнять еще множество полезных функций.<sup>2</sup> Среди экспертов сейчас идет дискуссия о том, кому должны принадлежать данные мониторинга: автовладельцу, владельцу автомобильных дорог, надзорным органам, и пока этот вопрос однозначно не решен. По своей сути этот вопрос близок к обработке персональных данных. Несмотря на то, что применение цифровых технологий на грузовых перевозках направлено на осуществление функций контрольно-фискальных органов, пока их внедрение сталкивается с административно-правовыми барьерами. Ситуация осложняется и тем, что связь нестабильна на автодорогах, особенно в отдаленных районах, на временных зимних автодорогах северных районов Тюменской области в РФ.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Филиппова Н. А. Организация надежной и безопасной перевозки негабаритного груза с применением информационных технологий // Материалы 6-й Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте», 20 мая 2020 года, г. Орел. С. 45–52.



Рисунок 2 – Информационная модель формирования и передачи перевозчику согласованного маршрута перевозки сверхнормативного груза

Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Information model of formation and transfer to the carrier of the agreed route of transportation of oversize goods Source: compiled by authors.

Отдельно стоит вопрос по специальной цифровой маркировке груза в рамках проекта Единой национальной системы цифровой маркировки, разработанной Центром развития перспективных технологий. Каждой партии груза присваивается уникальный код (Data Matrix или маркировка другого типа), который производитель размещает на упаковке товара. Предполагается, что к 2024 г. система охватит большинство отраслей промышленности [20]. В сфере грузовых перевозок вопрос актуален в случае перевозки уникального оборудования, стоимость которого от 10 млн рублей и более, во избежание мошенничества и кражи. Авторское предложение заключается в помощи перевозчику (водителю) по прокладке согласованного маршрута движения, что позволит избежать возможных отклонений и, как следствие, больших административных штрафов при перевозке сверхнормативного груза.

# РАЗРАБОТКА ПРОЦЕДУРЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ СОГЛАСОВАННОГО МАРШРУТА ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ СВЕРХНОРМАТИВНОГО ГРУЗА АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Моделирование организации перевозки сверхнормативного груза позволило найти новое применение цифровым технологиям: прокладка согласованного маршрута в геоинформационной системе (на карте интернет-ресурса, например Яндекс. Карты) и дальнейшим переводом ссылки в дополнение информации, которая уже сейчас имеется в QR Code спецразрешения. По итогам работы создана модель согласования маршрута движения сверхнормативного транспортного средства с учетом технологических операций по согласованию и существующих ограничений маршрутной сети, которая представляет собой интегрированную информационную среду, объединяющую все необходимые информационные ресурсы уполномоченных органов (рисунок 2).

Основным ядром модели является хранилище данных, которое включает информацию следующего вида:

• база согласованных маршрутов движения;

• реестры автомобильных дорог;

• карта автомобильных дорог и улично-дорожной сети городов;

• база моделей и марок транспортных средств с указанием полных технических характеристик.

Преимущество такого хранилища заключается в его постоянном обновлении для оперативного слежения за всеми изменениями в части состояния автомобильных дорог.

# выводы

Сформулированы основные риски при перевозке сверхнормативного груза. Разработана информационная модель формирования и передачи перевозчику разрешения на перевозку сверхнормативного груза по согласованному маршруту. В разрешении в одно из полей QR Code вставляется ссылка на картографический ресурс. Данный подход дает возможность наглядно и однозначно идентифицировать согласованный маршрут. Практическая реализация такого решения направлена на помощь перевозчику (водителю) для неукоснительного соблюдения требований выполнения перевозки сверхнормативного груза по согласованному маршруту. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку дополнительного контура контроля за движением транспортного средства.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bazaras D, Batarliene N, Palsaitis R, Petraska A. Optimal Road Route Selection Criteria System for Oversize Goods Transportation // Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. 2013. Volume 8. Issue 1. P. 19-24. DOI: 10.3846/bjrbe.2013.03.

2. Coelho L. C., Renaud J., Laporte G. Road-based goods transportation: a survey of real-world logistics applications from 2000 to 2015 // Information System and Operational Research. 2016. Volume 54, Issue 2. P. 79-96. DOI: 10.1080/03155986.2016.1167357.

3. Бабаев Р. М. Анализ практических достижений и научных исследований по организации транспортировки крупногабаритных и тяжеловесных грузов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2019. № 4 (48). С. 82–90.

4. Macioszek Elżbieta Oversize cargo transport in road transport – problems and issues // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 108(108):133-140. September 2020. DOI: 10.20858/sjsutst.2020.108.12.

5. Semenov louri, Kaup Magdalena. Risk management of oversize cargo transport // WUT Journal of Transportation Engineering 129:63-71. June 2020. DOI: 10.5604/01.3001.0014.3142.

6. Macioszek Elżbieta. Conditions of Oversize Cargo Transport // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport 102:109-117. March 2019. DOI: 10.20858/sjsutst.2019.102.9.

7. Курбанова А. Р. Проблемы совершенствования системы транспортировки крупногабаритных тяжеловесных грузов автомобильным транспортом // Экономика и социум. 2018. № 6 (49). С. 638–648.

8. Мишулин Г. М., Мартиросов А. А., Недугов А. И. Услуга по перевозке автотранспортом тяжеловесных и крупногабаритных грузов и ее госрегулирование: проблемы, противоречия и пути их разрешения // Экономика и предпринимательство. 2017. № 8–2 (85). С. 631–637.

9. Смирнова О. Ю. Вопросы идентификации грузов при перевозке автомобильным транспортом // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2020. № 2. С. 125–133.

10. Wierzbicka Aleksandra, Kmiecik Mariusz, Kmiecik Mariusz. Abnormal load transport in the context of urban logistics. January 2020 DOI: 10.29119/1641-3466.2020.146.35. URL: https://www.researchgate. net/publication/346634302\_Abnormal\_load\_transport\_ in\_the\_context\_of\_urban\_logistics (дата обращения: 30.11.2021).

11. Semenov L, Kaup M. Risk management of oversize cargo transport // WUT Journal of Transportation Engineering. 2020. No. 129. P 63-71. DOI: 10.5604/01.3001.0014.3142.

12. Будрина Е. В. Внедрение инновационных технологий в сфере перевозок крупногабаритных и тяжеловесных грузов // Мир транспорта и технологических машин. 2020. № 3(70). С. 39–45.

13. Грачев К. Д. Особенности автомобильных перевозок крупногабаритных грузов // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2017. № 5. С. 52–55.

14. Агапов М. М., Хазова В. И. Организация перевозок тяжеловесных и крупногабаритных грузов на автомобильных дорогах общего пользования регионального и межмуниципального значения // Транспортное дело России. 2019. № 1. С. 122–124.

15. Дороше А. С., Демченкор Б., Маркульт В., Бердичевська М. Analysis of Risks of International Road Cargo Transportation // Transport Systems and Transportation Technologies. November 2020. DOI: 10.15802/tstt2020/217388.

16. Муравьёва Н. А., Кудрявцев А. Н. Проблемы безопасности перевозок крупногабаритных тяжеловесных грузов автомобильным транспортом // Научная мысль. 2017. № 2. С. 43–47.

17. Красникова Д. А., Феклин Е. В., Коба Е. А. Нарушение дорожного полотна при перевозках крупногабаритного и тяжеловесного груза // Научно-методический электронный журнал Концепт. 2017. № Т39. С. 1821–1825.

18. Будрина Е. В., Борисова О. С. Внедрение инновационных технологий в сфере перевозок крупногабаритных и тяжеловесных грузов // Мир транспорта и технологических машин. 2020. № 3 (70). С. 39–45.

19. Сяоянь Чжу Альберто Гарсия-Диас Минчжоу Цзинь Ин Чжан. Vehicle fuel consumption minimization in routing over-dimensioned and overweight trucks in capacitated transportation networks // Journal of Cleaner Production. Volume 85, 15 December 2014, Pages 331-336. https://doi. org/10.1016/j.jclepro.2013.10.036

20. Дмитриев А. В. Цифровые технологии прослеживаемости грузов в транспортно-логистических системах // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2019. Т. 10. № 1. С. 20–26.

#### REFERENCES

1. Darius Bazaras, Nijole Batarliene, Ramunas Palsaitis, Arturas Petraska. Optimal Road Route Selection Criteria System for Oversize Goods Transportation. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2013. Volume 8. Issue 1. P. 19-24. DOI: 10.3846/bjrbe.2013.03.

2. Leandro C. Coelho, Jacques Renaud, Gilbert Laporte. Road-based goods transportation: a survey of real-world logistics applications from 2000 to 2015. *Information System and Operational Research*. 2016. Volume 54, Issue 2. pp. 79-96. DOI: 10.1080/03155986.2016.1167357.

3. Babaev R. M. Analiz prakticheskih dostizhenij i nauchnyh issledovanij po organizacii transportirovki krupnogabaritnyh i tyazhelovesnyh gruzov [Analysis of practical achievements and research on the organization of transportation of large and heavy cargoes]. *Politekhnicheskij vestnik. Seriya: Inzhenernye issledovaniya.* 2019; 4 (48): 82-90. (in Russ.)

4. Elżbieta Macioszek. Oversize cargo transport in road transport – problems and issues. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport.* 108(108):133-140. September 2020. DOI: 10.20858/sjsutst.2020.108.12.

5. Iouri Semenov, Magdalena Kaup. Risk management of oversize cargo transport. *WUT Journal of Transportation Engineering* 129:63-71. June 2020. DOI: 10.5604/01.3001.0014.3142.

6. Elżbieta Macioszek. Conditions of oversize cargo transport. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport 102:109-117*. March 2019. DOI: 10.20858/sjsutst.2019.102.9.

7. Kurbanova A. R. Problemy sovershenstvovaniya sistemy transportirovki krupnogabaritnyh tyazhelovesnyh gruzov avtomobil'nym transportom. *Ekonomika i socium*. 2018; 6 (49): 638-648. (in Russ.)

8. Mishulin G. M., Martirosov A. A., Nedugov A. I. Usluga po perevozke avtotransportom tyazhelovesnyh i krupnogabaritnyh gruzov i ee gosregulirovanie: problemy, protivorechiya i puti ih razresheniya [Service on transportation of heavy and large cargoes by road and its state regulation: problems, contradictions and ways of their resolution]. *Ekonomika i predprinimatel'stvo*. 2017; 8-2 (85): 631-637. (in Russ.)

9. Smirnova O. Yu. Issues of cargo identification during transportation by road [Identification of goods in road transport]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii.* 2020; Vol. 2: 125–133. (in Russ.)

10. Aleksandra Wierzbicka Mariusz Kmiecik Mariusz Kmiecik. Abnormal load transport in the context of urban logistics January 2020 DOI: 10.29119/1641-3466.2020.146.35. URL: https://www.researchgate.net/publication/346634302\_Abnormal\_load\_transport\_in\_the\_context\_of\_urban\_logistics (the date of application: 30.11.2021).

11. louri Semenov, Magdalena Kaup. Risk management of oversize cargo transport // WUT Journal of Transportation Engineering. 2020;129: 63-71. DOI: 10.5604/01.3001.0014.3142.

12. Boudrina E. V. Borisova O. S Introduction of innovative technologies in the field of transportation of oversized and heavy cargo. *World of transport and technological machines*. 2020; Vol. 3(70): 39-45. (in Russ.)

13. Grachev K. D. Osobennosti avtomobil'nyh perevozok krupnogabaritnyh gruzov [Features of road transportation of large cargo]. *Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnyh i estestvennyh nauk*. 2017; 5: 52-55. (in Russ.)

14. Agapov M. M., Hazova V. I. Organizaciya perevozok tyazhelovesnyh i krupnogabaritnyh gruzov na avtomobil'nyh dorogah obshchego pol'zovaniya regional'nogo i mezhmunicipal'nogo znacheniya [Organization of transportation of heavy and large cargoes on public roads of regional and inter-municipal importance]. *Transportnoe delo Rossii*. 2019; 1: 122-124. (in Russ.)

15. Dorosh A. S., Demchenkor B., Markult V., Berdichevska M. Analysis of Risks of International Road Cargo Transportation. *Transport Systems and Transportation Technologies*. November 2020. DOI: 10.15802/tstt2020/217388.

16. Murav'yova N. A., Kudryavcev A. N. Problemy bezopasnosti perevozok krupnogabaritnyh tyazhelovesnyh gruzov avtomobil'nym transportom [Problems of safety of transportation of heavy cargoes by road]. *Nauchnaya mysl'*. 2017; 2: 43-47. (in Russ.)

17. Krasnikova D. A., Feklin E. V., Koba E. A. Narushenie dorozhnogo polotna pri perevozkah krupnogabaritnogo i tyazhelovesnogo gruza [Violation of the roadway during transportation of large and heavy cargo]. *Nauchno-metodicheskij elektronnyj zhurnal Koncept*. 2017; 39:1821-1825. (in Russ.)

18. Budrina E. V., Borisova O. S. Vnedrenie innovacionnyh tekhnologij v sfere perevozok krupnogabaritnyh i tyazhelovesnyh gruzov [Introduction of innovative technologies in the field of transportation of large and heavy cargoes]. *Mir transporta i tekhnologicheskih mashin.* 2020; 3 (70): 39-45. (in Russ.)

19. Xiaoyan Zhu, Alberto Garcia-Diaz, Mingzhou Jin, Ying Zhang. Vehicle fuel consumption minimization in routing over-dimensioned and overweight trucks in capacitated transportation networks. *Journal of Cleaner Production*. 2014; Volume 85: 331-336, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.036.

20. Alexander V. Dmitriev Digital Technologies of Transportation and Logistics Systems. *Visibility St. Petersburg State Economic University*. 2019;10 No.1: 20-26. (in Russ.) DOI: 10.17747/2618-947X-2019-1-20-26.

# ВКЛАД СОАВТОРОВ

Смирнова О. Ю. Разработка информационной модели формирования и передачи перевозчику согласованного маршрута перевозки сверхнормативного груза.

Эртман Ю. А. Изучение ранее выполненных работ, разработка модели организации перевозки крупногабаритного груза в нотации ВРМИ.

# **COAUTHORS' CONTRIBUTION**

Olga Y. Smirnova. Development of an information model for making and handing over the agreed oversize goods route to the carrier.

Yuliya A. Ertman. Study of previous work, development of a model for organising oversize goods transportation in BPMN notation.

# ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Смирнова Ольга Юрьевна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры автомобильного транспорта строительных и дорожных машин. Эртман Юлия Александровна – канд. техн. наук, доц.

# **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Olga Y. Smirnova – Cand. of Sci., Associate Professor of the Road Transport of Construction and Road Vehicles Department

Yuliya A. Ertman – Cand. of Sci., Associate Professor.



УДК 656.13 https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-246-257 https://elibrary.ru/THZBSX Научная статья



# ОПТИМИЗАЦИЯ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МАКРОСКОПИЧЕСКОЙ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ДИАГРАММЫ В ГОРОДСКОЙ ДВУХЗОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

Х. Цзянг

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия jiang.live.in.rus@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2509-6745

# АННОТАЦИЯ

**Введение.** В статье рассматривается возможность формирования стратегии оптимизации дорожного движения на основе макроскопической фундаментальной диаграммы между городскими районами. Построены зоны притяжения при максимальном и минимальном значении пограничного контроля по категории разных типов зоны притяжения. Сформированы стабильные зоны посредством соединения зон притяжения и проанализированы изменения их формы с разными значениями экзогенного потока и эндогенного потока.

**Материалы и методы.** Приведены данные транспортного потока центральной части улично-дорожной сети г. Цзинань (КНР), и построена городская двухзональная система полученными макроскопическими фундаментальными диаграммами. Осуществлено моделирование состояния транспортных потоков, получена закономерность их изменения при разных параметрах пограничного контроля с использованием математически-моделирующего комплекса МАТLAB.

**Результаты.** В результате исследования получены решения для управления дорожным движением для относительного параметра завершенных и незавершенных поездок. Предложены обобщенные варианты для оптимизации дорожного движения в рассматриваемых городских зонах – выполняется 4 сочетания стратегии для управления дорожным движением, обслуживающего проектный вариант оптимизации с различными состояниями транспортного потока.

**Обсуждение и заключение.** Для каждой многозональной системы дорожной сети необходимо сформировать собственный характеристический вариант оптимизации транспортного потока.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *моделирование, оптимизация дорожного движения, макроскопическая фундаментальная диаграмма, стабильная зона, городская двухзональная система.* 

Статья поступила в редакцию 22.02.2022; одобрена после рецензирования 28.03.2022; принята к публикации 12.04.2022.

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: Цзянг Х. Оптимизация дорожного движения на основе макроскопической фундаментальной диаграммы в городской двухзональной системе // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 2(84). С. 246-257. https://doi.org/10.26518/2071-7296- 2022-19-2-246-257

© Цзянг Х., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

246

https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-246-257 https://elibrary.ru/THZBSX Original article

# TRAFFIC OPTIMIZATION BASED ON A MACROSCOPIC FUNDAMENTAL DIAGRAM IN URBAN BIZONAL SYSTEM

Jiang Haiyan

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia jiang.live.in.rus@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2509-6745

# ABSTRACT

**Introduction.** The article considers the possibility of forming a traffic optimization strategy based on a macroscopic fundamental diagram between urban areas. The zones of influence are constructed with the maximum and minimum values of border control, respectively, according to the category of different types of the zone of influence. The stability zones were formed by connecting the zones of influence and their shape changes with different values of exogenous flow and endogenous flow were analysed.

**Materials and methods.** The data on the traffic flow of the central part of the Jinan (PRC) road network are presented and an urban bizonal system is constructed using the obtained macroscopic fundamental diagrams. The modelling of the state of traffic flows was carried out and the regularity of their changes at different parameters of border control was obtained using the mathematical modelling MATLAB complex.

**Results.** As a result of the study, the traffic management solutions were obtained for the relatively parameter of completed and incomplete trips. The generalized options for optimizing traffic in the considered urban areas are proposed – four combinations of strategies for traffic management are performed serving the design optimization option with different traffic flow conditions.

**Discussion and conclusions.** For each multi-zone system of the road network, it is necessary to form its own characteristic variant of optimizing the traffic flow.

**KEYWORDS:** modeling, traffic optimization, macroscopic fundamental diagram, stable zone, urban two-zone system.

The article was submitted 22.02.2022; approved after reviewing 28.03.2022; accepted for publication 12.04.2022.

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:* Jiang Haiyan Traffic optimization based on a macroscopic fundamental diagram in urban bizonal system *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2022; 19 (2): 246-257. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-246-257

© Jiang Haiyan, 2022



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

### введение

В настоящее время возрастание транспортной нагрузки, усложнение задач организации дорожного движения, ужесточение требований к точности прогнозов об изменении накопления автомобилей вызывают обновления сетевой макромодели и развитие транспортной инфраструктуры. В процессе управления дорожным движением макроскопическая фундаментальная диаграмма, имеющая низкую восприимчивость для динамических матриц корреспонденций, постоянно применяется основным инструментом для оценки состояния транспортных потоков на улично-дорожной сети города и проектирования транспортной системы [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

В течение последнего десятилетия сформировались многие направления теории управления дорожным движением, интегрирующей адаптивный пограничный контроль с полученными макроскопическими фундаментальными диаграммами на неравномерном сетевом уровне. Для оптимизации дорожного движения между городскими районами предпринимались попытки построения стратегии управления транспортными потоками с использованием макроскопической фундаментальной диаграммы [10, 11, 12, 13, 14].

Особое внимание обращается на следующие работы о развитии исследования пограничного контроля на основе макроскопической фундаментальной диаграммы. В исследовании Л. Чжана была применена сетевая диаграмма для оценки уровней обслуживания транспортных структур с использованием модели клеточного автомата [15]. В работе Д. Хаддада было предложено макроскопическое моделирование и метод управления на основе данных диаграмм для комплексной сети, содержащей городскую и скоростную магистраль [16]. Для оптимизации транспортных потоков в его дальнейшей работе также была отработана новая модель макроскопической фундаментальной диаграммы с учетом совокупной динамики граничной очереди между двумя городскими районами [17]. Для исследования перераспределения транспортных заторов в реальном времени А. Кувеласом была приведена нелинейная модель между несколькими городскими районами с целью построения адаптивного варианта управления дорожным движением в гетерогенной сети [18]. На основании неопределенности параметров моделей были даны адаптивные варианты пограничных контролей для решения оптимизации дорожного движения в многозональной системе, имеющей собственные макроскопические фундаментальные диаграммы транспортного потока [19].

Несмотря на то, что появляются такие новые модели на основе сетевой диаграммы и обновляются данные о свойствах существующих моделей, имеется большой потенциал к интенсификации эффективности передвижения в конкретной обстановке улично-дорожной сети города.

#### МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Оптимизация дорожного движения с учетом особенностей двух или нескольких городских районов является типичной темой при динамическом управлении транспортными потоками. Для исследования этой темы в дальнейшей работе приведена конкретная обстановка центральной части улично-дорожной сети г. Цзинань (КНР) с полученными данными и макроскопическими фундаментальными диаграммами<sup>12</sup>. Для сформирования стратегии управления дорожным движением на основе макроскопической фундаментальной диаграммы использовалась следующая улично-дорожная сеть города, разделенная на две зоны - протяженность дорог первой зоны составляет 16,11 км, второй - 10,34 км (рисунок 1).

Построение двухзональной системы на основе макроскопической фундаментальной диаграммы является фундаментом исследования для оценки состояния транспортного потока между двумя районами.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Зырянов В. В., Цзянг Х. Применение макроскопической фундаментальной диаграммы транспортного потока с использованием данных системы видеонаблюдения на улично-дорожной сети г. Цзинань КНР // Десятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021): труды конференции, Санкт-Петербург: Изд-во АО «ЦТСС». 2021. С. 574-580. http://simulation.su/uploads/files/default/2021-immod-574-580.pdf.



<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Зырянов В. В., Цзянг Х., Анализ сетевой макромодели на примере улично-дорожной сети г. Цзинань (КНР) // Прогрессивные технологии в транспортных системах: сборник конференции, г. Оренбург, Оренбургский государственный университет. 2019. С. 556-651. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42340974&pff=1.



Рисунок 1 — Фрагмент улично-дорожной сети центральной части г. Цзинань (КНР) для исследования оптимизации дорожного движения в двухзональной системе с эндогенными и экзогенными потоками Источник: составлено авторам.

Figure 1 – A fragment of the road network of the central part of Jinan (China) for the study of traffic optimization in a bizonal system with endogenous and exogenous flows Source: compiled by the author.

В данной работе теория оптимизации дорожного движения, предложенная Д. Хаддадом и Н. Геролнимисом, приведена для анализа состояния транспортного потока в определённом времени мониторинга в двухзональной системе.

Прежде всего, динамика системы С. Даганза в параметрах макроскопической фундаментальной диаграммы транспортного потока описывается в предположении, что при изменении уровня насыщения автомобилями определенной зоны изменяются и другие характеристики транспортного потока:

$$\frac{dn(t)}{dt} = f(t) - O(n(t)), \qquad (1)$$

где n – количество автомобилей, находящихся в рассматриваемой зоне; f – входящий поток в зону; 0 – выходящий поток в зону; t – время поездки.

Для обеспечения максимальной эффективности центрального района целевая функция оптимизации дорожного движения проектируется и описывается по следующей формуле [11]:

$$J = \max \int_0^{t_r} G_2(n_2(t)) dt.$$
 (2)

При непременном условии формулы (1) в определённом времени мониторинга (с времени начала поездки 0 до времени конца поездки *t<sub>f</sub>*) дифференциальные уравнения динамики системы о изменении накопления макроскопической фундаментальной диаграммы транспортного потока описываются следующими уравнениями:

$$\frac{dn_{1}(t)}{dt} = q_{1} - G_{1}(n_{1}(t)) \cdot u(t), \qquad (3)$$

$$\frac{dn_{2}(t)}{dt} = q_{2} + G_{1}(n_{1}(t)) \cdot u(t) - G_{2}(n_{2}(t)). \quad (4)$$

Для удобства исследования оптимизации дорожного движения предел управляемой пороговой величины пограничного контроля определился между цифрой 0 и 1, то есть максимальное значение пограничного контроля не превышает цифру 1, минимальное значение пограничного контроля не ниже цифры 0.

$$0 < u_{\min} \le u(t) \le u_{\max} < 1, \tag{5}$$

где *J* – целевая функция теории оптимизации дорожного движения;  $n_i$  – количество автомобилей, находящихся в районе *i* (*i*=1,2), авт;  $G_i$ – входящий / выходящий транспортный поток района *i* (*i*=1,2), авт/ч;  $q_i$  – эндогенный / экзогенный транспортный поток района *i* (*i*=1,2), авт/ч;  $t_f$  – время движения в конце мониторинга; u – пограничный контроль для входящего потока между двумя районами.



Рисунок 2 – Состояние транспортных потоков и соответственные зоны притяжения при разных параметрах для управления дорожным движением: а – при и = 0,35 и 0,6; б – при и = 0,65 и 0,8 Источник: составлено авторам.

Figure 2 – The state of traffic flows and the corresponding zones of influence at different parameters for traffic control Source: compiled by the authors.

Динамика системы при обработке входящего и выходящего потока в рассматриваемой зоне отображается кривой зависимости между накоплением автомобилей обоих районов, стремящейся к стабильной точке равновесия в определённом временном отрезке (с времени начала поездки 0 до времени конца поездки *t<sub>f</sub>*), и может быть стабильной траекторией в двухзональной системе.

Зона притяжения обоих районов формируется совокупностью всех стабильных траекторий с использованием существующих данных в двухзональной системе. Вследствие собственной характеристики улично-дорожной сети (её структуры и метода управления дорожным движением) состояние транспортного потока для этих стабильных траекторий приближается к сбалансированному положению между входящими и выходящими потоками, которые находятся в зоне притяжения. Наоборот, под динамикой системы при обработке входящего и выходящего потока в рассматриваемой зоне кривая зависимости между накоплениями автомобилей обоих районов, избегающая от любой точки равновесия, является нестабильной траекторией в двухзональной системе. Совокупностью всех нестабильных траекторий сформировывается непритягательная зона обоих районов в двухзональной системе.

## Построение стабильных зон и их характеристика при изменениях параметров эндогенного и экзогенного потока

Стратегия оптимизации транспортного потока должна постоянно применяться с переменными методами управления дорожным движением, чередующими разные параметры пограничного контроля для различных транспортных условий в рассматриваемых районах.



а



б

Рисунок 3 – Стабильные зоны при разных параметрах для управления дорожным движением в определённом времени мониторинга (с 0 до tf): а – при и = 0,35 и 0,6; б – и = 0,65 и 0,8 Источник: составлено авторам.

Figure 3 – Stability zones with different parameters for traffic control at a certain monitoring time (from 0 to tf):  $a - at \ u = 0.35 \ and \ 0.6; \ b - u = 0.65 \ and \ 0.8$ Source: compiled by the authors.

Эти вопросы вызывают необходимость определения района, включая все зоны притяжения для решения оптимизации дорожного движения при переменных параметрах пограничного контроля. Построение стабильных зон является практическим методом с учётом всех зон притяжения и нескольких кривых притяжения для зависимости изменения накопления в обоих районах.

Для построения стабильных зон сначала осуществлялись моделирования состояния транспортных потоков и их зон притяжения при максимальном и минимальном значении пограничного контроля по категориям разных типов зон притяжения с использованием математически-моделирующего комплекса MATLAB (рисунок 2).

Таким образом, стабильная зона типа А сформировалась верхней граничной линией зоны притяжения при пограничных контролях *u* = 0,6, правой граничной линией притягательной зоны при пограничных контролях u = 0,35, линией с обратным расчётом зоны притяжения при пограничных контролях u = 0.35. По закономерности изменения стабильная зона типа Б полностью сформировалась граничной линией зоны притяжения при пограничных контролях и = 0,65. Стабильные зоны разных типов приведены на рисунке 3. До сих пор построенные стабильные зоны показывали динамический интервал измененных пограничных контролей, который обрабатывается отдельно при разных стратегиях управления дорожным движением.



Рисунок 4 – Изменения стабильных зон типа А для управления дорожным движением с разными значениями экзогенного потока q1 и эндогенного потока q2: а – при q1 =0,03, 0,04, 0,05; б – при q2 =0,04, 0,05, 0,06 Источник: составлено автором.

Figure 4 – Changes in stability zones of A type for traffic control with different values of q1 exogenous flow and q2 endogenous flow Source: compiled by the authors.

Из всех полученных формул и математических моделирований состояния транспортных потоков изменение параметров эндогенного и эндогенного потока является одним из самых важных элементов влияния управления дорожным движением. Для всестороннего исследования стабильной зоны под влиянием экзогенного потока q1 и эндогенного потока q2 сформировались математические модели с разными измененными значениями транспортных потоков (рисунки 4, 5). В той или иной мере разные внешние и внутренние транспортные потоки приводят к изменению стабильной и нестабильной зоны.

Большие изменения стабильной зоны типа А происходят при увеличении экзогенного потока *q1*, который принесёт к выдавлению пространственного распространения эндогенного потока *q2*, и приводит к уменьшению стабильной зоны. Увеличение эндогенного потока *q2* только вызывает изменения правой граничной линии стабильной зоны, следовательно приведет к уменьшению стабильной зоны типа А.

Аналогичная закономерность изменения стабильной зоны типа Б и В показывается при увеличении экзогенного потока *q1* и приводит к уменьшению стабильной зоны. Однако имеется большая амплитуда изменения граничной линии стабильной зоны перед параметром накопления в 1000 автомобилей района 2, которая затем стремится к стабильному и определённому изменению.





Figure 5 – Changes in stability zones of B and C types for traffic control with different values of q1 exogenous flow and q2 endogenous flow: a - at q1 = 0.03, 0.04, 0.05; b - at q2 = 0.04, 0.05, 0.06Source: compiled by the authors.

В отличие от ситуации изменения стабильной зоны типа A (б) увеличение эндогенного потока *q2* приводит к изменению цельной граничной линии стабильной зоны типа Б и В ввиду того, что применяется строгая стратегия ограничения дорожного движения на границах обоих районов рассматриваемой улично-дорожной сети.

Нужно подчеркнуть, что вышеуказанные изменения стабильных зон могут появляться в любом моменте времени мониторинга дорожного движения. Поэтому в дальнейшей работе конкретные стратегии оптимизации дорожного движения определяются в этих динамических стабильных зонах.

# КОНКРЕТНАЯ СТРАТЕГИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

Возможность получения информации о завершенных поездках в определённом времени мониторинга является важной характеристикой определения для проектирования оптимизации дорожного движения. В процессе изменения кривых зависимостей накопления обоих районов координаты накопления начального и законченного состояния прогнозируются в двухзональной системе на основе макроскопической основной диаграммы транспортного потока. Однако для тех, что только достигают незаконченное состояние автомобилей в определённом времени мониторинга, алгоритм оптимизации дорожного движения изменяется в том случае, что способствует конкретной ситуации.

Для решения относительно параметра завершенных поездок применяется вышеупомянутая теория максимума для оптимизации дорожного движения на уравнение целевой функции для управления транспортными потоками. В дальнейшем превращение дифференциальные уравнения (3) и (4) интегрируются следующим образом:

$$n_{1,f} + n_{2,f} = \int_0^{t_r} \left( q_1(t) + q_2(t) \right) dt - \int_0^{t_r} G_2(n_2(t)) dt + n_{1,0} + n_{2,0} \right) dt$$
(6)

Оптимальная стратегия управления получена для решения завершивших поездок с подстановкой уравнения (2):

$$J = \max\left(-n_{1,f} - n_{2,f} + \int_0^{t_f} (q_1(t) + q_2(t)) dt + n_{1,0} + n_{2,0}\right).$$
(7)

Для решения относительного параметра незавершенных поездок применяется принцип максимума Понтрягина (Pontryagin maximum principle – PMP). Применение принципа максимума Понтрягина следующего вида:

$$H = \frac{K_{nc,1}}{n_{nc,1}} \cdot n_1(t) \cdot u(t) \cdot \left(p_1(t) - p_2(t)\right) + p_1(t) \cdot q_1 + p_2(t) \cdot \left(q_2 - \frac{K_{nc,2}}{n_{nc,2}} \cdot n_2(t)\right) + \frac{K_{nc,2}}{n_{nc,2}} \cdot n_2(t), \quad (8)$$



Рисунок 6 – Проектный вариант оптимизации транспортного потока для рассматриваемого района с многообразными стратегиями управления дорожным движением: а – при и = 0,35–0,6; б – при и = 0,65–0,8 Источник: составлено автором.

> Figure 6 – Design variant of traffic flow optimization for the considered area with diverse traffic management strategies: a - at u = 0.35-0.6; b - at u = 0.65-0.8 Source: compiled by the authors.

254

PART II

где H – значение Гамильтониана для решения оптимизации дорожного движения;  $p_1(t)$  и  $p_2(t)$  – переменные стоимости при выполнения следующих условий:

$$\frac{dp_1}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial n_1} = \frac{K_{nc,1}}{n_{nc,1}} \cdot u(t) \cdot \left(p_1(t) - p_2(t)\right); \quad (9)$$

$$\frac{dp_2}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial n_2} = \frac{K_{nc,2}}{n_{nc,2}} \cdot \left(p_2\left(t\right) - 1\right). \tag{10}$$

Следовательно, оптимальная стратегия управления получена для решения незаконченного состояния при переменной стоимости

$$u(t) = \begin{cases} u_{\max}, p_2(t) - p_1(t) > 0\\ u_{\min}, p_2(t) - p_1(t) < 0 \end{cases}$$
(11)

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в рассматриваемой двухзональной системе выполняется 4 сочетания стратегии для управления дорожным движением, обслуживающего проектный вариант оптимизации с различными состояниями транспортного потока:

1 — оптимальная стратегия управления для решения относительно параметра завершенных поездок при максимальном контроле  $u_{max}$ ;

2 – оптимальная стратегия управления для решения относительно параметра завершенных поездок при минимальном контроле  $u_{min}$ ;

3 – оптимальная стратегия управления для решения относительно параметра незавершенных поездок при максимальном контроле  $u_{max}$ ;

4 – оптимальная стратегия управления для решения относительно параметра незавершенных поездок при минимальном контроле  $u_{\min}$ .

Распространение сочетаний стратегии управления дорожным движением приведена на рисунке 6.

Проектный вариант оптимизации транспортного потока отдельно относится к двум случаям, применяющимся в конкретной ситуации дорожного движения, соответственно со значениями контроля u = 0,35-0,6 и u = 0,65-0,8. Нужно подчеркнуть, что выполняется 4 сочетания стратегии управления дорожным движением при u = 0,35-0,6, однако только 3 сочетания при u = 0,65-0,8. Поэтому для каждой многозональной системы дорожной сети необходимо сформировать собственный характеристический вариант оптимизации транспортного потока.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зырянов В. В. Особенности применения основной диаграммы транспортного потока на сетевом уровне // Известия волгоградского государственного технического университета. Серия: наземные транспортные системы. Волгоградский государственный технический университет. 2013. С. 71-74. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20901102.

2. Daganzo C. F. Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches. // Transportation Research Part B: Methodological. 2007. vol. 41(1). pp. 49 – 62. DOI: 10.1016/j.trb.2006.03.001.

3. Daganzo C. F., Geroliminis N. An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic // Transportation Research Part B: Methodological. 2008. vol. 42(9). pp. 771 – 781. DOI: 10.1016/j.trb.2008.06.008.

4. Geroliminis N., Sun J. Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic // Transportation Research Part B: Methodological. 2011. vol. 45(3). pp. 605– 617. DOI: 10.1016/j. trb.2010.11.004.

5. Haddad J., Ramezani M., Geroliminis N. Cooperative traffic control of a mixed network with two urban regions and a freeway // Transportation Research Part B: Methodological. 2013. vol. 54. pp. 17– 36. DOI: 10.1016/j.trb.2013.03.007.

6. Ji Y., Geroliminis N. Spatial and temporal analysis of congestion in urban transportation networks // In: Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC. 2011. http://www.strc.ch/2010/Ji.pdf.

7. Loder A., Bliemer M., Axhausen K. Optimal pricing and investment in a multi-modal city — Introducing a macroscopic network design problem based on the MFD // Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2022. vol. 156. pp. 113 – 132. DOI: 10.1016/j. tra.2021.11.026.

8. Paipuri M., Xu Y., Gnozalez M., Leclercq L. Estimating MFDs, trip lengths and path flow distributions in a multi-region setting using mobile phone data // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2020. vol. 118. DOI: 10.1016/j.trc.2020.102709.

9. Zyryanov V. V. Simulation Network-Level Relationships of Traffic Flow // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. DOI:10.1088/1757-899X/698/6/066049.

10. Aboudolas K., Geroliminis N. Perimeter and boundary flow control in multi-reservoir heterogeneous networks // Transportation Research Part B: Methodological. 2013. vol. 55. pp. 265–281. DOI: 10.1016/j. trb.2013.07.003.

11. Geroliminis N., Haddad J., Ramezani M. Optimal perimeter control for two urban regions with macroscopic fundamental diagrams: a model predictive approach // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2013. vol. 14(1). pp. 348– 359. DOI: 10.1109/TITS.2012.2216877. 12. Guo Y., Yang L., Hao S., Gu X. Perimeter traffic control for single urban congested region with macroscopic fundamental diagram and boundary conditions // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2021. vol. 562. DOI: 10.1016/j.physa.2020.125401.

13. Gao S., Li D., Zheng N., Hu R., She Z. Resilient perimeter control for hyper-congested two-region networks with MFD dynamics // Transportation Research Part B: Methodological. 2022. vol. 156. pp. 50 – 75. DOI: 10.1016/j.trb.2021.12.003.

14. Menelaou C., Timotheou S., Kolios P., Panayiotou C. Joint route guidance and demand management using generalized MFDs // IFAC-PapersOnLine. 2020. vol. 53(2). pp. 15023– 15028. DOI: 10.1016/j. ifacol.2020.12.2002.

15. Zhang L., Garoni T., Gier J. A comparative study of Macroscopic Fundamental Diagrams of arterial road networks governed by adaptive traffic signal systems // Transportation Research Part B: Methodological. 2013. vol. 49. pp. 1– 23. DOI: 10.1016/j.trb.2012.12.002.

16. Haddad J., Ramezani M., Geroliminis N. Cooperative traffic control of a mixed network with two urban regions and a freeway // Transportation Research Part B: Methodological. 2013. vol. 54. pp. 17– 36. DOI: 10.1016/j.trb.2013.03.007.

17. Haddad J. Optimal perimeter control synthesis for two urban regions with aggregate boundary queue dynamics // Transportation Research Part B: Methodological. 2017. vol. 96. pp. 1 - 25. DOI: 10.1016/j. trb.2016.10.016.

18. Kouvelas A., Saeedmanesh M., Geroliminis N. Enhancing model-based feedback perimeter control with data-driven online adaptive optimization // Transportation Research Part B: Methodological. 2017. vol. 96. pp. 26–45. DOI: 10.1016/j.trb.2016.10.011.

19. Haddad J. Mirkin B. Coordinated distributed adaptive perimeter control for large-scale urban road networks // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2017. vol. 77. pp. 495 515. DOI: 10.1016/j.trc.2016.12.002.

#### REFERENCES

1. Zyrjanov V. V. Osobennosti primenenija osnovnoj diagrammy transportnogo potoka na setevom urovne [Features of the application of the main diagram of the traffic flow at the network level]. *Izvestija volgogradskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. Serija: nazemnye transportnye sistemy. Volgogradskij gosudarstvennyj tehnicheskij universitet.* 2013: 71-74. (in Russ.) https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20901102.

2. Daganzo C. F. Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches. *Transportation Research Part B: Methodological.* 2007; 41(1): 49 - 62. DOI: 10.1016/j.trb.2006.03.001.

3. Daganzo C. F., Geroliminis N. An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic. *Transportation Research Part B: Methodological.* 2008; 42(9): 771 – 781. DOI: 10.1016/j. trb.2008.06.008.

4. Geroliminis N., Sun J. Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic. *Transportation Research Part B: Methodological.* 2011; 45(3): 605–617. DOI: 10.1016/j.trb.2010.11.004.

5. Haddad J., Ramezani M., Geroliminis N. Cooperative traffic control of a mixed network with two urban regions and a freeway. *Transportation Research Part B: Methodological.* 2013; 54: 17– 36. DOI: 10.1016/j. trb.2013.03.007.

6. Ji Y., Geroliminis N. Spatial and temporal analysis of congestion in urban transportation networks. *In: Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington, DC. 2011. http://www.strc.ch/2010/Ji.pdf.

7. Loder A., Bliemer M., Axhausen K. Optimal pricing and investment in a multi-modal city — Introducing a macroscopic network design problem based on the MFD. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2022; 156: 113 – 132. DOI: 10.1016/j. tra.2021.11.026.

8. Paipuri M., Xu Y., Gnozalez M., Leclercq L. Estimating MFDs, trip lengths and path flow distributions in a multi-region setting using mobile phone data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2020. vol. 118. DOI: 10.1016/j.trc.2020.102709.

9. Zyryanov V. V. Simulation Network-Level Relationships of Traffic Flow. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. DOI:10.1088/1757-899X/698/6/066049.

10. Aboudolas K., Geroliminis N. Perimeter and boundary flow control in multi-reservoir heterogeneous networks. *Transportation Research Part B: Methodological.* 2013; 55: 265 – 281. DOI: 10.1016/j. trb.2013.07.003.

11. Geroliminis N., Haddad J., Ramezani M. Optimal perimeter control for two urban regions with macroscopic fundamental diagrams: a model predictive approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2013; 14(1): 348–359. DOI: 10.1109/TITS.2012.2216877.

12. Guo Y., Yang L., Hao S., Gu X. Perimeter traffic control for single urban congested region with macroscopic fundamental diagram and boundary conditions. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2021. vol. 562. DOI: 10.1016/j.physa.2020.125401.

13. Gao S., Li D., Zheng N., Hu R., She Z. Resilient perimeter control for hyper-congested two-region networks with MFD dynamics. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2022. vol. 156. pp. 50 – 75. DOI: 10.1016/j.trb.2021.12.003.

14. Menelaou C., Timotheou S., Kolios P., Panayiotou C. Joint route guidance and demand management using generalized MFDs. *IFAC-PapersOnLine*. 2020. vol. 53(2). pp. 15023-15028. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.2002.

15. Zhang L., Garoni T., Gier J. A comparative study of Macroscopic Fundamental Diagrams of arterial road networks governed by adaptive traffic signal systems. *Transportation Research Part B: Methodological.* 2013; 49: 1–23. DOI: 10.1016/j.trb.2012.12.002.

16. Haddad J., Ramezani M., Geroliminis N. Cooperative traffic control of a mixed network with two urban regions and a freeway. *Transportation Research Part B: Methodological.* 2013; 54: 17– 36. DOI: 10.1016/j. trb.2013.03.007.

17. Haddad J. Optimal perimeter control synthesis for two urban regions with aggregate boundary queue dynamics. *Transportation Research Part B: Methodological.* 2017; 96: 1 - 25. DOI: 10.1016/j. trb.2016.10.016.

18. Kouvelas A., Saeedmanesh M., Geroliminis N. Enhancing model-based feedback perimeter control with data-driven online adaptive optimization. *Transportation Research Part B: Methodological.* 2017; 96: 26–45. DOI: 10.1016/j.trb.2016.10.011.

19. Haddad J. Mirkin B. Coordinated distributed adaptive perimeter control for large-scale urban road networks. *Transportation Research Part C: Emerg-ing Technologies*. 2017; 77: 495 515. DOI: 10.1016/j. trc.2016.12.002.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Цзянг Хайянь – аспирант кафедры «Организация перевозок и дорожного движения».

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHOR:**

Jiang Haiyan – Postgraduate Student of the Transportation and Traffic Management Department.



УДК 629.3.027.5 https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-258-277 https://elibrary.ru/UKCWYQ Научная статья



# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ АМОРТИЗАТОРА НА СОХРАННОСТЬ ГРУЗА, БЕЗОТРЫВНОЕ КАЧЕНИЕ КОЛЕСА И ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ В ПОДВЕСКЕ АВТОМОБИЛЯ

К. В. Чернышов, В. В. Новиков, Р. Р. Санжапов, В. В. Котов Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия chernykv@rambler.ru, http://orcid.org/0000-0002-2816-1768 nvv\_60@mail.ru, http://orcid.org/0000-0002-0917-781X rs@vstu.ru, http://orcid.org/0000-0003-4107-7429 vladkotov007@mail.ru, http://orcid.org/0000-0003-3753-0526

#### тетственный автор

# **АННОТАЦИЯ**

Введение. Целью статьи является рассмотрение влияния демпфирования в амортизаторе на сохранность груза, безотрывное качение колеса и потери энергии в подвеске автомобиля.

Материалы и методы. Рассмотрение основано на анализе амплитудно-частотных характеристик двухмассовой модели автомобиля и зависимости работы амортизатора за цикл колебаний от частоты кинематического воздействия.

Результаты. В статье приведена расчетная схема и уравнения динамики двухмассовой колебательной системы, эквивалентной автомобильной подвеске. Рассчитаны частоты, при которых пересекаются амплитудно-частотные характеристики для различных уровней демпфирования (инвариантные точки) в двухмассовой колебательной системе. Предложено понятие «относительная работа амортизатора за цикл колебаний» и приведена формула для расчета относительной работы амортизатора в двухмассовой колебательной системе. Проведён сравнительный анализ графиков, характеризующих плавность хода, безотрывное качение колеса и потери энергии в подвеске.

Обсуждение и заключение. Выявлено, что существенные противоречия между этими требованиями возникают только вблизи второго резонанса подрессоренной массы, при увеличении частоты колебаний в зарезонансной зоне эти противоречия сглаживаются.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автомобиль, двухмассовая колебательная система, амортизаторы, сохранность груза, безотрывное качение колеса, потери энергии в подвеске, амплитудно-частотные характеристики, относительная работа амортизатора, инвариантные точки.

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы выражают благодарность руководству СибАДИ за предоставленную возможность публикации материала, а также рецензентам за уделенное внимание нашим исследованиям.

Статья поступила в редакцию 20.02.2022; одобрена после рецензирования 09.03.2022; принята к публикации 12.04.2022.

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: Чернышов К. В. Анализ влияния сопротивления амортизатора на сохранность груза, безотрывное качение колеса и потери энергии в подвеске автомобиля / К. В. Чернышов, В. В. Новиков, Р. Р. Санжапов, В. В. Котов // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 2(84). С. 258-277. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-258-277

© Чернышов К. В., Новиков В. В., Санжапов Р. Р., Котов В. В., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.



https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-258-277 https://elibrary.ru/UKCWYQ Original article

# ANALYSIS OF SHOCK ABSORBER RESISTANCE IMPACT ON LOAD SAFETY, CONTINUOUS WHEEL ROLLING AND ENERGY LOSS IN VEHICLE SUSPENSION

Konstantin V. Chernyshov<sup>\*</sup>, Viacheslav V. Novikov, Rustam R. Sanzhapov, Vladislav V. Kotov Volgograd State Technical University.

Volgograd, Russia chernykv@rambler.ru, http://orcid.org/0000-0002-2816-1768 nvv\_60@mail.ru, http://orcid.org/0000-0002-0917-781X rs@vstu.ru, http://orcid.org/0000-0003-4107-7429 vladkotov007@mail.ru, http://orcid.org/0000-0003-3753-0526 \*corresponding author

# ABSTRACT

*Introduction.* The purpose of the article is to consider the effect of damping in the shock absorber on smooth running, continuous rolling of the wheel and energy loss in the suspension of the car.

**Materials and methods.** The review is based on the analysis of the amplitude-frequency characteristics of a twomass car model and the dependence of the shock absorber operation during the oscillation cycle on the frequency of kinematic action.

**Results.** The article presents a calculation scheme and equations of dynamics of a two-mass oscillatory system equivalent to an automobile suspension. The frequencies at which the amplitude-frequency characteristics intersect for different levels of damping (invariant points) in a two-mass oscillatory system are calculated. The relative operation of the shock absorber for the oscillation cycle concept is proposed and a formula for calculating the relative operation of the shock absorber in a two-mass oscillatory system is given. A comparative analysis of graphs characterizing smooth running, continuous rolling of the wheel and energy losses in the suspension is carried out. **Discussion and conclusions.** It is revealed that significant contradictions between these requirements arise only near the second resonance of the sprung mass, with an increase in the frequency of vibrations in the resonant zone, these contradictions are decrease.

**KEYWORDS:** car, two-mass oscillatory system, shock absorbers, cargo safety, continuous rolling of the wheel, energy loss in the suspension, amplitude-frequency characteristics, relative operation of the shock absorber, invariant points.

**ACKNOWLEDGMENTS.** The authors expressed gratitude to SibADI management for the opportunity to publish the material, as well as to reviewers for the attention paid to our research.

The article was submitted 20.02.2022; approved after reviewing 09.03.2022; accepted for publication 12.04.2022.

#### 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:* Konstantin V. Chernyshov, Viacheslav V. Novikov, Rustam R. Sanzhapov, Vladislav V. Kotov Analysis of shock absorber resistance impact on load safety, continuous wheel rolling and energy loss in vehicle suspension. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2022; 19 (2): 258-277. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-258-277

© Chernyshov K. V., Novikov V. V., Sanzhapov R. R., Kotov V. V., 2022



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



**Основные положения.** В статье приведена расчетная схема и уравнения динамики двухмассовой колебательной системы, эквивалентной автомобильной подвеске. Рассчитаны частоты, при которых пересекаются амплитудно-частотные характеристики для различных уровней демпфирования (инвариантные точки) в двухмассовой колебательной системе. Предложено понятие «относительная работа амортизатора за цикл колебаний» и приведена формула для расчета относительной работы амортизатора в двухмассовой колебательной системе. Проведён сравнительный анализ графиков, характеризующих сохранность груза, безотрывное качение колеса и потери энергии в подвеске. Выявлено, что существенные противоречия между этими требованиями возникают только вблизи второго резонанса подрессоренной массы, при увеличении частоты колебаний в зарезонансной зоне эти противоречия сглаживаются.

# введение

Известно, что характеристики нерегулируемой автомобильной подвески при ее проектировании выбираются в результате поиска компромисса между противоречивыми требованиями плавности хода и комфорта с одной стороны, а также устойчивости и управляемости с другой стороны. Так, принято считать, что пониженное демпфирование способствует повышению плавности хода, а увеличение демпфирования в рациональных пределах содействует безотрывному качению колеса и вследствие этого приводит к повышению устойчивости движения автомобиля. Кроме того, всё больше внимания обращают на энергоэффективность подвески, которая тоже часто вступает в противоречие со всеми указанными требованиями.

Исследованию влияния демпфирования в линейной подвеске на вертикальные ускорения подрессоренных масс, деформацию шин и пробои подвески, вычислению оптимальных для плавности хода и безопасности движения коэффициентов сопротивления амортизаторов для различных спектров возмущений посвящён объемный параграф в фундаментальной работе [1]. В работе [2] рассмотрено влияние демпфирования в линейной подвеске на вертикальные перемещения и ускорения подрессоренных и перемещения неподрессоренных масс на основе анализа амплитудно-частотных характеристик двухмассовой колебательной системы, однако в этой работе не рассмотрены деформации шин, влияющие на устойчивость, не вычислены узловые (инвариантные) точки и не проведен сравнительный анализ влияния демпфирования на плавность хода и устойчивость движения. Результаты исследования линейных подвесок приведены в работах [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]. Исследованию выделения энергии в амортизаторе одномассовой колебательной системы посвящены работы [18].

Наиболее простой моделью автомобиля, учитывающей наличие в автомобиле подрессоренной и неподрессоренной масс, упругих и демпфирующих свойств подвески и шины, является двухмассовая колебательная система с внешним кинематическим воздействием (рисунок 1). Здесь, соответственно,  $m_1$  и  $m_2$  – подрессоренная и неподрессоренная массы,  $c_1$  и  $c_2$  – жёсткость рессоры и шины,  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты демпфирования амортизатора подвески и шины,  $z_1$  и  $z_2$  – перемещения подрессоренной и неподрессоренной масс, q – кинематическое воздействие.



Рисунок 1 – Схема двухмассовой одноопорной виброзащитной системы на основе [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12]: 1 – подрессоренная масса; 2 – неподрессоренная масса; 3 – упругий элемент (рессора); 4 – демпфер (амортизатор); 5 и 6 – шина с упругими и

демпфирующими свойствами

Figure 1 – Diagram of a two-mass single-support vibration protection system based on [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12]: 1 – sprung mass; 2 – unsprung mass;

3 – elastic element (spring); 4 – damper (shock absorber); 5 and 6 – tire with elastic and damping properties

TRANSPORT PART II

Двухмассовая колебательная система позволяет изучить влияние подвески не только на колебания подрессоренной массы, но и на колебания неподрессоренной массы, а также на деформации шин. Математической моделью динамики такой системы является система из двух дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{array}{l} m_{1}\ddot{z}_{1} + k_{1}(\dot{z}_{1} - \dot{z}_{2}) + c_{1}(z_{1} - z_{2}) = 0; \\ m_{2}\ddot{z}_{2} + k_{2}(\dot{z}_{2} - \dot{q}) + c_{2}(z_{2} - q) - k_{1}(\dot{z}_{1} - \dot{z}_{2}) - c_{1}(z_{1} - z_{2}) = 0. \end{array}$$

$$(1)$$

Разделим первое и второе уравнения на *m*, и *m*, соответственно:

$$\ddot{z}_{1} + \frac{k_{1}}{m_{1}}(\dot{z}_{1} - \dot{z}_{2}) + \frac{c_{1}}{m_{1}}(z_{1} - z_{2}) = 0;$$

$$\ddot{z}_{2} + \frac{k_{2}}{m_{2}}(\dot{z}_{2} - \dot{q}) + \frac{c_{2}}{m_{2}}(z_{2} - q) - \frac{k_{1}}{m_{2}}(\dot{z}_{1} - \dot{z}_{2}) - \frac{c_{1}}{m_{2}}(z_{1} - z_{2}) = 0.$$

$$\left. \right\}$$

$$(2)$$

Введем обозначения:

$$\mu = \frac{m_1}{m_2}, \quad \frac{k_1}{m_1} = 2h_1, \quad \frac{k_2}{m_2} = 2h_2, \quad \frac{c_1}{m_1} = \omega_{01}^2, \quad \frac{c_2}{m_2} = \omega_{02}^2.$$
(3)

Здесь  $h_1$  и  $h_1$  – парциальные (относящиеся к разделенным колебательным системам) относительные коэффициенты демпфирования,  $\omega_{01}$  и  $\omega_{02}$  – парциальные собственные частоты подрессоренной и неподрессоренной масс. С учетом этих обозначений получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \ddot{z}_{1} + 2h_{1}(\dot{z}_{1} - \dot{z}_{2}) + \omega_{01}^{2}(z_{1} - z_{2}) &= 0; \\ \ddot{z}_{2} + 2h_{2}(\dot{z}_{2} - \dot{q}) + \omega_{02}^{2}(z_{2} - q) - 2h_{1}\mu(\dot{z}_{1} - \dot{z}_{2}) - \omega_{01}^{2}\mu(z_{1} - z_{2}) &= 0. \end{aligned}$$

$$(4)$$

Система дифференциальных уравнений (4) приводится к двум дифференциальным уравнениям четвертого порядка:

$$\ddot{\ddot{z}}_{1} + (2h_{1} + 2h_{1}\mu + 2h_{2})\ddot{z}_{1} + (2h_{1} \cdot 2h_{2} + \omega_{02}^{2} + \omega_{01}^{2} + \omega_{01}^{2}\mu)\ddot{z}_{1} + (2h_{1}\omega_{02}^{2} + 2h_{2}\omega_{01}^{2})\dot{z}_{1} + \omega_{01}^{2}\omega_{02}^{2}z_{1} = = 2h_{1} \cdot 2h_{2}\ddot{q} + (2h_{1}\omega_{02}^{2} + 2h_{2}\omega_{01}^{2})\dot{q} + \omega_{01}^{2}\omega_{02}^{2}q$$
(5)

И

$$\ddot{\ddot{z}}_{2} + (2h_{1} + 2h_{1}\mu + 2h_{2})\ddot{z}_{2} + (2h_{1} \cdot 2h_{2} + \omega_{02}^{2} + \omega_{01}^{2} + \omega_{01}^{2}\mu)\ddot{z}_{2} + (2h_{1}\omega_{02}^{2} + 2h_{2}\omega_{01}^{2})\dot{z}_{2} + \omega_{01}^{2}\omega_{02}^{2}z_{2} = = 2h_{2}\ddot{q} + (2h_{1} \cdot 2h_{2} + \omega_{02}^{2})\ddot{q} + (2h_{1}\omega_{02}^{2} + 2h_{2}\omega_{01}^{2})\dot{q} + \omega_{01}^{2}\omega_{02}^{2}q.$$
(6)

Решения однородных уравнений, соответствующих уравнениям (5) и (6), характеризуют переходные процессы в системе, а частные решения этих уравнений – ее установившееся движение.

Поскольку при исследовании работы автомобильных подвесок обычно важно знать закономерности установившихся колебательных процессов, рассмотрим динамику двухмассовой колебательной системы и частное решение неоднородных уравнений при синусоидальном кинематическом возмущении.

Частные решения неоднородных дифференциальных уравнений (5) и (6) для синусоидального возмущения  $q = q_0 \sin \omega t$  имеют вид:

$$z_1 = z_{10}\sin(\omega t + \beta_{z_1/q}), \quad z_2 = z_{20}\sin(\omega t + \beta_{z_2/q}), \tag{7}$$

где  $z_{01}$  <sub>И</sub>  $z_{02}$  – амплитуды колебаний, соответственно, подрессоренной и неподрессоренной масс;  $\beta_{z_1/q}$  и  $\beta_{z_2/q}$  – фазовые сдвиги колебаний этих масс относительно кинематического воздействия. Амплитуды колебаний

$$z_{10} = q_0 \sqrt{\frac{A_1^2 + B_1^2}{C^2 + D^2}}, \quad z_{20} = q_0 \sqrt{\frac{A_2^2 + B_2^2}{C^2 + D^2}}, \tag{8}$$



# РАЗДЕЛ II ТРАНСПОРТ

фазовые сдвиги колебаний

$$\beta_{z_{1}/q} = -\arctan\frac{A_{1}D - B_{1}C}{A_{1}C + B_{1}D}, \quad \beta_{z_{2}/q} = -\arctan\frac{A_{2}D - B_{2}C}{A_{2}C + B_{2}D}.$$
(9)

Здесь

$$C = \omega_{01}^{2}\omega_{02}^{2} - (2h_{1}\omega \cdot 2h_{2}\omega + \omega_{01}^{2}\omega^{2} + \omega_{01}^{2}\omega^{2}\mu + \omega_{02}^{2}\omega^{2}) + \omega^{4};$$
  

$$D = 2h_{1}\omega\omega_{02}^{2} + 2h_{2}\omega\omega_{01}^{2} - (2h_{1}\omega + 2h_{1}\omega\mu + 2h_{2}\omega) \cdot \omega^{2};$$
  

$$A_{1} = \omega_{01}^{2}\omega_{02}^{2} - 2h_{1}\omega \cdot 2h_{2}\omega;$$
  

$$B_{1} = 2h_{1}\omega\omega_{02}^{2} + 2h_{2}\omega\omega_{01}^{2};$$
  

$$A_{2} = \omega_{01}^{2}\omega_{02}^{2} - 2h_{1}\omega \cdot 2h_{2}\omega - \omega_{02}^{2}\omega^{2};$$
  

$$B_{2} = 2h_{1}\omega\omega_{02}^{2} + 2h_{2}\omega\omega_{01}^{2} - 2h_{2}\omega\omega^{2}.$$

Значения амплитуд и фазовых сдвигов вынужденных колебаний в безразмерных величинах:

$$K_{z_1/q} = \frac{z_{10}}{q_0} = \sqrt{\frac{a_1^2 + b_1^2}{c^2 + d^2}}, \quad K_{z_2/q} = \frac{z_{20}}{q_0} = \sqrt{\frac{a_2^2 + b_2^2}{c^2 + d^2}}, \quad (10)$$

$$\beta_{z_{1/q}} = -\arctan\frac{a_{1}d - b_{1}c}{a_{1}c + b_{1}d}, \quad \beta_{z_{2/q}} = -\arctan\frac{a_{2}d - b_{2}c}{a_{2}c + b_{2}d}, \quad (11)$$

где

262

$$c = 1 - 2\psi_{1}\iota_{1} \cdot 2\psi_{2}\iota_{2} - \iota_{2}^{2} - \iota_{2}^{2}\mu - \iota_{1}^{2} + \iota_{1}^{2}\iota_{2}^{2};$$
  

$$d = 2\psi_{1}\iota_{1} + 2\psi_{2}\iota_{2} - 2\psi_{1}\iota_{1}\iota_{2}^{2} - 2\psi_{1}\iota_{1}\iota_{2}^{2}\mu - 2\psi_{2}\iota_{2}\iota_{1}^{2};$$
  

$$a_{1} = 1 - 2\psi_{1}\iota_{1} \cdot 2\psi_{2}\iota_{2};$$
  

$$b_{1} = 2\psi_{1}\iota_{1} + 2\psi_{2}\iota_{2};$$
  

$$a_{2} = 1 - 2\psi_{1}\iota_{1} \cdot 2\psi_{2}\iota_{2} - \iota_{1}^{2};$$
  

$$b_{2} = 2\psi_{1}\iota_{1} + 2\psi_{2}\iota_{2} - 2\psi_{2}\iota_{2}\iota_{1}^{2}.$$

Амплитуды ускорений определяются из выражений:

$$a_{10} = \omega^2 z_{10} = \omega_{01}^2 \iota_1^2 z_{10} = \omega_{02}^2 \iota_2^2 z_{10},$$
  

$$a_{20} = \omega^2 z_{20} = \omega_{01}^2 \iota_1^2 z_{20} = \omega_{02}^2 \iota_2^2 z_{20}.$$
(12)

Амплитуды ускорений в безразмерных величинах:

$$K_{\ddot{z}_{1/q}} = \frac{a_{10}}{q_0 \omega_{01}^2} = \iota_1^2 \sqrt{\frac{a_1^2 + b_1^2}{c^2 + d^2}}, \quad K_{\ddot{z}_{2/q}} = \frac{a_{20}}{q_0 \omega_{01}^2} = \iota_1^2 \sqrt{\frac{a_2^2 + b_2^2}{c^2 + d^2}}.$$
 (13)

Большой интерес при исследовании подвесок представляют амплитудно-частотные характеристики деформаций подвески и шин. Деформации подвески характеризуют ее энергопотери, пробои и отрывы, а деформации шин определяют сцепление колеса с дорогой.

Введем обозначения:  $x = z_1 - z_2$  – деформация подвески,  $y = z_2 - q$  – деформация шины. Произведем изменения в системе уравнений (4):

$$\begin{aligned} \ddot{z}_{1} - \ddot{z}_{2} + 2h_{1}(\dot{z}_{1} - \dot{z}_{2}) + \omega_{01}^{2}(z_{1} - z_{2}) &= -(\ddot{z}_{2} - \ddot{q}) - \ddot{q}; \\ \ddot{z}_{2} - \ddot{q} + 2h_{2}(\dot{z}_{2} - \dot{q}) + \omega_{02}^{2}(z_{2} - q) - 2h_{1}\mu(\dot{z}_{1} - \dot{z}_{2}) - \omega_{01}^{2}\mu(z_{1} - z_{2}) &= -\ddot{q}. \end{aligned}$$

$$(14)$$

TRANSPORT PART II

Тогда, с учетом принятых обозначений,

$$\begin{aligned} \ddot{x} + 2h_1 \dot{x} + \omega_{01}^2 x + \ddot{y} &= -\ddot{q}; \\ \ddot{y} + 2h_2 \dot{y} + \omega_{02}^2 y - 2h_1 \mu \dot{x} - \omega_{01}^2 \mu x &= -\ddot{q}. \end{aligned}$$
(15)

Система дифференциальных уравнений (15) приводится к двум дифференциальным уравнениям четвертого порядка:

$$\dot{\ddot{x}} + (2h_1 + 2h_1\mu + 2h_2)\ddot{x} + (2h_1 \cdot 2h_2 + \omega_{02}^2 + \omega_{01}^2 + \omega_{01}^2\mu)\ddot{x} + (2h_1\omega_{02}^2 + 2h_2\omega_{01}^2)\dot{x} + \omega_{01}^2\omega_{02}^2x = = -2h_2\ddot{q} - \omega_{02}^2\ddot{q}$$
(16)

$$\ddot{\ddot{y}} + (2h_1 + 2h_1\mu + 2h_2)\ddot{y} + (2h_1 \cdot 2h_2 + \omega_{02}^2 + \omega_{01}^2 + \omega_{01}^2\mu)\ddot{y} + (2h_1\omega_{02}^2 + 2h_2\omega_{01}^2)\dot{y} + \omega_{01}^2\omega_{02}^2y = = -\ddot{\ddot{q}} - (2h_1 + 2h_1\mu)\ddot{q} - (\omega_{01}^2 + \omega_{01}^2\mu)\ddot{q}.$$

$$(17)$$

Так же как и в случае уравнений (5) и (6), нас интересуют частные решения неоднородных дифференциальных уравнений (16) и (17), которые для синусоидального возмущения  $q = q_0 \sin \omega t$ имеют вид:

$$x = x_0 \sin(\omega t + \beta_{x/q}) , \qquad (18)$$

$$y = y_0 \sin(\omega t + \beta_{y/q}), \tag{19}$$

где  $x_0$  и  $y_0$  – амплитуды деформаций, соответственно, подвески и шины;  $\beta_{x/q}$  и  $\beta_{y/q}$  – их фазовые сдвиги относительно кинематического воздействия. Здесь амплитуды колебаний

$$x_{0} = q_{0} \sqrt{\frac{A_{x}^{2} + B_{x}^{2}}{C^{2} + D^{2}}}, \quad y_{0} = q_{0} \sqrt{\frac{A_{y}^{2} + B_{y}^{2}}{C^{2} + D^{2}}},$$
(20)

фазовые сдвиги колебаний

$$\beta_{x/q} = -\operatorname{arctg} \frac{A_x D - B_x C}{A_x C + B_x D}, \quad \beta_{y/q} = -\operatorname{arctg} \frac{A_y D - B_y C}{A_y C + B_y D}, \quad (21)$$

где

$$C = \omega_{01}^{2}\omega_{02}^{2} - (2h_{1}\omega \cdot 2h_{2}\omega + \omega_{01}^{2}\omega^{2} + \omega_{01}^{2}\omega^{2}\mu + \omega_{02}^{2}\omega^{2}) + \omega^{4};$$
  

$$D = 2h_{1}\omega\omega_{02}^{2} + 2h_{2}\omega\omega_{01}^{2} - (2h_{1}\omega + 2h_{1}\omega\mu + 2h_{2}\omega) \cdot \omega^{2};$$
  

$$A_{x} = \omega_{02}^{2}\omega^{2};$$
  

$$B_{x} = 2h_{2}\omega^{3};$$
  

$$A_{y} = (\omega_{01}^{2}(1 + \mu) - \omega^{2})\omega^{2};$$
  

$$B_{y} = 2h_{1}\omega^{3}(1 + \mu).$$

Амплитуды колебаний в безразмерных величинах:

$$K_{x} = \frac{x_{0}}{q_{0}} = \sqrt{\frac{a_{x}^{2} + b_{x}^{2}}{c^{2} + d^{2}}}, \quad K_{y} = \frac{y_{0}}{q_{0}} = \sqrt{\frac{a_{y}^{2} + b_{y}^{2}}{c^{2} + d^{2}}}, \quad (22)$$

фазовые сдвиги колебаний в безразмерных величинах:

$$\beta_{x/q} = -\operatorname{arctg} \frac{a_x d - b_x c}{a_x c + b_x d}, \quad \beta_{y/q} = -\operatorname{arctg} \frac{a_y d - b_y c}{a_y c + b_y d}, \quad (23)$$

Том 19, № 2. 2022 Vol. 19, No. 2. 2022



где

$$c = 1 - 2\psi_{1}\iota_{1} \cdot 2\psi_{2}\iota_{2} - \iota_{2}^{2} - \iota_{2}^{2}\mu - \iota_{1}^{2} + \iota_{1}^{2}\iota_{2}^{2};$$
  

$$d = 2\psi_{1}\iota_{1} + 2\psi_{2}\iota_{2} - 2\psi_{1}\iota_{1}\iota_{2}^{2} - 2\psi_{1}\iota_{1}\iota_{2}^{2}\mu - 2\psi_{2}\iota_{2}\iota_{1}^{2};$$
  

$$a_{x} = \iota_{1}^{2};$$
  

$$b_{x} = 2\psi_{2}\iota_{2}\iota_{1}^{2};$$
  

$$a_{y} = (1 + \mu - \iota_{1}^{2})\iota_{2}^{2};$$
  

$$b_{y} = 2\psi_{1}\iota_{1}(1 + \mu)\iota_{2}^{2}.$$

Демпфирование в автомобильной шине очень мало, поэтому при проведении расчетов им обычно пренебрегают, что существенно упрощает приведенные выше формулы. Так дифференциальные уравнения (5) и (6) при  $h_2 = 0$  ( $\psi_2 = 0$ ), соответственно, принимают вид:

$$\ddot{\vec{z}}_{1} + 2h_{1}(1+\mu)\ddot{\vec{z}}_{1} + (\omega_{01}^{2}(1+\mu) + \omega_{02}^{2})\ddot{\vec{z}}_{1} + 2h_{1}\omega_{02}^{2}\dot{\vec{z}}_{1} + \omega_{01}^{2}\omega_{02}^{2}\vec{z}_{1} = (2h_{1}\dot{q} + \omega_{01}^{2}q)\omega_{02}^{2}; \quad (24)$$

$$\ddot{z}_{2} + 2h_{1}(1+\mu)\ddot{z}_{2} + (\omega_{01}^{2}(1+\mu) + \omega_{02}^{2})\ddot{z}_{2} + 2h_{1}\omega_{02}^{2}\dot{z}_{2} + \omega_{01}^{2}\omega_{02}^{2}z_{2} = (\ddot{q} + 2h_{1}\dot{q} + \omega_{01}^{2}q)\omega_{02}^{2}.$$
(25)

Тогда выражения для расчета значений амплитуд колебаний подрессоренной и неподрессоренной масс, соответственно:

$$z_{01} = q_0 \omega_{02}^2 \sqrt{\frac{\omega_{01}^4 + 4h_1^2 \omega^2}{\left[\omega_{01}^2 \omega_{02}^2 - (\omega_{01}^2 + \omega_{01}^2 \mu + \omega_{02}^2) \cdot \omega^2 + \omega^4\right]^2 + 4h_1^2 \omega^2 \left[\omega_{02}^2 - (1 + \mu) \cdot \omega^2\right]^2}};$$

$$z_{02} = q_0 \omega_{02}^2 \sqrt{\frac{(\omega_{01}^2 - \omega^2)^2 + 4h_1^2 \omega^2}{\left[\omega_{01}^2 \omega_{02}^2 - (\omega_{01}^2 + \omega_{01}^2 \mu + \omega_{02}^2) \cdot \omega^2 + \omega^4\right]^2 + 4h_1^2 \omega^2 \left[\omega_{02}^2 - (1 + \mu) \cdot \omega^2\right]^2}}.$$
(26)

В безразмерных величинах амплитуды:

$$K_{z_{1}/q} = \frac{z_{01}}{q_{0}} = \sqrt{\frac{1 + 4\psi_{1}^{2}\iota_{1}^{2}}{\left[1 - \iota_{2}^{2} - \iota_{2}^{2}\mu - \iota_{1}^{2} + \iota_{1}^{2}\iota_{2}^{2}\right]^{2} + 4\psi_{1}^{2}\iota_{1}^{2}\left[1 - \iota_{2}^{2} - \iota_{2}^{2}\mu\right]^{2}};$$

$$K_{z_{2}/q} = \frac{z_{02}}{q_{0}} = \sqrt{\frac{(1 - \iota_{1}^{2})^{2} + 4\psi_{1}^{2}\iota_{1}^{2}}{\left[1 - \iota_{2}^{2} - \iota_{2}^{2}\mu\right]^{2} + \iota_{1}^{2}\iota_{2}^{2}\right]^{2} + 4\psi_{1}^{2}\iota_{1}^{2}\left[1 - \iota_{2}^{2} - \iota_{2}^{2}\mu\right]^{2}},$$
(27)

сдвиги фаз колебаний подрессоренной и неподрессоренной масс, соответственно:

$$\beta_{z_1/q} = -\operatorname{arctg} \frac{2\psi_1 \iota_1 (\iota_1^2 - \iota_1^2 \iota_2^2)}{1 - \iota_2^2 - \iota_2^2 \mu - \iota_1^2 + \iota_1^2 \iota_2^2 + 4\psi_1^2 \iota_1^2 (1 - \iota_2^2 - \iota_2^2 \mu)};$$

$$2\psi_1 \iota_1 \iota_1^2 \iota_2^2 \mu$$
(28)

$$\beta_{z_2/q} = -\operatorname{arctg} \frac{-\psi_1(v_1v_2)\mu}{1 - v_2^2 - v_2^2\mu - 2v_1^2 + 2v_1^2v_2^2 + v_1^2v_2^2\mu + v_1^4 - v_1^4v_2^2 + 4\psi_1^2v_1^2(1 - v_2^2 - v_2^2\mu)}$$

Дифференциальные уравнения (16) и (17) при  $h_2=0$  (  $\psi_2=0$  ), соответственно:

$$\ddot{x} + 2h_1(1+\mu)\ddot{x} + (\omega_{01}^2(1+\mu) + \omega_{02}^2)\ddot{x} + 2h_1\omega_{02}^2\dot{x} + \omega_{01}^2\omega_{02}^2x = -\omega_{02}^2\ddot{q},$$
(29)

$$\ddot{y} + 2h_1(1+\mu)\ddot{y} + (\omega_{01}^2(1+\mu) + \omega_{02}^2)\ddot{y} + 2h_1\omega_{02}^2\dot{y} + 2h_1\omega_{02}^2\dot{y} + 2h_1\omega_{02}^2\dot{y} + \omega_{01}^2\omega_{02}^2y = -\ddot{\ddot{q}} - 2h_1(1+\mu)\ddot{q} - \omega_{01}^2(1+\mu)\ddot{q}.$$
(30)



В этом случае амплитуды деформаций подвесок и шин, соответственно,

$$x_{0} = q_{0} \sqrt{\frac{\omega^{4} \omega_{02}^{4}}{\left[\omega_{01}^{2} \omega_{02}^{2} - (\omega_{01}^{2} + \omega_{01}^{2} \mu + \omega_{02}^{2}) \cdot \omega^{2} + \omega^{4}\right]^{2} + 4h_{1}^{2} \omega^{2} \left[\omega_{02}^{2} - (1 + \mu) \cdot \omega^{2}\right]^{2}};$$

$$y_{0} = q_{0} \sqrt{\frac{(\omega_{01}^{2} (1 + \mu) - \omega^{2})^{2} \omega^{4} + 4h_{1}^{2} \omega^{6} (1 + \mu)^{2}}{\left[\omega_{01}^{2} \omega_{02}^{2} - (\omega_{01}^{2} + \omega_{01}^{2} \mu + \omega_{02}^{2}) \cdot \omega^{2} + \omega^{4}\right]^{2} + 4h_{1}^{2} \omega^{2} \left[\omega_{02}^{2} - (1 + \mu) \cdot \omega^{2}\right]^{2}}.$$
(31)

Эти же амплитуды в относительных координатах, соответственно,

$$K_{x} = \sqrt{\frac{\iota_{1}^{4}}{(1 - \iota_{2}^{2} - \iota_{2}^{2}\mu - \iota_{1}^{2} + \iota_{1}^{2}\iota_{2}^{2})^{2} + 4\psi_{1}^{2}\iota_{1}^{2}(1 - \iota_{2}^{2} - \iota_{2}^{2}\mu)^{2}}};$$

$$K_{y} = \iota_{2}^{2}\sqrt{\frac{(1 + \mu - \iota_{1}^{2})^{2} + 4\psi_{1}^{2}\iota_{1}^{2}(1 + \mu)^{2}}{(1 - \iota_{2}^{2} - \iota_{2}^{2}\mu - \iota_{1}^{2} + \iota_{1}^{2}\iota_{2}^{2})^{2} + 4\psi_{1}^{2}\iota_{1}^{2}(1 - \iota_{2}^{2} - \iota_{2}^{2}\mu)^{2}}}.$$
(32)

Фазовые сдвиги колебаний

ſ

$$\beta_{x/q} = -\arctan \frac{2h_1\omega(\omega_{02}^2 - (1+\mu) \cdot \omega^2)}{\omega_{01}^2 \omega_{02}^2 - \omega_{01}^2 \omega^2 (1+\mu) - \omega_{02}^2 \omega^2 + \omega^4};$$

$$\beta_{y/q} = -\arctan \frac{2h_1\omega \cdot \omega_{02}^2 \mu \omega^2}{(\omega_{01}^2 (1+\mu) - \omega^2) \cdot [\omega_{01}^2 \omega_{02}^2 - \omega_{01}^2 \omega^2 (1+\mu) - \omega_{02}^2 \omega^2 + \omega^4] + 4h_1^2 \omega^2 (1+\mu) \cdot [\omega_{02}^2 - (1+\mu) \cdot \omega^2]}$$
(33)

Фазовые сдвиги колебаний в относительных координатах

$$\beta_{x/q} = -\operatorname{arctg} \frac{2\psi_1 \iota_1 (1 - \iota_2^2 - \iota_2^2 \mu)}{1 - \iota_2^2 - \iota_2^2 \mu - \iota_1^2 + \iota_1^2 \iota_2^2};$$

$$\beta_{y/q} = -\operatorname{arctg} \frac{2\psi_1 \iota_1 \mu \iota_1^2}{(1 + \mu - \iota_1^2)(1 - \iota_2^2 - \iota_2^2 \mu - \iota_1^2 + \iota_1^2 \iota_2^2) + 4\psi_1^2 \iota_1^2 (1 + \mu)(1 - \iota_2^2 - \iota_2^2 \mu)}.$$
(34)

# МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для построения и анализа графиков амплитудно-частотных характеристик целесообразно ввести понятие относительной жесткости колебательной системы. Для этого рассмотрим отношение квадратов парциальных собственных частот:

$$\frac{\omega_{02}^2}{\omega_{01}^2} = \frac{c_2}{m_2} \cdot \frac{m_1}{c_1} = c_{\text{oth}} \mu \,. \tag{35}$$

Здесь  $c_{\text{отн}} = \frac{c_2}{c_1}$  – относительная жесткость – отношение жесткости шины к жесткости упругого элемента подвески. На рисунке 2 представлены амплитудно-частотные характеристики перемещений и ускорений двухмассовой колебательной системы с кинематическим возмущением с различными значениями относительного коэффициента демпфирования амортизатора и без демпфирования в шине при относительной жесткости колебательной системы  $c_{\rm отн} = 10/1,5$ .

На рисунке 3 изображены амплитудно-частотные характеристики деформаций шин (*a*) и деформаций подвески (*б*) при отсутствии демпфирования в шинах и при различных величинах демпфирования в подвеске при той же относительной жесткости.

Увеличение демпфирования в подвеске двухмассовой колебательной системы при-

водит к снижению амплитуд колебаний подрессоренной и неподрессоренной масс и деформаций шин не во всем диапазоне частот, а на отдельных участках этого диапазона. При отсутствии демпфирования в шине амплитудно-частотные характеристики двухмассовой колебательной системы имеют инвариантные точки, разделяющие диапазоны влияния демпфирования в подвеске на амплитуды колебаний масс и деформаций шин.

Амплитудно-частотные характеристики деформаций подвески при слабом демпфировании в подвеске имеют два ярко выраженных резонансных пика, которые сглаживаются с увеличением демпфирования. Точек пересечения эти характеристики при различном демпфировании не имеют, но имеют точку касания. Увеличение демпфирования в подвеске всегда приводит к уменьшению амплитуд деформаций подвески.

На рисунке 2, *а*, *в* обозначены инвариантные точки, в которых пересекаются амплитудно-частотные характеристики перемещений подрессоренной (точки А, Б, В) и неподрессоренной (точки Г, Д) масс. На рисунке 3, *а* обозначены инвариантные точки амплитудно-частотных характеристик деформаций шин (точки Е, Ж). Точка касания графиков на рисунке 3, *б* (составлено авторами) обозначена буквой 3.

Предлагается следующая методика расчета инвариантных точек.

Выражения (26) для расчета значений амплитуд колебаний подрессоренной и неподрессоренной масс и выражение (31) для расчета амплитуды деформаций шин имеют общий вид:

$$K(\omega, h^{2}) = \sqrt{\frac{a^{2}(\omega) + h^{2}b^{2}(\omega)}{c^{2}(\omega) + h^{2}d^{2}(\omega)}}.$$
 (36)

Значения функции (36) не зависят от  $h^2$  (и, следовательно, от *h*) при

$$\frac{\partial K}{\partial h^2} = 0 \,. \tag{37}$$

Это и есть условие существования инвариантных точек. Найдем производную (37):

$$\frac{\partial K}{\partial h^2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{c^2(\omega) + h^2 d^2(\omega)}{a^2(\omega) + h^2 b^2(\omega)}} \cdot \frac{b^2(\omega)c^2(\omega) - d^2(\omega)a^2(\omega)}{(c^2(\omega) + h^2 d^2(\omega))^2} = 0$$
(38)

Эквивалентное условие

$$b^{2}(\omega)c^{2}(\omega) - d^{2}(\omega)a^{2}(\omega) = 0$$
 (39)

или

$$b(\omega)c(\omega) = \pm d(\omega)a(\omega) \tag{40}$$

Инвариантными точками  $\omega_{\rm inv}$  будут решения уравнения (40) относительно  $\omega$ .

Таким образом, методика расчета инвариантных точек сводится к выделению из выражений вида (36) зависимостей  $a(\omega)$ ,  $b(\omega)$ ,  $c(\omega)$ ,  $d(\omega)$  и решению уравнения (40) относительно  $\omega$ .

Если слева и справа от инвариантной точки  $\frac{\partial K}{\partial h^2}$  имеет разные знаки, то точка  $\omega_{inv}$  является точкой пересечения. Если слева и справа от инвариантной точки  $\omega_{inv}$  производная  $\frac{\partial K}{\partial h^2}$  имеет одинаковые знаки, то точка  $\omega_{inv}$  является точкой касания. Как видно из (38) знак производной  $\frac{\partial K}{\partial h^2}$ 

Как видно из (38), знак производной  $\overline{\partial h^2}$  зависит исключительно от знака выражения

$$b^{2}(\omega)c^{2}(\omega) - d^{2}(\omega)a^{2}(\omega) \qquad (41)$$

Рассмотрим выражение для расчета значений амплитуд колебаний подрессоренной массы

$$z_{01} = q_0 \omega_{02}^2 \sqrt{\frac{\omega_{01}^4 + 4h_1^2 \omega^2}{\left[\omega_{01}^2 \omega_{02}^2 - (\omega_{01}^2 + \omega_{01}^2 \mu + \omega_{02}^2) \cdot \omega^2 + \omega^4\right]^2 + 4h_1^2 \omega^2 \left[\omega_{02}^2 - (1+\mu) \cdot \omega^2\right]^2}}$$

TRANSPORT



Рисунок 2 – Амплитудно-частотные характеристики перемещений и ускорений подрессоренной (а, б) и перемещений неподрессоренной (в) масс двухмассовой колебательной системы с кинематическим воздействием при отсутствии демпфировании в шине и различных уровнях демпфирования в подвеске: 1 –  $\Psi_1 = 0$ ; 2 –  $\Psi_1 = 0,2$ ; 3 –  $\Psi_1 = 0,35$ ; А, Б, В, Г, Д, А', Б', В', – инвариантные точки Источник: составлено авторами.



Рисунок 3 – Амплитудно-частотные характеристики деформаций шин (а) и подвески (б) в двухмассовой колебательной системе с кинематическим воздействием при отсутствии демпфирования в шине и различных величинах демпфирования в подвеске (составлено авторами):

1 –  $\psi_1 = 0$ ; 2 –  $\psi_1 = 0,2$ ; 3 –  $\psi_1 = 0,35$ ; *Е, Ж, 3 – инвариантные точки* Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Amplitude-frequency characteristics of deformations of tires (a) and suspension (b) in a two-mass oscillatory system with cinematic action in the absence of damping in the tire and various damping values in the suspension:

 $1 - \psi_1 = 0; 2 - \psi_1 = 0,2; 3 - \psi_1 = 0,35;$ *E*, *X*, 3 - *invariant points* Source: compiled by authors.

PART II

Используем обозначения:

$$a = \omega_{01}^{2};$$
  

$$b = 2\omega;$$
  

$$c = \omega_{01}^{2}\omega_{02}^{2} - (\omega_{01}^{2} + \omega_{01}^{2}\mu + \omega_{02}^{2}) \cdot \omega^{2} + \omega^{4};$$
  

$$d = 2\omega(\omega_{02}^{2} - (1 + \mu) \cdot \omega^{2}).$$

Отсюда получаем равенство для расчета инвариантных точек:

$$\omega_{01}^{2} \cdot 2\omega(\omega_{02}^{2} - (1+\mu) \cdot \omega^{2}) = \pm 2\omega \cdot (\omega_{01}^{2}\omega_{02}^{2} - (\omega_{01}^{2} + \omega_{01}^{2}\mu + \omega_{02}^{2}) \cdot \omega^{2} + \omega^{4}).$$
(42)

Первое очевидное решение  $\omega = 0$  на графиках точкой не обозначено. Найдём остальные решения. Рассмотрим два условия:

1) 
$$\omega_{01}^2 \cdot (\omega_{02}^2 - (1+\mu) \cdot \omega^2) = \omega_{01}^2 \omega_{02}^2 - (\omega_{01}^2 + \omega_{01}^2 \mu + \omega_{02}^2) \cdot \omega^2 + \omega^4$$
;  
2)  $\omega_{01}^2 \cdot (\omega_{02}^2 - (1+\mu) \cdot \omega^2) = -(\omega_{01}^2 \omega_{02}^2 - (\omega_{01}^2 + \omega_{01}^2 \mu + \omega_{02}^2) \cdot \omega^2 + \omega^4)$ .

В соответствии с этими условиями получим решения:

$$\omega_1 = \omega_{02}$$

$$\omega_{2} = \sqrt{\frac{2(1+\mu)\omega_{01}^{2} + \omega_{02}^{2} - \sqrt{4(1+\mu)^{2}\omega_{01}^{4} + 4(\mu-1)\omega_{01}^{2}\omega_{02}^{2} + \omega_{02}^{4}}{2}};$$

$$\omega_{3} = \sqrt{\frac{2(1+\mu)\omega_{01}^{2} + \omega_{02}^{2} + \sqrt{4(1+\mu)^{2}\omega_{01}^{4} + 4(\mu-1)\omega_{01}^{2}\omega_{02}^{2} + \omega_{02}^{4}}{2}}.$$
(43)

Расположив эти частоты в порядке возрастания, получим абсциссы, соответственно, точек А, Б и В. При тех же частотах существуют инвариантные точки на амплитудно-частотных характеристиках ускорений (точки A', Б', В' на рисунке 2, б).

Аналогично, используя выражения для расчета амплитуд перемещений неподрессоренной массы и деформаций шин, получим абсциссы инвариантных точек Г, Д, Е и Ж.

Амплитудно-частотные характеристики деформаций подвески точек пересечений не имеют, но имеют точку касания (точка 3 на рисунке 3, б), в которой амплитуды деформаций подвески при установившихся колебаниях постоянны, независимо от демпфирования в подвеске.

Рассмотрим выражение для расчета значений амплитуд деформаций шин:

$$x_{0} = q_{0} \sqrt{\frac{\omega^{4} \omega_{02}^{4}}{\left[\omega_{01}^{2} \omega_{02}^{2} - (\omega_{01}^{2} + \omega_{01}^{2} \mu + \omega_{02}^{2}) \cdot \omega^{2} + \omega^{4}\right]^{2} + 4h_{1}^{2} \omega^{2} \left[\omega_{02}^{2} - (1 + \mu) \cdot \omega^{2}\right]^{2}}}.$$
(43)

Корень квадратный в правой части выражения также можно представить в виде (36) при условии, что *b*( $\omega$ ) = 0. В этом случае получаем равенство для расчета инвариантной точки:

$$\omega^2 \omega_{02}^2 \cdot 2\omega (\omega_{02}^2 - (1+\mu) \cdot \omega^2) = 0.$$
(44)

Исключая очевидное решение  $\,\omega=0$  , получим

$$\omega_{02}^2 - (1+\mu) \cdot \omega^2 = 0 .$$
(45)



Из выражения (45) видно, что частота в инвариантной точке зависит от парциальной собственной частоты неподрессоренной массы и отношения подрессоренной и неподрессоренной масс, амплитуда в этой точке зависит от амплитуды воздействия и отношения подрессоренной и неподрессоренной масс:

$$\omega_3 = \frac{\omega_{02}}{\sqrt{1+\mu}}, \quad x_{03} = q_0 \frac{1+\mu}{\mu}.$$
(46)

Выражение (41) в этом случае имеет вид:

$$-\omega^4 \omega_{02}^4 \cdot 4\omega^2 (\omega_{02}^2 - (1+\mu) \cdot \omega^2)^2 .$$
 (47)

Выражение (47) отрицательно во всем диапазоне частот ω, что свидетельствует о том, что точка ( $ω_3$ ;  $x_{03}$ ) является точкой касания, и при увеличении демпфирования амплитуда деформаций подвески уменьшается во всем диапазоне частот.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Приведем результаты расчетов инвариантных точек:

$$\begin{split} & \omega_{A} = \sqrt{\frac{2(1+\mu)\omega_{01}^{2} + \omega_{02}^{2} - \sqrt{4(1+\mu)^{2}}\omega_{01}^{4} + 4(\mu-1)\omega_{01}^{2}\omega_{02}^{2} + \omega_{02}^{4}}{2}}{2}}, \\ & \omega_{B} = \omega_{02}, \\ & \omega_{B} = \sqrt{\frac{2(1+\mu)\omega_{01}^{2} + \omega_{02}^{2} + \sqrt{4(1+\mu)^{2}}\omega_{01}^{4} + 4(\mu-1)\omega_{01}^{2}\omega_{02}^{2} + \omega_{02}^{4}}{2}}{2}}, \\ & \omega_{\Gamma} = \sqrt{\frac{(\omega_{01}^{2}(1+\mu) + \omega_{02}^{2}) - \sqrt{(\omega_{01}^{2}(1+\mu) + \omega_{02}^{2})^{2} - 2(2+\mu)\omega_{01}^{2}\omega_{02}^{2}}}{2+\mu}}, \\ & \omega_{R} = \sqrt{\frac{(\omega_{01}^{2}(1+\mu) + \omega_{02}^{2}) + \sqrt{(\omega_{01}^{2}(1+\mu) + \omega_{02}^{2})^{2} - 2(2+\mu)\omega_{01}^{2}\omega_{02}^{2}}}{2+\mu}}, \\ & \omega_{E} = \sqrt{\frac{2\omega_{01}^{2}(1+\mu)^{2} + \omega_{02}^{2}(2+\mu) - \sqrt{4\omega_{01}^{4}(1+\mu)^{4} + 4\omega_{01}^{2}\omega_{02}^{2}(1+\mu)^{2}(\mu-2) + \omega_{02}^{4}(2+\mu)^{2}}{4(1+\mu)}}, \\ & \omega_{K} = \sqrt{\frac{2\omega_{01}^{2}(1+\mu)^{2} + \omega_{02}^{2}(2+\mu) + \sqrt{4\omega_{01}^{4}(1+\mu)^{4} + 4\omega_{01}^{2}\omega_{02}^{2}(1+\mu)^{2}(\mu-2) + \omega_{02}^{4}(2+\mu)^{2}}{4(1+\mu)}}, \\ & \omega_{3} = \frac{\omega_{02}}{\sqrt{1+\mu}}. \end{split}$$

Используя обозначение  $c_{_{0TH}} = \frac{\omega_{_{02}}^2}{\mu\omega_{_{01}}^2}$ , можно записать абсциссы инвариантных точек в виде относительных частот (см. рисунок 2, *a*, *b*, рисунок 3):

$$\begin{split} \iota_{1A} &= \sqrt{\frac{2(1+\mu) + \mu c_{_{OTH}} - \sqrt{4(1+\mu)^{2} + 4(\mu-1)\mu c_{_{OTH}} + \mu^{2}c_{_{OTH}}^{2}}{2}}, \\ \iota_{1B} &= \mu c_{_{OTH}}, \\ \iota_{1B} &= \sqrt{\frac{2(1+\mu) + \mu c_{_{OTH}} + \sqrt{4(1+\mu)^{2} + 4(\mu-1)\mu c_{_{OTH}} + \mu^{2}c_{_{OTH}}^{2}}}{2}, \\ \iota_{1B} &= \sqrt{\frac{2(1+\mu) + \mu c_{_{OTH}} - \sqrt{(1+\mu+\mu c_{_{OTH}})^{2} - 2\mu(2+\mu)c_{_{OTH}}}{2+\mu}}, \\ \iota_{1T} &= \sqrt{\frac{1+\mu+\mu c_{_{OTH}} - \sqrt{(1+\mu+\mu c_{_{OTH}})^{2} - 2\mu(2+\mu)c_{_{OTH}}}{2+\mu}}, \\ \iota_{1E} &= \sqrt{\frac{2(1+\mu)^{2} + \mu c_{_{OTH}}(2+\mu) - \sqrt{4(1+\mu)^{4} + 4\mu c_{_{OTH}}(1+\mu)^{2}(\mu-2) + \mu^{2}c_{_{OTH}}^{2}(2+\mu)^{2}}}{4(1+\mu)}}, \\ \iota_{1K} &= \sqrt{\frac{2(1+\mu)^{2} + \mu c_{_{OTH}}(2+\mu) + \sqrt{4(1+\mu)^{4} + 4\mu c_{_{OTH}}(1+\mu)^{2}(\mu-2) + \mu^{2}c_{_{OTH}}^{2}(2+\mu)^{2}}}{4(1+\mu)}}, \end{split}$$

Последнему случаю соответствует ордината в относительных величинах

$$K_{x3} = \frac{1+\mu}{\mu}.$$
 (50)

Диапазоны частот  $(0; \omega_A)$  и  $(\omega_B; \omega_B)$ , в которых увеличение демпфирования приводит к снижению амплитуд колебаний подрессоренной массы, можно назвать областями резонансов, а диапазоны  $(\omega_A; \omega_B)$  и  $(\omega_B; \infty)$  – межрезонансной и зарезонансной областями соответственно. В случае неподрессоренной массы инвариантные точки не выделяют явно резонансные, межрезонансные и зарезонансные области частот. В диапазонах частот  $(0; \omega_\Gamma)$  и  $(\omega_{\rm A}; \infty)$  увеличение демпфирования приводит к снижению амплитуд ее колебаний, а в диапазоне  $(\omega_{\rm C}; \omega_{\rm A})$ – к их существенному возрастанию.

Амплитудно-частотные характеристики деформаций шин при отсутствии в них демпфирования (см. рисунок 3, *a*) имеют две инвариантные точки, делящие частоты колебаний на три диапазона. В диапазонах частот (0;  $\omega_E$ ) и ( $\omega_{\pi}$ ; ∞) увеличение демпфирования приводит к уменьшению амплитуд деформаций шин, а в диапазоне ( $\omega_E$ ;  $\omega_{\pi}$ ) – к их увеличению.

Наличие на амплитудно-частотной характеристике больших амплитуд деформаций шин свидетельствуют о значительном риске отрыва шин от дороги в процессе движения автомобиля. Потеря контакта шин с дорогой ухудшает важные для безопасности автомобиля эксплуатационные свойства: устойчивость и управляемость движения, а также тормозные свойства.

Увеличение демпфирования в подвеске уменьшает амплитуды деформаций подвески, следовательно, снижает риск отрывов и пробоев подвески. Однако деформации подвески влияют на потери энергии в амортизаторах. Рассмотрим эти потери и влияние на них амплитуд деформаций подвески.

#### РАЗДЕЛ II ТРАНСПОРТ

Полная работа амортизатора в колебательной системе за цикл колебаний [4]:

$$A = \int_{0}^{\frac{2\pi}{\omega}} F_{\pi}(t) \dot{x}(t) dt$$
 (51)

Здесь  $F_{\mu}(t) = k_1 \dot{x}(t)$  – сила демпфирования,  $\dot{x} = x_0 \omega \cos(\omega t + \beta_{x/a})$  – скорость деформации подвески. Тогда

$$A = \int_{0}^{\frac{2\pi}{\omega}} k_1 \dot{x}^2(t) dt = k_1 x_0^2 \omega \pi.$$
 (52)

Используя формулу (33) для амплитуды деформаций подвесок в относительных величинах, получим

$$A = kq_0^2 \omega \pi \frac{\iota_1^4}{(1 - \iota_2^2 - \iota_2^2 \mu - \iota_1^2 + \iota_1^2 \iota_2^2)^2 + 4\psi_1^2 \iota_1^2 (1 - \iota_2^2 - \iota_2^2 \mu)^2}$$
(53)

или

$$A = m_1 q_0^2 \omega_{01}^2 \pi \frac{2\psi_1 \iota_1^5}{(1 - \iota_2^2 - \iota_2^2 \mu - \iota_1^2 + \iota_1^2 \iota_2^2)^2 + 4\psi_1^2 \iota_1^2 (1 - \iota_2^2 - \iota_2^2 \mu)^2}.$$
 (54)

Введем обозначение для относительной работы амортизатора за цикл колебаний:

$$A_{\rm oTH} = \frac{2A}{m_1 q_0^2 \omega_{01}^2}.$$
 (55)

 $\frac{m_1 q_0^2 \omega_{01}^2}{2} = \frac{c_1 q_0^2}{2}$  – энергия, запасенная в упругом элементе подвески при его дефор-Здесь мации на величину амплитуды кинематического воздействия.

Тогда относительная работа амортизатора за цикл колебаний:

$$A_{\rm oTH} = \frac{2\psi_1\iota_1^5 \cdot 2\pi}{(1 - \iota_2^2 - \iota_2^2\mu - \iota_1^2 + \iota_1^2\iota_2^2)^2 + 4\psi_1^2\iota_1^2(1 - \iota_2^2 - \iota_2^2\mu)^2}.$$
(56)

На рисунке 4 показана зависимость относительной работы амортизатора за цикл колебаний от относительной частоты кинематического воздействия і, при различных уровнях демпфирования в подвеске.

Как видно из формул (53), (54), (56) и из графиков на рисунке 4, работа (относительная работа) амортизатора и, следовательно, потери энергии в нем за цикл колебаний зависят от частоты колебаний и демпфирования в подвеске. С понижением демпфирования потери энергии возрастают в зонах обоих резонансов, а в межрезонансной и зарезонансной зонах уменьшаются. При этом с понижением демпфирования интервалы роста потерь энергии уменьшаются, поэтому графики зависимости потерь энергии от частоты колебаний не имеют инвариантных точек.

На рисунке 5 сопоставлены графики, характеризующие плавность хода, безотрывное качение колеса и потери энергии в подвеске.

Сопоставление графиков показывает, что:

1) диапазоны частот первого резонанса колебаний подрессоренной массы и деформаций шин практически совпадают (в силу близости абсцисс точек А и Е);

2) межрезонансная зона для деформаций шин значительно уже аналогичной зоны для перемещений и ускорений подрессоренной массы, поскольку абсциссы точек Б и Ж существенно различны;



Рисунок 4 – Зависимость относительной работы амортизатора за цикл колебаний от относительной частоты кинематического воздействия і, при различных уровнях демпфирования в подвеске: 1 –  $\psi_1=0,1$ ; 2 –  $\psi_1=0,2$ ; 3 –  $\psi_1=0,35$ Источник: составлено авторами.

Figure 4 – The dependence of the relative operation of the shock absorber during the oscillation cycle on the relative frequency of the cinematic effect of i1 at different levels of damping in the suspension : 1 –  $\psi_1=0,1;$  2 –  $\psi_1=0,2;$  3 –  $\psi_1=0,35$  . Source: compiled by authors.

3) повышение демпфирования в области первого резонанса и в области второго резонанса для подрессоренной массы приводит к повышению плавности хода на этих частотах, к стабилизации контакта колес с дорогой и к снижению потерь энергии в подвеске;

4) понижение демпфирования в межрезонансной области частот для деформаций шин приводит к повышению плавности хода, к стабилизации контакта колес с дорогой и к снижению потерь энергии в подвеске;

5) в диапазонах частот между точками Ж и Б, а также за точкой В (заштрихованные области на рисунке 5) возникают следующие противоречия: увеличение демпфирования приводит к стабилизации контакта колес с дорогой, но способствует снижению плавности хода; при этом тепловыделение в амортизаторах вблизи второго резонанса существенно снижается, а с увеличением частоты колебаний в зарезонансной области незначительно возрастает;

6) существенные противоречия между плавностью хода, с одной стороны, и стабильностью контакта колеса с дорогой, а также снижением тепловыделения и потерь энергии в амортизаторах, с другой стороны, возникают вблизи второго резонанса подрессоренной массы слева и справа; при увеличении частоты колебаний в зарезонансной зоне эти противоречия сглаживаются, и понижение демпфирования на этих частотах приводит к значительному повышению плавности хода, снижению тепловыделения, практически не влияя на контакт колеса с дорогой.

РАЗДЕЛ ІІ ТРАНСПОРТ



Рисунок 5 – Сопоставление графиков, характеризующих плавность хода, безотрывное качение колеса и потери энергии в подвеске при различных уровнях демпфирования в подвеске (составлено авторами): 11 –  $\psi_1 = 0,1; 2 - \psi_1 = 0,2; 3 - \psi_1 = 0,35$ Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Comparison of graphs characterizing, respectively, smooth running, continuous rolling of the wheel and energy loss in the suspension at different levels of damping in the suspension:

 $1 - \psi_1 = 0,1; 2 - \psi_1 = 0,2; 3 - \psi_1 = 0,35$ Source: compiled by authors.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведена расчетная схема и уравнения динамики двухмассовой колебательной системы, эквивалентной автомобильной подвеске. Предложена методика расчета инвариантных точек для одноопорных колебательных систем, в которых пересекаются или касаются амплитудно-частотные характеристики для различных уровней демпфирования. Рассчитаны частоты, соответствующие инвариантным точкам в двухмассовой колебательной системе. Предложено понятие «относительная работа амортизатора за цикл колебаний» и приведена формула для расчета относительной работы амортизатора в двухмассовой колебательной системе. Впервые проведён сравнительный анализ графиков, характеризующих плавность хода, отвечающую за сохранность грузов, безотрывное качение колеса и потери энергии в подвеске. Выявлено, что:

 диапазоны частот первого резонанса колебаний подрессоренной массы и деформаций шин практически совпадают (в силу близости абсцисс точек А и Е);

 межрезонансная зона для деформаций шин значительно уже аналогичной зоны для перемещений и ускорений подрессоренной массы, поскольку абсциссы точек Б и Ж существенно различны;

3) повышение демпфирования в области первого резонанса и в области второго резонанса для подрессоренной массы приводит к повышению плавности хода на этих частотах, к стабилизации контакта колес с дорогой и к снижению потерь энергии в подвеске;

4) понижение демпфирования в межрезонансной области частот для деформаций шин приводит к повышению плавности хода, к стабилизации контакта колес с дорогой и к снижению потерь энергии в подвеске;

5) в диапазонах частот между точками Ж и Б, а также за точкой В (заштрихованные области на рисунке 5) возникают следующие противоречия: увеличение демпфирования приводит к стабилизации контакта колес с дорогой, но способствует снижению плавности хода; при этом тепловыделение в амортизаторах вблизи второго резонанса существенно снижается, а с увеличением частоты колебаний в зарезонансной области незначительно возрастает;

6) существенные противоречия между плавностью хода, с одной стороны, и стабильностью контакта колеса с дорогой, а также снижением тепловыделения и потерь энергии в амортизаторах, с другой стороны, возникают вблизи второго резонанса подрессоренной массы слева и справа; при увеличении частоты колебаний в зарезонансной зоне эти противоречия сглаживаются, и понижение демпфирования на данных частотах приводит к значительному повышению плавности хода, снижению тепловыделения, практически не влияя на контакт колеса с дорогой.

Таким образом, проведенный сравнительный анализ показывает, что в одних диапазонах частот увеличение демпфирования одновременно улучшает плавностью хода, стабильность контакта колеса с дорогой и снижает потери энергии в амортизаторах, в других диапазонах частот увеличение демпфирования одновременно приводит все эти свойства к обратным последствиям, а в третьих диапазонах частот увеличение демпфирования вызывает противоречия между этими свойствами. В связи с этим в случае применения нерегулируемых подвесок не удается найти оптимальное демпфирование, удовлетворяющее всех трем условиям (плавности хода, безопасности и энергоэффективности) во всем частотном диапазоне транспортной вибрации. Поэтому нужно либо находить компромиссное решение, частично удовлетворяющее всем этим условиям, либо разрабатывать адаптивные подвески с саморегулируемыми характеристиками, которые автоматически меняют сопротивление в зависимости от режимов колебаний. Кроме того, перспективным направлением является разработка подвесок с регулированием демпфирования в цикле колебаний, что позволяет существенно уменьшить потери энергии в подвеске при одновременном повышении ее виброзащитных свойств.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хачатуров А. А. Динамика системы «дорога – шина – автомобиль – водитель» / А. А. Хачатуров, Л. В. Афанасьев, В. С. Васильев [и др.]; под ред. А. А. Хачатурова. М.: Машиностроение, 1976. 535 с.

2. Ротенберг Р. В. Подвеска автомобиля. Колебания и плавность хода. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1972. 392 с.

3. Дербаремдикер А. Д. Гидравлические амортизаторы автомобилей. М.: Машиностроение, 1969. 236 с.

4. Дербаремдикер А. Д. Амортизаторы транспортных машин. М.: Машиностроение, 1985. 200 с.

5. Ротенберг Р. В. Подвеска автомобиля и его колебания. 2-е изд. М.: Машгиз, 1960. 356 с.

6. Ден-Гартог, Дж. П. Механические колебания. М.: Физматгиз, 1960. 580 с.
7. Яценко Н. Н., Прутчиков О. К. Плавность хода грузовых автомобилей. М.: Машиностроение, 1969. 219 с.

8. Силаев А. А. Спектральная теория подрессоривания транспортных машин. М.: Машиностроение, 1972. 192 с.

9. Барский И. Б., Анилович В. Я., Кутьков Г. М. Динамика трактора. М.: Машиностроение, 1973. 280 с.

10. Успенский И. Н., Мельников А. А. Проектирование подвески автомобиля. М.: Машиностроение, 1976. 168 с.

11. Фролов К. В., Фурман Ф. А. Прикладная теория виброзащитных систем. М.: Машиностроение, 1980. 276 с.

12. Вонг Дж. Теория наземных транспортных средств: пер. с англ. М.: Машиностроение, 1982. 284 с.

13. Рябов И.М. Распределение энергии в цикле колебаний подвески АТС // Справочник. Инженерный журнал. 1998. № 4. С. 31–33.

14. Рябов И. М., Чернышов К. В., Поздеев А. В. Energy Analysis of Vehicle Suspension Oscillation Cycle // Procedia Engineering. Vol. 150: 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016) / ed. by A.A. Radionov. [Elsevier publishing], 2016. P. 384-392.

15. Ryabov I. M., Novikov V.V., Pozdneev A.V. Efficiency of Shock Absorber in Vehicle Suspension // Procedia Engineering. Vol. 150: 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016) / ed. by A.A. Radionov. [Elsevier publishing], 2016. P. 354-362.

16. Рябов И. М. Методика определения условий и продолжительности отрывов колес автомобиля от дороги // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт / Волгоградский государственный технический университет. Волгоград, 2017. С. 36–43.

17. Novikov V. V., Pozdneev A. V., Chernyshov K. V., Ryabov I. M., Diakov A., Chutkov K. Analysis of the current state of research in the field of improving the smooth ride of vehicles equipped with suspension // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 820: Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles (MMBC) 2019 (Moscow, Russian Federation, 1-2 October, 2019). [IOP Publishing], 2020. 8 p. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/820/1/012035. URL: https:// iopscience.iop.org/issue/1757-899X/820/1.

18. Новиков В. В. Виброзащитные свойства подвесок автотранспортных средств: монография / В. В. Новиков, И. М. Рябов, К. В. Чернышов; ВолгГТУ. 2-е изд., испр. и доп. Москва; Вологда, 2021. 384 с.

#### REFERENCES

1. Xachaturov A.A., Afanas`ev L. V., Vasil`ev V. S. et al. *Dinamika sistemy` «doroga – shina – avtomobil` – voditel`»* [Dynamics of the "road– tire – car –driver" system]. Moscow, Mashinostroenie, 1976, 535 p. (in Russ.) 2. Rotenberg R. V. *Podveska avtomobilya. Kolebaniya i plavnost` xoda* [The suspension of the car. Oscillation and smoothness of the course]. Moscow, Mashinostroenie, 1972, 392 p. (in Russ.)

3. Derbaremdiker A. D. *Gidravlicheskie amortizatory*`*avtomobilej* [Hydraulic shock absorbers of cars]. Moscow, Mashinostroenie, 1969, 236 p. (in Russ.)

4. Derbaremdiker A. D. *Amortizatory` transportny`x mashin* [Shock absorbers of transport vehicles]. Moscow, Mashinostroenie, 1985, 200 p. (in Russ.)

5. Rotenberg R. V. *Podveska avtomobilya i ego kolebaniya* [The suspension of the car and its vibrations]. Moscow, Mashgiz, 1960, 356 p. (in Russ.)

6. Den-Gartog G. P. *Mexanicheskie kolebaniya* [Mechanical vibrations]. Moscow, Fizmatgiz, 1960. 580 p. (in Russ.)

7. Yacenko N. N., Prutchikov O. K. *Plavnost` xoda gruzovy`x avtomobilej* [Smooth running of trucks]. Moscow, Mashinostroenie, 1969, 219 p. (in Russ.)

8. Silaev A. A. Spektral naya teoriya podressorivaniya transportny x mashin [Spectral theory of springing transport vehicles]. Moscow, Mashinostroenie, 1972, 192 p. (in Russ.)

9. Barskij I. B., Anilovich V. Ya., Kut`kov G. M. *Dinamika traktora* [Tractor dynamics]. Moscow, Mashinostroenie, 1973, 280 p. (in Russ.)

10. Uspenskij I. N., Mel`nikov A. A. *Proektirovanie podveski avtomobilya* [Car suspension design]. Moscow, Mashinostroenie, 1976, 168 p.

11. Frolov K. V., Furman F. A. *Prikladnaya teoriya vibrozashhitny'x sistem* [Applied theory of vibration protection systems]. Moscow, Mashinostroenie, 1980, 276 p. (in Russ.)

12. Vong G. *Teoriya nazemny*'x *transportny*'x *sredstv* [Theory of land vehicles]. Moscow, Mashinostroenie, 1982, 284 p.

13. Ryabov, I. M. et al. *Raspredelenie* e`nergii v cikle kolebanij podveski ATS [Energy distribution in the oscillation cycle of the land vehicles suspension]. *Spravochnik. Inzhenerny`j zhurnal.* 1998; 4: 31-33. (in Russ.)

14. Ryabov, I. M., Chernyshov K. V., Pozdeev A. V. Energy Analysis of Vehicle Suspension Oscillation Cycle. Procedia Engineering. Vol. 150: 2nd *International Conference on Industrial Engineering* (ICIE-2016) / ed. by A.A. Radionov. [Elsevier publishing]. 2016. pp. 384-392. (in Russ.)

15. Ryabov I. M., Novikov, V. V., Pozdeev A. V. Efficiency of Shock Absorber in Vehicle Suspension. Procedia Engineering. Vol. 150: 2nd *International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016)* / ed. by A.A. Radionov. [Elsevier publishing], 2016. pp. 354-362.

16. Ryabov I. M. et al. Metodika opredeleniya uslovij i prodolzhitel`nosti otry`vov koles avtomobilya ot dorogi [Methodology for determining the conditions and duration of separation of car wheels from the road]. *E`nergo- i resursosberezhenie: promy`shlennost` i transport.* Volgograd, 2017: 36-43. (in Russ.)

17. Novikov V. V., Pozdeev A. V., Chernyshov K. V., Ryabov, I. M., Diakov A. S., Chutkov K. Analysis of the current state of research in the field of improving the smooth ride of vehicles equipped with suspension. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 820: Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles (MMBC) 2019 (Moscow, Russian Federation, 1-2 October, 2019). [IOP Publishing], 2020. 8 p. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/820/1/012035. URL: https://iopscience.iop.org/ issue/1757-899X/820/1.

18. Novikov V. V., Ryabov, I. M., Chernyshov K. V. *Vibrozashhitny`e svojstva podvesok avtotransportny`x sredstv* [Vibration-proof properties of suspensions of motor vehicles]. Moscow, Vologda, 2021, 384 p. (in Russ.)

#### ВКЛАД СОАВТОРОВ

Чернышов К. В. Расчет инвариантных точек и потерь энергии.

Новиков В. В. Заключение, выводы. Санжапов Р. Р. Введение, выводы. Котов В. В. Построение графиков, оформле-

ние.

#### **CO-AUTHORS' CONTRIBUTION**

Konstantin V. Chernyshov. Calculation of invariant points and energy losses.

Viacheslav V. Novikov. Conclusion, conclusions. Rustam R. Sanzhapov. Introduction, conclusions. Vladislav V. Kotov. Graphing and design.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чернышов Константин Владимирович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобиля».

Новиков Вячеслав Владимирович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Автоматические установки».

Санжапов Рустам Рафильевич — канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Автомобильный транспорт».

Котов Владислав Владимирович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобиля».

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Konstantin V. Chernyshov, Cand. of Sci., Associate Professor of the Technical Operational and Automobile Repair Department.

Viacheslav V. Novikov, Dr. of Sci., Professor of the Automatic Installations Department.

Rustam R. Sanzhapov, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor of the Automobile Transport Department.

Vladislav V. Kotov, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor of the Technical Operational and Automobile Repair Department.



УДК 656.1 https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-278-288 https://elibrary.ru/VNYMSM Научная статья



## ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ С УЧЁТОМ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

И. Н. Якунин<sup>1</sup>, А. П. Фот<sup>2</sup>, Н. Н. Якунин<sup>2</sup>, А. Ф. Фаттахова<sup>2</sup> <sup>1</sup>АО «Биотехальянс», г. Москва, Россия, <sup>2</sup>Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия, btarf@btarf.com, https://orcid.org/0000-0003-4932-5714 fot@mail.osu.ru, https://orcid.org/0000-0002-2971-7908 yakunin-n@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-7240-4982 alm-fed@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7244-7184 <sup>\*</sup>ответственный автор

#### АННОТАЦИЯ

Актуальность. Аварийность на автомобильном транспорте в летний период года в условиях высоких температур окружающей среды имеет устойчивую тенденцию к увеличению. Основными причинами такого положения являются изменения в состоянии водителей и низкая эффективность климатических установок части автотранспортных средств. Автотранспортные предприятия учитывают в своей деятельности условия внешней среды и корректируют технологию транспортного процесса. Такими условиями внешней среды являются гололед, туман, осадки, низкая температура воздуха и другие. Однако высокая температура окружающей среды в состав такого списка не введена. В этой связи изучение особенностей функционирования автотранспортных предприятий в условиях высоких температур окружающей среды и разработка на этой основе функциональной модели обеспечения безопасности дорожного движения является актуальной задачей.

Целью настоящей работы является повышение безопасности перевозок автомобильным транспортом на основе разработанной функциональной структуры службы безопасности дорожного движения автотранспортного предприятия, учитывающей высокую температуру окружающей среды.

**Методы.** Работа основана на синтезе общенаучных методов исследования, в состав которых вошли положения системного анализа, а также положения теории транспортных процессов, технической эксплуатации автомобилей.

**Результаты.** Результатом работы стала разработанная функциональная модель службы безопасности дорожного движения автотранспортного предприятия, согласно которой она наделена контрольными и распорядительными функциями в отношении деятельности службы кадрового обеспечения, технической службы и службы эксплуатации по вопросам, связанным с безопасностью дорожного движения. Эта модель отличается от известных тем, что содержит функции реагирования на высокую температуру внешней среды. Разработан алгоритм функционирования службы безопасности дорожного движения в условиях высокой температуры внешней среды, предотвращающий её влияние на повышение агрессивности вождения и низкую эффективность климатических установок части автотранспортных средств. Эти положения составляют научную новизну работы.

Практическая ценность работы состоит в совершенствовании инструментария автотранспортного предприятия, направленного на предотвращение увеличения аварийности в условиях высоких температур окружающего воздуха.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** автомобильный транспорт, безопасность дорожного движения, организационно-функциональная структура, служба безопасности движения, оперативное управление, высокие температуры воздуха.

# Статья поступила в редакцию 15.02.2022; одобрена после рецензирования 04.03.2022; принята к публикации 12.04.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

© Якунин И. Н., Фот А. П., Якунин Н. Н., Фаттахова А. Ф., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.



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

Для цитирования: Якунин И. Н., Фот А. П., Якунин Н. Н., Фаттахова А. Ф. Функциональная модель обеспечения безопасности дорожного движения автотранспортного предприятия с учётом высоких температур окружающей среды // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 2(84).С. 278-288. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-278-288

https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-278-288 https://elibrary.ru/VNYMSM Original article

## FUNCTIONAL MODEL OF ROAD SAFETY FOR MOTOR TRANSPORT ENTERPRISE WITH ACCOUNT OF HIGH ENVIRONMENTAL TEMPERATURES

Ivan N. Yakunin<sup>1</sup>, Andrey P. Fot<sup>2</sup>, Nikolay N. Yakunin<sup>2</sup>, Almira F. Fattakhova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>AO Biotechalliance, Moscow, Russia Orenburg State University, Orenburg, Russia btarf@btarf.com, https://orcid.org/0000-0003-4932-5714 yakunin-n@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-7240-4982 alm-fed@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7244-7184 \*corresponding author

#### ABSTRACT

**Introduction.** The accident rate in road transport in the summer period of the year in conditions of high ambient temperatures has a steady upward trend. The main reasons for this situation are changes in the condition of drivers and the low efficiency of the climate systems of some vehicles. Motor transport enterprises take into account the conditions of the external environment in their activities and adjust the technology of the transport process. Such environmental conditions are ice, fog, precipitation, low air temperature and others. However, high ambient temperature is not included in such a list. In this regard, the study of the features of the functioning of a motor transport enterprise in conditions of high ambient temperatures and the development on this basis of a functional model for ensuring road safety is an urgent task.

The purpose of this work is to improve the safety of road transport on the basis of the development of a functional structure of the road safety service of a motor transport enterprise, taking into account the high ambient temperature. **Methods.** The work is based on the synthesis of general scientific research methods, which included the provisions of system analysis, as well as the provisions of the theory of transport processes, the technical operation of vehicles. **Results.** The result of the work was the developed functional model of the road safety service of a motor transport enterprise, according to which the road safety service is endowed with control and administrative functions in relation to the activities of the personnel service, technical service and operation service on issues related to road safety. This model differs from the known ones in that it contains functions for responding to high ambient temperatures. An algorithm has been developed for the functioning of the traffic safety service in conditions of high ambient temperature, which prevents its influence on the increase in the aggressiveness of driving cars and the low efficiency of the climate systems of a part of vehicles. These provisions constitute the scientific novelty of the work. **Discussion and conclusion.** The practical value of the work lies in the improvement of the tools of the motor transport enterprise, aimed at preventing an increase in the accident rate in conditions of high ambient temperatures.

**KEYWORDS:** road transport, road safety, organisational and functional structure, traffic safety service, operational management, high air temperatures.

## The article was submitted 15.02.2022; approved after reviewing 04.03.2022; accepted for publication 12.04.2022.

#### 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.

© Yakunin I. N., Fot A. P., Yakunin N. N., Fattakhova A. F., 2022



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



*For citation:* Yakunin I. N., Fot A. P., Yakunin N. N., Fattakhova A. F. Functional model of road safety for motor transport enterprise with account of high environmental temperatures. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2022; 19 (2): 278-288. https://doi.org/10.26518/2071-7296- 2022-19-2-278-288

#### введение

Обеспечение безопасности дорожного движения (БДД) актуально, задачей начиная с момента появления автомобиля и по настоящее время. Создан мощный научный, методологический фундамент для решения этой проблемы. Вместе с тем нельзя утверждать о завершенности его формирования ввиду постоянно развивающихся требований к безопасности транспортного процесса, методам и средствам предотвращения неблагоприятных событий.

Анализ статистики дорожно-транспортных происшествий (ДТП) в Российской Федерации позволил выявить увеличение количества ДТП, приходящихся на единицу подвижного состава в регионах, в летний период года [1]. Интенсивность увеличения этого показателя, а также абсолютные его значения существенно отличаются в различных регионах. Отмеченные факты имеют важное значение для организации работы автотранспортных предприятий в условиях высоких температур окружающего воздуха. Ранее учитывались различные ограничения на осуществление транспортного процесса по показателям внешней среды. К ним отнесены гололед, туман, осадки, низкая температура воздуха и другие. Однако высокая температура окружающей среды в состав такого списка не введена. В этой связи изучение особенностей функционирования автотранспортного предприятия (АТП) в условиях высоких температур окружающей среды и разработка на этой основе функциональной модели обеспечения безопасности дорожного движения автотранспортного предприятия с учётом таких опасных особенностей является актуальной задачей.

Целью настоящей работы – повышение безопасности перевозок автомобильным транспортом на основе разработанной функциональной структуры службы безопасности дорожного движения автотранспортного предприятия, учитывающей высокую температуру окружающей среды.

Исследованию безопасности дорожного движения, предотвращению дорожно-транспортных происшествий, профилактике нарушений правил дорожного движения посвяще-

ны труды многих отечественных и зарубежных ученых. Накоплен богатый практический опыт в этом направлении. Обеспечение безопасности дорожного движения в качестве одной из важнейших социальных функций базируется на Конституции страны. Федеральный закон от 10.12.1995N 196-ФЗ «О безопасности дорожного движения» развивает эту функцию и формулирует задачу предупреждения дорожно-транспортных происшествий, снижения тяжести их последствий в качестве приоритетной для автомобильного транспорта. Это подтверждается сформулированным в законе принципом приоритета жизни и здоровья граждан, участвующих в дорожном движении, над экономическими результатами хозяйственной деятельности. В этом законе, а также в приказе Минтранса России от 30.04.2021 N 145 «Об утверждении Правил обеспечения безопасности перевозок автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом» сформулированы основные направления обеспечения безопасности дорожного движения.

Проблеме управления системой безопасности дорожного движения посвящены работы известных ученых-специалистов в этой области Г. И. Клинковштейна, В. И. Коноплянко, В. В. Зырянова, О. П. Гуджояна, А. Э. Горева, Е. М. Олещенко, А. И. Петрова, С. В. Жанказиева и др.

Учеными В. А. Федоровым, П. А. Кравченко [2] сделан вывод «о необходимости введения в Закон<sup>1</sup> отсутствующего в нём термина «система обеспечения БДД», что равнозначно старту процесса создания правовой базы для перевода основной задачи закона – предупреждения ДТП – в область строгих, поддающихся количественной оценке и давно общепринятых в мировой практике механизмов проектирования, оценки свойств и эксплуатации (применения по назначению) сложных или больших систем, к классу которых относится и система обеспечения БДД».

В работе [3] представлены ключевые аспекты обсуждения и дальнейшей корректировки управляющих воздействий энтропийного характера в области обеспечения безопасности дорожного движения, результаты исследования которых имеют перспективные инженерные приложения.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Федеральный закон «О безопасности дорожного движения» от 10.12.1995 N 196-ФЗ.

В работе [4] управление безопасностью дорожного движения рассматривается с точки зрения комплексного подхода к участникам дорожного движения, транспортной инфраструктуре и транспортным средствам, успешная реализация которого зависит от последовательных мероприятий, укладывающихся в схему: стратегия-технология-образование.

В работе авторов [5] описана структурно-функциональная модель общегосударственной многоканальной системы обеспечения безопасности дорожного движения как основа для обеспечения всех функциональных свойств и процедуры разбивки на различные функционально обособленные подсистемы на любом уровне иерархии.

Учёные А. Э. Горев и Е. М. Олещенко отмечают, что «при системном анализе, исследовании БДД и выработке соответствующих решений требуется детальное рассмотрение всех видов деятельности АТП, но в первую очередь тех из них, которые оказывают наиболее существенное влияние на БДД. К такой деятельности следует отнести деятельность по обеспечению надежности водителей как элемента системы водитель-автомобиль-дорога; поддержание квалификации персонала, обслуживающего технические подсистемы АТП на уровне предъявляемых к ним требований; деятельность по техническому обслуживанию и ремонту, контролю технического состояния транспортных средств и технических средств производственной базы автомобильного парка; деятельность по получению и своевременному информированию о дорожных условиях; деятельность по планированию, управлению и контролю соответствия элементов системы водитель-автомобиль-дорога условиям обеспечения БДД и используемым для этого техническим средствам. Функциональные особенности всех перечисленных подсистем образуют множество факторов обеспечениям БДД в АТП. Управление уровнем БДД в АТП формально осуществляется путём воздействия на эти факторы»<sup>2</sup>.

Анализ данных документов убеждает в важности и сложности решения вопросов обеспечения БДД.

Авторы [6] отмечают, что существует неиспользованный потенциал для повышения безопасности дорожного движения путём сосредоточения внимания на организационном управлении безопасностью, т. е. на сочетании формальных и неформальных организационных мер для обеспечения безопасности в автотранспортных организациях. Формальные аспекты относятся к структуре безопасности («как всё должно быть сделано»), как описано в процедурах, организационных схемах и т. д. Неформальные аспекты относятся к культуре безопасности («как всё делается на самом деле»), на что указывают общие методы работы, общие способы мышления, приверженность руководителей и сотрудников безопасности и т. д.

Основные виды деятельности по обеспечению безопасности дорожного движения в сфере автомобильных перевозок подразделяются на комплексы обеспечения: профессиональной надежности водительского состава, транспортных средств в технически исправном состоянии, безопасных условий перевозок грузов и пассажиров. Таким образом, методы решения и ответственность за эффективность исполнения мероприятий по безопасности дорожного движения на уровне АТП отнесены к трём службам: службе кадрового обеспечения, технической службе и службе эксплуатации. В Общесоюзных нормах технологического проектирования предприятий автомобильного транспорта<sup>3</sup> отдел безопасности движения отнесён к управлению эксплуатационной службы по распределению персонала по функциям (п.1.11.6).

Исследованию работы службы кадрового обеспечения с позиции влияния на безопасность дорожного движения посвящены труды [7, 8, 9] и других авторов. В них исследованы вопросы профессиональной подготовки и выбора водительского состава, а также повышения их профессионального мастерства. В работах представлен анализ нарушений правил безопасности дорожного движения молодыми водителями и обзор мер по улучшению подготовки молодых водителей для их долгосрочной безопасной работы на дорогах.

Исследованию влияния технического состояния подвижного состава, за которое отвечает техническая служба предприятия, посвящены труды [10, 11, 12]. В статье [10]



<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Горев А. Э. Организация автомобильных перевозок и безопасность движения: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / А. Э. Горев, Е. М. Олещенко. 2-е изд., испр. М.: Издательский центр «Академия». 2008. 256 с.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> «ОНТП-01-91. РД 3107938-0176-91. Общесоюзные нормы технологического проектирования предприятий автомобильного транспорта» (утв. протоколом концерна «Росавтотранс» от 07.08.1991 N 3).

исследуется проблема минимизации влияния технического состояния транспортных средств и технологического проектирования производственной базы автотранспортных предприятий на уровень дорожно-транспортных происшествий. В работах [11, 12] отражено влияние состояния шин и тормозной системы на безопасность транспортного процесса. При этом техническая служба в практической плоскости нацелена на выполнение требований технического регламента таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств».

В работе [1] определена прямая зависимость аварийности от количества дней в месяце со среднесуточной температурой, превышающей 25 °С. Данное значение является верхним пределом в диапазоне комфортных значений температуры<sup>4</sup>.

Исследованию функционирования службы эксплуатации в сложных погодных условиях посвящены труды [13, 14, 15, 16, 17, 18]. Отмечается, что неблагоприятный микроклимат рабочего места водителя в условиях высоких температур окружающего воздуха негативно влияет на него и увеличивает вероятность аварийных ситуаций, однако в настоящее время эффекты высоких температур и солнечной активности автотранспортными предприятиями при работе с водителями должным образом не учитываются.

В работе [1] установлены закономерности этого процесса для нескольких регионов страны. Эти обстоятельства, на наш взгляд, носят более широкий характер по отношению к аварийности отдельного автотранспортного предприятия, так как автотранспортное предприятие является частью региональной транспортной системы. Разработанная функциональная модель направлена на предотвращение этой неблагоприятной тенденции на уровне АТП.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа основана на синтезе общенаучных методов исследования, в состав которых вошли положения системного анализа, а также теории транспортных процессов, технической эксплуатации автомобилей.

Учитывая приведённые нормативные регламентации о приоритете безопасности дорожного движения, разработана функциональная модель (рисунок 1) обеспечения безопасности дорожного движения АТП.



Рисунок 1 – Схема функциональной модели обеспечения безопасности дорожного движения автотранспортного предприятия Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Scheme of the functional security model road transport company Source: compiled by the authors.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Буракова Л. Н. Температура воздуха в салоне автомобиля и ее влияние на безопасность дорожного движения // Л. Н. Буракова, Е. А. Черменина, И. А. Анисимов: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции «Организация и безопасность дорожного движения». Тюмень: ТюмГНГУ. 2013. С. 24–28.

#### Таблица 1

Контрольные и распорядительные функции службы безопасности дорожного движения в отношении деятельности других служб АТП Источник: составлено авторами.

#### Table 1

Control and administrative functions of the road safety service in relation to the activities of other motor transport enterprises services Source: compiled by the authors.

Nº	Контрольные и распорядительные функции службы БДД в отношении:			
	службы кадрового обеспечения	технической службы	службы эксплуатации	
1	Организация и проведение медицинских осмотров водителей при приеме на работу, перед рейсами и после рейсов	Организация своевременного и полного технического обслуживания автотранспортных средств	Исполнение требований, связанных с режимом труда и отдыхом водителей	
2	Проведение мероприятий по совершенствованию навыков водителей при оказании первой медицинской помощи	Обеспечение соответствия технического состояния автотранспортных средств требованиям безопасности	Обеспечение межсменного хранения автотранспортных средств в установленном порядке	
3	Организация стажировок водителей, их переподготовка	Организация и полнота оснащения автотранспортных средств тахографами	Обеспечение выполнения требований при специальных перевозках, организованных групп детей	
4	Обеспечение соответствия водителей квалификационным требованиям	Организация и проведение предрейсовых и послерейсовых осмотров автотранспортных средств	Организация предотвращения допуска к управлению автотранспортными средствами водителей с иностранными водительскими удостоверениями	

#### Таблица 2

Функции службы безопасности дорожного движения АТП Источник: составлено авторами.

#### Table 2

283

Functions of the motor transport enterprises road safety service Source: compiled by the authors.

Функции, регламентируемые нормативными документами	Функции оперативного и ситуационного реагирования на опасные проявления внешней среды
Анализ и устранение причин ДТП И ПДД. Контроль выполнения правил безопасности движения на маршруте. Организация транспортного процесса в соответствии с требованиями БДД	<ol> <li>Контроль неблагоприятных метеорологических и дорожных условий на время выполнения транспортной работы.</li> <li>Оценка неблагоприятных метеорологических и дорожных условий на краткосрочную перспективу.</li> <li>Разработка требований к службам АТП, направленных на предотвращение ДТП и нарушений ПДД, вызванных</li> <li>неблагоприятными метеорологическими и дорожными условиями</li> </ol>



Рисунок 2 – Алгоритм реагирования службы безопасности дорожного движения на высокую температуру внешней среды Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Algorithm for the response of the road safety service to high ambient temperature Source: compiled by the authors.

284

Модель содержит четыре функциональных блока, представленных службой кадрового обеспечения, технической службой, службой эксплуатации и службой безопасности дорожного движения.

Эти службы выполняют свои штатные обязанности, связанные с безопасностью дорожного движения. Они взаимодействуют между собой согласно установленным процедурам. При этом служба безопасности дорожного движения осуществляет контрольные и распорядительные функции в отношении деятельности трёх других служб по вопросам, связанным с безопасностью дорожного движения. В таблице 1 приведено распределение таких функций.

Кроме вышеназванных контрольных и распорядительных функций, служба безопасности дорожного движения (таблица 2) имеет функции, которые относятся исключительно к её компетенции. Эти функции можно объединить в две группы. Первая группа объединяет функции, регламентируемые нормативными документами, вторая группа содержит функции оперативного и ситуационного реагирования на опасные проявления внешней среды.

Анализ практической деятельности АТП свидетельствует об удовлетворительном исполнении функций, регламентируемых нормативными документами. Ведётся соответствующая документация. Такое положение стало следствием лицензионной и разрешительной деятельности государственных транспортных властей. Функции оперативного и ситуационного реагирования на опасные проявления внешней среды декларированы, осознаётся их значимость, однако обоснованного методического обеспечения, направленного на минимизацию рисков в таких условиях, зачастую нет. Устранение такого положения содержит в себе существенные резервы повышения безопасности транспортного процесса.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ

Особенности реагирования на опасные проявления (рисунок 2) внешней среды, обусловленные высокой температурой, состоят в следующем:

1. Постоянный контроль за состоянием безопасности транспортного процесса водителями с использованием информации системы ГЛОНАСС.

2. Ежедневный контроль за температурой окружающего воздуха.

3. Информирование водителей об ожи-

даемой высокой температуре окружающего воздуха во время выполнения транспортной работы.

4. Эксплуатация автомобилей, оборудованных кондиционером, системой «климат–контроль» или без них.

5. Проверка эффективности работы климатической установки автомобиля.

6. Выделение дополнительного количества топлива для обеспечения работы климатической установки.

7. Выявление списка водителей, имеющих склонность к опасному вождению в условиях высоких температур окружающего воздуха с использованием разработанной методики оценки склонности водителей к увеличению нарушений правил дорожного движения в условиях высоких температур. В методике используется сравнение количества нарушений правил дорожного движения при умеренных и высоких температурах.

8. Отстранение от транспортной работы водителей, имеющих склонность к опасному вождению в условиях высоких температур.

9. Повышение квалификации водителя, применение мер дисциплинарного воздействия.

10. Проверка водителя на тренажере для дальнейшего допуска его к транспортной работе.

Основываясь на изученных положениях, можно утверждать о разработанности функциональной структуры службы безопасности дорожного движения автотранспортного предприятия, которая состоит из трёх основных блоков:

- контрольные и распорядительные функции в отношении деятельности службы кадрового обеспечения; технической службы и службы эксплуатации по вопросам, связанным с безопасностью дорожного движения;

- функции службы безопасности дорожного движения автотранспортного предприятия, регламентируемые нормативными документами в отношении этой службы;

- функции оперативного и ситуационного реагирования на опасные проявления внешней среды.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Существование проблемы увеличения аварийности на автомобильном транспорте требовало оперативного реагирования на базе научно обоснованных методических решений. В результате анализа современного состояния

вопроса в научной литературе и передового опыта автотранспортных предприятий была разработана функциональная модель обеспечения безопасности дорожного движения автотранспортного предприятия, согласно которой служба безопасности дорожного движения наделена контрольными и распорядительными функциями в отношении деятельности службы кадрового обеспечения, технической службы и службы эксплуатации по вопросам, связанным с безопасностью дорожного движения. Эта модель отличается от известных тем, что содержит функции реагирования на высокую температуру внешней среды. Разработан алгоритм функционирования службы безопасности дорожного движения в условиях высокой температуры внешней среды, предотвращающий её влияние на повышение агрессивности вождения и низкую эффективность климатических установок части автотранспортных средств.

Полученные результаты позволяют заключить о создании теоретических и методических оснований для предотвращения негативной тенденции увеличения количества дорожно-транспортных происшествий в жаркое время года. Эти результаты важны для практического использования автотранспортными предприятиями, что способно существенно повысить безопасность транспортного процесса.

Направления дальнейших исследований связаны с изучением расширенного списка факторов высоких температур окружающего воздуха, способных вызвать повышенную аварийность на автомобильном транспорте, и дальнейшим развитием методического обеспечения, направленного на безопасность автотранспортной деятельности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Якунин И. Н., Меньших О. М., Шунгулов Д. М. Исследование влияния высокой температуры окружающей среды на безопасность автотранспортного процесса // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2019. № 7. С.138–145.

2. Федоров В. А., Кравченко П. А. Кардинальное совершенствование законодательного обеспечения деятельности по предупреждению ТП в России // Транспорт РФ. 2013. №1(44) С. 8–13.

3. Kolesov V., Petrov A. System dynamics of process organization in the sphere of traffic safety assurance // System and digital technologies for ensuring traffic safety 36, 2018. pp. 286-294. https:// doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.085

4. Sakhapov R. and Nikolaeva R. Traffic safety

system management // System and digital technologies for ensuring traffic safety 36, 2018. pp.676-681 https:// doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.126

5. Kravchenko P and Oleshchenko E. Mechanisms of Functional Properties Formation of Traffic Safety Systems // 12th International Conference on Road Organization and Safety in Big Cities 2017, pp.367-372. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.01.051

6. Naevestad T.O. Elvebakk B and Phillips, RO The safety ladder: developing an evidence-based safety management strategy for small road transport companies // 2018 | TRANSPORT REVIEWS 38 (3), pp. 372-393

7. Tomic I. and Barisic L. Analysis of improving Traffic safety for young drivers // May 2019 | Zbornik veleucilista u rijeci-journal of the polytechnics of rijeka 7 (1). pp.375-390. https://doi.org/10.31784/zvr.7.1.21

8. Newnam, S and Muir, C. Reforming the future of workplace road safety using systems-thinking workplace road safety surveillance // Jun 2021 | Safety Science 138.

9. Adesiyun, A; Cocu, X; (...); Saleh, P. Common standards for training of experts on road safety - relevance for secondary roads // 1st International Conference on Traffic and Transport Engineering (ICTTE) / 2012. pp.143-148.

10.Nikolay Verevkin, Evgeniy Lavrentyev, Igor Chernyaev, Dmitriy Gurin. Method of Providing Safe Technical Condition of Vehicles by Technological Design of Enterprises //12th International Conference «Organization and Traffic Safety Management in large cities», SPbOTSIC-2016, 28-30 September 2016, St. Petersburg, Russia.

11. Orynycz O. Tucki, K. Gola A. Evaluation of the Brake's Performance Dependence Upon Technical Condition of Car Tires as a Factor of Road Safety Management. Jan 2020 | Energies 13 (1) Energies 2020, 13(1), 9; https://doi.org/10.3390/en13010009

12.Yu LY. Liu XH. (...); Chen Y. Review of brakeby-wire system used in modern passenger car. ASME International Design Engineering Technical Conference // Computer and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE)2016 | VOL 3

13. Горбунова А. Д., Анисимов И. А., Буракова Л. Н., Клементьев С. А. Инновационные подходы к исследованию влияния работы установки «климат-контроль» на расход топлива и выбросы вредных веществ автомобильного транспорта // Инноватика и экспертиза. 2019. Выпуск 2 (27). С. 10–20. DOI 10.35264/1996-2274-2019-2-10-20

14.Norin F., Wyon D. Driver Vigilance. The ffects of Compartment Temperature. SAE 920168, 1992.

15.Грицук И. В., Гущин А. М., Краснокутская З. И., Момот М. С., Ушаков А. Л. Анализ требований к микроклимату рабочего места водителя колесного транспортного средства // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. Донецьк: ДААТ. 2014. № 4 (2). С. 66–71.

16.Chujko S. P., Kravchenko A. P. The Criteria for the Heat load of the driver's Cabin of the MAZ-206 bus during the summer operation // Wschodnioeuropejskie

286

Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal), No.10(62), 2020.

17.Chrzan T and Smal T. The Impact of Weather Conditions on Road Safety. TRANSPORT MEANS 2015, PTS I AND II, pp.392-396.

18.Jamroz K. and Smolarek L. Driver Fatigue and Road Safety on Poland's National Roads // International Journal of occupational safety and ergonomics. 2013. 19 (2). pp. 297-309. https://doi.org/10.1080/10803548 .2013.11076987

#### REFERENCES

1. Jakunin I. N., Men'shih O. M., Shungulov D. M. Issledovanie vlijanija vysokoj temperatury okruzhajushhej sredy na bezopasnosť avtotransportnogo processa [Investigation of the influence of high ambient temperature on the safety of the road transport process]. *Intellekt. Innovacii. Investicii.* 2019; 7: 138–145. (in Russ.)

2. Fedorov V. A., Kravchenko P. A. Kardinal'noe sovershenstvovanie zakonodatel'nogo obespechenija dejatel'nosti po preduprezhdeniju TP v Rossii [Cardinal improvement of legislative support for the prevention of TP in Russia]. *Transport RF*. 2013; 1 (44):8-13. (in Russ.)

3. Kolesov V., Petrov A. System dynamics of process organization in the sphere of traffic safety assurance. *System and digital technologies for ensuring traffic safety.* 36. 2018: 286-294. https://doi. org/10.1016/j.trpro.2018.12.085

4. Sakhapov R. and Nikolaeva R. Traffic safety system management. *System and digital technologies for ensuring traffic safety.* 36. 2018: 676-681 https://doi. org/10.1016/j.trpro.2018.12.126

5. Kravchenko P. and Oleshchenko E. Mechanisms of Functional Properties Formation of Traffic Safety Systems. *12th International Conference on Road Organization and Safety in Big Cities* 2017: 367-372 https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.01.051

6. Naevestad T. O., Elvebakk B and Phillips, RO The safety ladder: developing an evidence-based safety management strategy for small road transport companies. *Transport reviews*. 2018; 38 (3): 372-393.

7. Tomic I. and Barisic L. Analysis of improving Traffic safety for young drivers. *Zbornik veleucilista u rijeci-journal of the polytechnics of Rijeka*. 2019; 7 (1): 375-390. https://doi.org/10.31784/zvr.7.1.21

8. Newnam S. and Muir C. Reforming the future of workplace road safety using systems-thinking workplace road safety surveillance. *Safety Science*. 2021. 138

9. Adesiyun A, Cocu X; (...); Saleh P. Common standards for training of experts on road safety - relevance for secondary roads. *1st International Conference on Traffic and Transport Engineering (ICTTE)*. 2012: 143-148

10. Nikolay Verevkin, Evgeniy Lavrentyev, Igor Chernyaev, Dmitriy Gurin Method of Providing Safe Technical Condition of Vehicles by Technological Design of Enterprises. 12th International Conference "Organization and Traffic Safety Management in large cities". SPbOTSIC-2016, 28-30 September 2016. St. Petersburg, Russia.

11. Orynycz O., Tucki K., (...); Gola A. Evaluation of the Brake's Performance Dependence Upon Technical Condition of Car Tires as a Factor of Road Safety Management. Energies. 2020. 13 (1). 9; https://doi.org/10.3390/en13010009

12. Yu, LY; Liu, XH; (...); Chen, Y. Review of brake-by-wire system used in modern passenger car. ASME International Design Engineering Technical Conference. *Computer and Information in Engineering Conference* (IDETC/CIE)2016 | VOL 3.

13. Gorbunova A. D., Anisimov I. A., Burakova L. N., Klement'ev S. A. Innovacionnye podhody k issledovaniju vlijanija raboty ustanovki «klimat-kontrol'» na rashod topliva i vybrosy vrednyh veshhestv avtomobil'nogo transporta [Innovative approaches to the study of the impact of the operation of the "climate control" installation on fuel consumption and emissions of harmful substances of motor transport]. *Innovatika i jekspertiza*. 2019; 2 (27): 10-20. (in Russ.) DOI 10.35264/1996-2274-2019-2-10-20

14. Norin F., Wyon D. Driver Vigilance. The Effects of Compartment Temperature. SAE 920168, 1992.

15. Gricuk I. V., Gushhin A. M., Krasnokutskaja Z. I., Momot M. S., Ushakov A. L. Analiz trebovanij k mikroklimatu rabochego mesta voditelja kolesnogo transportnogo sredstva [Analysis of requirements for the microclimate of the workplace of the driver of a wheeled vehicle]. *Visnik Donec'koï akademiĭ avtomobil'nogo transportu*. Donec'k: DAAT. 2014; 4 (2): 66–71.

16. Chujko S. P., Kravchenko A. P. The Criteria for the Heat load of the driver's Cabin of the MAZ-206 bus during the summer operation. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe* (East European Scientific Journal). 2020;10 (62).

17. Chrzan T. and Smal T. The Impact of Weather Conditions on Road Safety. *Transport means*. 2015, PTS I AND II, pp. 392-396.

18. Jamroz K. and Smolarek L. Driver Fatigue and Road Safety on Poland's National Roads. *International Journal of occupational safety and ergonomics*. 2013; 19 (2): 297-309. https://doi.org/10.1080/10803548.201 3.11076987

#### ВКЛАД СОАВТОРОВ

Якунин И. Н. Постановка задачи, разработка концепции структурной модели, аналитическая часть исследования.

Фот А. П. Анализ нормативной базы исследования.

Якунин Н. Н. Алгоритм реагирования службы безопасности дорожного движения на высокую температуру внешней среды.

Фаттахова А.Ф. Анализ ранее выполненных работ по тематике исследования.

РАЗДЕЛ ІІ ТРАНСПОРТ

#### **COAUTHORS' CONTRIBUTION**

Ivan N. Yakunin Problem statement, development of the structural model concept, analytical part of the study.

Andrey P. Fot Analysis of the regulatory framework of the study.

Nikolay N. Yakunin Algorithm of the road safety service response to the high temperature of the external environment.

Almira F. Fattakhova Analysis of previously performed works on the subject of the study.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Якунин Иван Николаевич – ведущий инженер по буровым растворам.

Фот Андрей Петрович – д-р техн. наук, проф., главный учёный секретарь – начальник отдела диссертационных советов Оренбургского государственного университета. Якунин Николай Николаевич – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой автомобильного транспорта.

Фаттахова Альмира Файзулловна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры автомобильного транспорта.

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Ivan N. Yakunin – Leading Drilling Fluid Engineer. Andrey P. Fot – Dr. of Sci, Professor, Chief Scientific Secretary - Head of the Dissertation Councils Department.

Nikolay N Yakunin – Dr. of Sci., Professor, Head of the Automobile Transport Department.

Almira F. Fattakhova – Cand. of Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Automobile Transport Department.

# РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



# PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

УДК 624.012.45 https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-290-299 https://elibrary.ru/WVZTMU Научная статья



## ЗАЩИТА ОТ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ ЗДАНИЙ СО СБОРНЫМИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫМИ ПЕРЕКРЫТИЯМИ

#### Ю. В. Краснощеков

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), г. Омск, Россия uv1942@mail.ru, http://orcid.org/0000-0002-6695-1648

#### аннотация

Веедение. Приведены результаты анализа исследований защиты многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения, которые свидетельствует о недостаточном внимании к конструктивным системам из сборного железобетона, вследствие чего нормы проектирования ориентируют проектировщика на применение не всегда эффективных монолитных конструкций. В частности, практически не изучена проблема защиты от прогрессирующего обрушения при исключении сборных ригелей перекрытий и покрытий. Цель исследования - разработка метода расчета неразрезной системы многопустотных плит, изготовленных методом безопалубочного формования.

**Материалы и методы.** При проектировании защиты многоэтажных зданий из сборных элементов обычно выполняется статический расчёт с исключением вертикальных конструкций (стен, колонн) и усилением ригелей перекрытий и покрытий путем обеспечения их неразрезности. Существуют конструктивные методы усиления сборных перекрытий созданием неразрезности плит смежных пролетов с помощью соединительных элементов из пластичной арматурной стали, однако расчет таких систем не разработан. Предлагается метод расчета системы двух плит по схеме жесткой нити.

**Выводы.** В настоящее время разработаны теоретические методы, позволяющие решать различные задачи защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Однако существует множество конструктивных требований по защите многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения, пока не получивших экспериментально-теоретического подтверждения для эффективного решения практических задач. Представляется, что в данной статье одна из таких задач частично решена.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** прогрессирующее обрушение, железобетонные сборные конструкции, конструктивные системы зданий, запредельное состояние, расчётные схемы, моделирование.

Статья поступила в редакцию 29.03.2022; одобрена после рецензирования 11.04.2022; принята к публикации 12 .04.2022.

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: Краснощеков Ю.В. Защита от прогрессирующего обрушения зданий со сборными железобетонными перекрытиями // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 2(84). С. 290-299. https://doi.org/10.26518/2071-7296- 2021-19-2-290-299

© Краснощеков Ю. В., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.



https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-290-299 https://elibrary.ru/WVZTMU Original article

## PROTECTION AGAINST PROGRESSIVE COLLAPSE OF BUILDINGS WITH PRECAST REINFORCED CONCRETE FLOORS

Yuriy V. Krasnoshchekov

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia uv1942@mail.ru, http://orcid.org/0000-0002-6695-1648

#### ABSTRACT

**Introduction.** The results of the studies analysis on the protection of multi-storey buildings from progressive collapse are presented, which indicates insufficient attention to structural systems made of precast reinforced concrete, as a result of which design standards orient the designer to the use of not always effective monolithic structures. In particular, the problem of protection against progressive collapse with the exclusion of prefabricated crossbars of floors and coatings has not been practically studied. The purpose of the study is to develop a method for calculating a continuous system of hollow plates made by the method of formless molding.

**Materials and methods.** When designing the protection of multi-storey buildings from prefabricated elements, a static calculation is usually carried out with the exception of vertical structures (walls, columns) and the reinforcement of floor crossbars and coatings by ensuring their continuity. There are constructive methods of reinforcing prefabricated floors by creating continuous plates of adjacent spans with the help of connecting elements made of plastic reinforcing steel, but the calculation of such systems has not been developed. A method for calculating a system of two plates according to a rigid thread scheme is proposed.

**Conclusions.** Currently, theoretical methods have been developed to solve various problems of protecting buildings and structures from progressive collapse. However, there are many design requirements for the protection of multistorey buildings from progressive collapse, which have not yet received experimental and theoretical confirmation for the effective solution of practical problems. It seems that in this article one of these problems is partially solved.

**KEYWORDS:** progressive collapse, reinforced concrete prefabricated structures, structural systems of buildings, beyond condition, design schemes, modelling.

The article was submitted 29.03.2022; approved after reviewing 11.04.2022; accepted for publication 12.04.2022.

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:* Krasnoshchekov Yuriy V. Protection against progressive collapse of buildings with precast reinforced concrete floors. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2022; 19 (2): 290-299. https://doi. org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-290-299

© Krasnoshchekov Y. V., 2022



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

291

#### основные положения

1. Анализ исследований защиты многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения, выполненных в последние два десятилетия свидетельствует о недостаточном внимании к конструктивным системам из сборного железобетона, вследствие чего нормы проектирования ориентируют проектировщика на применение монолитных конструкций. Несмотря на растущий интерес исследователей к этой проблеме, многие задачи ждут своего решения. Практически не изучены особенности работы сборных железобетонных перекрытий в запредельной стадии. Цель исследования - анализ и разработка способов защиты от прогрессирующего обрушения многоэтажных зданий со сборными железобетонными перекрытиями.

2. Решается задача обеспечения необходимого сопротивления прогрессирующему обрушению многоэтажных зданий путем усиления сборных железобетонных плит при отказе несущих стен или ригелей, на которые они опираются. Неразрезность плит достигается с помощью соединительных элементов из пластичной стали. При расчете такие плиты рассматриваются как элементы висячей системы, а висячая конструктивная система с жёсткими железобетонными плитами принимается в виде жесткой нити или системы жестких нитей, т.е. элементов, работающих на изгиб и растяжение. Рассмотрен пример расчета типовых плит, изготовленных методом безопалубочного формования, при исключении опорной конструкции.

3. В настоящее время разработаны теоретические методы, позволяющие решать различные задачи защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Однако существует множество конструктивных требований, пока не получивших теоретического подтверждения для решения практических задач и получения эффективных решений. Представляется решение одной из таких задач.

#### введение

Пожалуй, основной проблемой безопасной эксплуатации зданий повышенной ответственности в последние два десятка лет является защита от прогрессирующего обрушения. Проблема прогрессирующего обрушения формировалась в период с 1968 по 2001 г. в результате цепи событий, связанных с частичным или полным обрушением зданий, различающихся по конструктивным системам, материалам несущих конструкций и строительным технологиям, при возрастающих экономических и человеческих потерях.

Одним из первых принято считать прогрессирующее обрушение угла 22-этажного крупнопанельного здания в Лондоне в 1968 г. в результате взрыва газа на 18 этаже. Термин «прогрессирующее обрушение» и формулировка проблемы защиты от него панельных зданий появились в докладе комиссии, расследовавшей причины аварии. После публикации доклада практически во всех развитых странах были начаты исследования этой проблемы, которые впоследствии были отражены в нормах проектирования. Однако в период между 1975 и 1995 годами исследования прогрессирующего обрушения пережили определённый застой [1]. Не случайно, что в России первый документ<sup>1</sup> по этой проблеме появился лишь в 1999 г.

Проблема защиты от прогрессирующего обрушения многократно обострилась после разрушения крыла каркасного здания торгового центра в Сеуле в 1995 г. Обрушение произошло в результате потери устойчивости железобетонного каркаса из-за продавливания монолитной плиты при локальном перегрузе безбалочного покрытия [2].

Как видно, первые случаи прогрессирующего обрушения связаны с бетонными и железобетонными конструкциями. Обрушение высотных зданий Всемирного торгового центра с металлическим каркасом в 2001 г. в результате террористической атаки явилось решающим толчком для глобализации проблемы прогрессирующего обрушения зданий и поводом для исследований различных конструктивных систем зданий на аварийные (запредельные) воздействия.

Такие исследования не прекращаются и в настоящее время, что свидетельствует о том, что проблема ещё далеко не решена. В работе [3] приведен анализ основных экспериментально-теоретических исследований, выполненных в последние полтора десятка лет и реализованных в нормах проектирования. На сегодняшний день большинство существующих исследований сосредоточено на железобетонных монолитных конструкциях [4, 5, 6].

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Рекомендации по предотвращению прогрессирующего обрушения крупнопанельных зданий. Москомархитектура. 1999.



Результаты сравнения затрат, требуемых для защиты от прогрессирующего обрушения бескаркасных и каркасных зданий приведены в работе [7].

Следует отметить, что работа каркасов из сборных железобетонных элементов, которые наиболее часто используются для зданий с массовым нахождением людей, совершенно недостаточно изучена в стадии прогрессирующего обрушения [3]. Описаны лишь весьма скромные результаты исследований по обеспечению устойчивости сборных связевых каркасов из железобетонных элементов [8], которые пока не получили должного развития.

Обзор исследований по прогрессирующему обрушению сборных железобетонных конструкций, выполненных за рубежом, представлен в работе [8]. Отмечено, что сборные железобетонные конструкции считаются более уязвимыми к прогрессирующему обрушению, чем монолитные, ввиду отсутствия эффективного механизма перераспределения нагрузки между элементами. Наиболее часто наблюдаются разрушения, обусловленные сдвигом и падением элементов сборных перекрытий и покрытий многоэтажных зданий, которые рассматриваются обычно в виде систем балочных и плитных элементов. Сопротивление элементов прогрессирующему обрушению определяют по схемам предельных состояний: изгибной, арочной или цепной [9]. Иногда процесс прогрессирующего обрушения представляют в виде последовательности стадий балочного механизма, переходной стадии и стадии цепного действия [1].

При исследовании сборных конструктивных систем большое внимание уделяется работе узловых соединений и их усилению [10]. В работе [11] предложена конструкция платформенного сборно-монолитного стыка рамных панелей и многопустотных плит (рис. 1). Отмечено, что при выключении пролетного сечения ригеля локальное разрушение следует ограничить самим ригелем и опирающимися на него плитами смежных пролетов этих плит. Сделан вывод, что традиционные решения конструкций каркасных зданий должны быть дополнены новыми элементами, обеспечивающими защиту от прогрессирующего обрушения.





Рисунок 1 – Платформенный сборно-монолитный стык: 1 – панель-рама; 2 – многопустотная плита; 3 – заглушка; 4 – арматурные выпуски из ригеля; 5 – каркас ригеля; 6 – бетон замоноличивания; 7 – выпуски арматуры; 8 - армирование монолитной части ригеля; 9 – арматура стойки; 10 – стойка рамы; 11 – соединительный стержень Источник: заимствовано [11] с авторским изменением.

Figure 1 – Platform prefabricated monolithic joint: 1 - panel-frame; 2 - multi-wall plate; 3 - blanking; 4 - reinforcement outlets from crossbar; 5 - frame of crossbar; 6 - grouting concrete; 7 - valve outlets; 8 - reinforcement of the monolithic part of the crossbar; 9 - strut reinforcement; 10 - frame strut; 11 - connecting rod Source: borrowed [11] with the author's change.



© 2004–2022 Вестник СибАДИ The Russian Automobile and Highway Industry Journal



Рисунок 2 – Конструкция узла сборно-монолитного каркаса по [12] Источник: заимствовано [12] с авторским изменением.

> Figure 2 – Platform prefabricated monolithic joint [12] Source: borrowed [12] with the author's change.

Результаты исследования каркаса с подобными элементами перекрытий приведены в [12] (рис. 2).

Можно отметить также исследования перекрытий каркасных зданий с использованием численных подходов. В статьях [13, 14] рассматривается роль моделирования динамического разрушения железобетонных конструкций. В работе [14] приведены результаты экспериментально-теоретического исследования железобетонных плит перекрытия при отказе колонн, свидетельствующие о значительных расхождениях опытных и теоретических данных.

Авторы работы [15] изучали влияние конструкции железобетонных балок и плит перекрытия на сопротивление прогрессирующему обрушению каркасных зданий. Результаты исследования показали существенное влияние перекрытий на перераспределение усилий в элементах каркаса.

Таким образом, выполнен большой объем исследований по защите от прогрессирующего обрушения крупнопанельных зданий и монолитных каркасов. Несмотря на растущий интерес исследователей к этой проблеме, многие задачи ждут своего решения. Практически не изучены особенности работы сборных железобетонных перекрытий в запредельной стадии.

Цель данного исследования – анализ и разработка способов защиты от прогресси-

#### рующего обрушения многоэтажных зданий со сборными железобетонными перекрытиями.

Решается задача обеспечения необходимого сопротивления прогрессирующему обрушению многоэтажных зданий путем усиления сборных железобетонных плит при отказе несущих стен или ригелей, на которые они опираются.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования приняты многоэтажные здания со сборными перекрытиями из типовых изделий. В сборных перекрытиях применяют три типа железобетонных плит: сплошного сечения, многопустотных и ребристых. Конструкции типовых плит, изготовляемых в России, достаточно полно описаны в справочнике [16]. Для исследования приняты многопустотные плиты, изготовляемые по технологии безопалубочного формования.

Типовые изделия рассчитаны для работы по однопролетной балочной схеме. При отказе опорных конструкций, такие плиты неизбежно должны падать. Поэтому с целью защиты от прогрессирующего обрушения при проектировании многоэтажных зданий отдается предпочтение монолитным перекрытиям с двойным армированием<sup>2</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях. М.: ГУП НИАЦ. 2002. 11 с.





а





б Рисунок 3 – Варианты соединения плит перекрытия: а) с ригелями; б) между собой Источник: заимствовано с авторским изменением<sup>3</sup>.

> Figure 3 – Options for connecting floor slabs: a) with crossbars; b) among themselves Source: borrowed with the author's change<sup>3</sup>.

Применение типовых изделий, как правило, допустимо лишь при усилении перекрытий на основе специальных расчетов. На данном этапе теоретической основой исследования являются соответствующие положения нормативных проектирования и стандартов.

Основное средство защиты многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения - создание неразрезности любых перекрытий с помощью горизонтальных продольных и поперечных связей. Пластичные связи предназначены для удержания перекрытия от падения (в случае его разрушения) на ниже лежащий этаж при отказе колонн, ригелей или стен. Пластичность необходима для того, чтобы после исчерпания несущей способности связи не выключались из работы и допускали сравнительно большие деформации.

Связи рекомендуется рассчитывать на нормативный вес половины пролета перекрытия с расположенным на нем полом. Сечения связей определяются расчетом на усилия не менее 10 кН на 1 м длины здания или 15 кН на 1 м ширины здания. Расстояние между связями не более чем 3,6 м. Связи соединяют элементы сборного перекрытия и размещают обычно в пустотах (рис. 3). Подобное решение усиления сборных перекрытий предусмотрено также для защиты от прогрессирующего обрушения бескаркасных зданий<sup>4</sup>. В таких зданиях связи закрепляют плиты перекрытия в железобетонных монолитных поясах, расположенных по наружным стенам на каждом этаже.

Согласно СП 385.1325800.2018<sup>5</sup>, введенному в действие 2019-01-06, здания и сооружения повышенного уровня ответственности, а также здания и сооружения нормального уровня ответственности с массовым пребыванием людей следует проектировать с учетом защиты от прогрессирующего обрушения вследствие начального локального разрушения. Предполагаемое при проектировании локальное разрушение понимается как удаление несущего конструктивного элемента, имитирующего потерю несущей способности и устойчивости, а также приводящего к изменению конструктивной системы здания и сооружения.

Для многоэтажных зданий рассматривают локальные разрушения несущей стены на участке длиной не более 6 м, колонны, ригеля, элемента несущей конструкции покрытия. Надо полагать, что упомянутые здесь ригели могут быть элементами не только покрытий, но и перекрытий.



<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях. М.: ГУП НИАЦ. 2002. 11 с.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Рекомендации по защите жилых зданий с несущими кирпичными стенами при чрезвычайных ситуациях. М.: ГУП НИАЦ. 2002. 14 с.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения (с Изменением № 1). Введен 2019-01-06.

Рациональными средствами защиты от прогрессирующего обрушения являются повышение степени статической неопределимости конструкций, а также применение материалов и конструктивных решений, обеспечивающих развитие в элементах пластических деформаций. В системах из сборных элементов особое внимание должно уделяться узлам и соединениям, способным воспринимать перераспределение усилий.

Для обеспечения защиты от прогрессирующего обрушения выполняют расчёт как системы здания и сооружения, так и отдельных элементов и узлов сопряжений по двум расчётным схемам. По первичной расчётной схеме выявляют критические элементы и участки локального разрушения, по вторичной схеме с исключением критического элемента проверяют способность конструктивной системы выполнять ограниченные несущие функции в результате предполагаемого локального разрушения. Критерии несущей способности и деформативности принимают как для особого предельного состояния. Для расчёта следует использовать статический метод.

При больших прогибах плиты рассматриваются как элементы висячей (цепной) системы с условием обеспечения анкеровки арматуры и восприятия возникающих при этом горизонтальных усилий. Допускаемые (предельные) прогибы 1/30 - 1/50 длины пролета в зависимости от пластичности арматуры.

Специальные требования к каркасным конструкциям из сборного железобетона не установлены.

В методических пособиях<sup>6, 7</sup>, разработанных в развитие СП 385, приведены некоторые уточнения рекомендаций СП и примеры расчётов различных конструктивных систем зданий. В частности, при проектировании одноэтажных каркасных зданий рекомендуется принимать меры по ужесточению дисков покрытий из ребристых плит путем объединения монтажных петель плит хомутами и сварки закладных деталей, устанавливаемых дополнительно. В примере расчёта многоэтажного каркасного промздания предусмотрен сценарий прогрессирующего обрушения участка перекрытия двух смежных шагов в одном пролете на нижележащее перекрытие, однако расчет этого вида аварийного воздействия отсутствует. К сожалению, варианты отказа ригелей или плит перекрытий в примерах не рассматриваются. Отсутствуют примеры расчёта элементов висячей системы.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ

Для примера выполнен расчёт защиты от прогрессирующего обрушения сборного железобетонного перекрытия из плит безопалубочного формования ПБ 60.15-8-25 в результате отказа опорных конструкций в виде стены или ригеля.

Исходные данные для расчёта.

Расчётный пролёт плиты  $I_0 = 5,9$  м; номинальная ширина b = 1,5 м; расчётная унифицированная нагрузка p = 8 кПа (800 кгс/м<sup>2</sup>) и нормативная унифицированная нагрузка 6,88 кПа; нормативная нагрузка от собственного веса с учётом замоноличенных швов g = 3,3 кПа; нормативная полная нагрузка q = 10,18 кПа. Нормативная временная нагрузка учитывается как длительная.

Плита армируется высокопрочной проволокой класса Вр1400 в растянутой зоне 19Ø5 (A = 3,72 см<sup>2</sup>) при расстоянии до крайнего нижнего волокна а = 3 см и в сжатой зоне 4Ø5 (площадь сечения A = 4,5 см<sup>2</sup> всей арматуры 23Ø5). Арматура сжатой зоны в расчёте не учитывается. Минимальная толщина бетона сжатой зоны 2,8 см. Плиты смежных пролётов соединены связями из стали А500.

Расчётные прочностные характеристики бетона и арматуры в соответствии с СП 385 принимаются равными их нормативным значениям по СП 63.13330.2018 (табл. 1). Расчётные значения призменной прочности бетона приняты с учётом коэффициента условия работы 1,15 для изделий заводского изготовления особого предельного состояния в соответствии с СП 385. Расчётные значения сопротивления арматуры с физическим пределом текучести приняты с учётом коэффициента условия работы 1,1.

На рис. 4 показана конструктивная система из двух плит перекрытия, соединенных связями из пластичной стали, которая потеряла способность работать на изгиб в результате отказа одного из ригелей. При больших прогибах плиты рассматриваются как элементы висячей системы с условием обеспечения анкеровки соединительных элементов и восприятия возникающих при этом горизонтальных усилий. Согласно СП 385 допускаемые (предельные) прогибы f = L/30 = 0.4 м.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Проектирование мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. М.: 2018. 157 с.

<sup>7</sup> Проектирование мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. М.: 2020. 197 с.

#### Таблица 1

Расчётные характеристики материалов Источник: составлено автором.

Table 1

### Design characteristics of materials

Source: compiled by the author.

Класс	Нормативное сопротивление, МПа	Коэффициент условия работы	Расчётное сопротивление, МПа			
Бетон						
B25	18,5	1,15	21,3			
Арматура						
A500	500	1,1	550			
Bp1400	1400	1	1400			



Рисунок 4 – Расчётная схема плит перекрытия при отказе ригеля Источник: составлено автором на основе анализа механизма разрушения.

Figure 4 – Design scheme of floor slabs in case of bolt failure Source: compiled by the author based on the analysis of the mechanism of destruction.

В простейшем случае натяжение (распор) абсолютно гибкой нерастяжимой нити длиной *I*, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой *q* = *g* + *p*, определяется по формуле

$$H = \frac{qbL^2}{8f}.$$
 (1)

Зависимость (1) соответствует шарнирному закреплению нити на опорах без опорных моментов. Принимая полученное значение распора H = 687 кН, равным расчётному усилию в соединительных стержнях  $R_{sn}A_s$  по формуле (1) имеем  $A_s = 10,18 \cdot 1,5 \cdot 12^2 10/8 \cdot 550 \cdot 0,4 = 12,5$  см<sup>2</sup>, что соответствует 4Ø20 A500 ( $A_s = 12,56$  см<sup>2</sup>).

В общем случае висячую конструктивную систему с жёсткими железобетонными плитами целесообразно рассматривать в виде жесткой нити или системы жестких нитей, т.е. элементов, работающих на изгиб и растяжение. Следует отметить, что абсолютно гибких нитей не существует, жесткостью их на изгиб можно только пренебречь. Так как в жесткой нити балочный момент частично воспринимается по балочной схеме с изгибной жесткостью D, её натяжение характеризуется величиной [17] при f = 0,4 м

$$H = \frac{qbL^2}{8f} - \frac{48D}{5L^2}.$$
 (2)

Второй член правой части формулы (2) характеризует величину распора  $\Delta$ Н абсолютно гибкой нити, компенсированную работой элемента на изгиб. Жёсткость нити можно оценить из расчётной схемы системы плиты, защемленной на опоре при задаваемом значении опорного момента, из формулы  $f = M_{on}(L/2)^2/4D$ . Плечо пары сил, образующих опорный момент, z = 0.9h = 0.2 м. Принимая в первом приближении H = 687 кH, получим  $M_{on} = Hz = 137.4$  кH·м.

Тогда  $D = 137, 4 \cdot 6^2/4 \cdot 0, 4 = 3091 \text{ кH} \cdot \text{м}^2$  и по формуле (2) H = 687 - 206 = 481 кH. Принимая для ускорения приближения H = 687 + 481 = 584 кH, уточняем  $M_{on} = Hz = 116, 8 \text{ кH} \cdot \text{м}, D = 2628 \text{ кH} \cdot \text{м}^2$ и H = 687 - 175 = 512 кH. На следующем этапе приближения H = 584 + 512 = 548 кH, уточняем  $M_{on} = Hz = 109, 6 \text{ кH} \cdot \text{м}, D = 2466 \text{ кH} \cdot \text{м}^2$  и окончательно принимаем H = 687 - 164 = 523 кH, что соответствует требуемому значению  $A_s = 9,51 \text{ см}^2$ или 4Ø18 А500 ( $A_s = 10,18 \text{ см}^2$ ).

Проверяем несущую способность плит при работе на растяжение *N* = 1400·4,5·10 = =630 кH > 523 кH. В примере не учтены динамический характер аварийного воздействия и дефррмативность нити. Но известно, что при применении арматуры класса А500 коэффициент динамичности не превышает 1,1 [18], а учет только упругих деформаций нити снижает величину распора на 10-15 %, поэтому результаты расчёта приемлемы для практического применения.

Следует отметить, что принятое значение опорного момента работает и на эксплуатационной стадии. В данном примере с исходной нагрузкой *p* = 8 кПа возможно применение плит пониженной несущей способности на изгиб при условии обеспечения несущей способности на растяжение.

#### ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Длительный опыт исследований защиты многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения свидетельствует о недостаточном внимании конструктивным системам из сборного железобетона, вследствие чего нормы проектирования ориентируют проектировщика на применение монолитных конструкций.

При проектировании защиты многоэтажных зданий из сборных элементов обычно выполняется статический расчёт с исключением вертикальных конструкций (стен, колонн) и усилением ригелей перекрытий и покрытий путем обеспечения их неразрезности. Проблема защиты от прогрессирующего обрушения при исключении отдельных ригелей перекрытий и покрытий практически не изучена.

Существуют конструктивные методы усиления перекрытий созданием неразрезности плит смежных пролетов с помощью соединительных элементов из пластичной арматурной стали, однако расчет таких систем не разработан. Рассмотрен пример расчета многопустотных плит, изготовленных методом безопалубочного формования, как элементов висячей системы.

В настоящее время разработаны теоретические методы, позволяющие решать различные задачи защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Однако существует множество конструктивных требований, пока не получивших теоретического подтверждения для решения практических задач и получения эффективных решений. Представляется, что в данной статье одна из таких задач решена, но требует экспериментальной проверки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Azim I., Yang J., Bhatta S., Wang F., Liu Q. Factors influencing the progressive collapse resistance of RC frame structures [Факторы, влияющие на со-

противление прогрессивному обрушению железобетонных каркасов]. Journal of Building Engineering, 27 (2020). 100986.

2. Краснощеков Ю. В. Устойчивость каркасного здания при отказе колонны (уроки трагедии Сеула) // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 12. С. 4-10.

3. Андросова Н. Б., Ветрова О. А. Анализ исследований и требований по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в законодательно-нормативных документах России и странах Евросоюза // Строительство и реконструкция. 2019. № 1. С. 85-96.

4. Рекунов С. С., Косова А. Ю., Иванов С. Ю., Завьялов И. С. Расчёт многоэтажного здания на прогрессирующее обрушение при сейсмическом воздействии // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2021. № 3 (36). С. 15-20.

5. Fedorova N. V., Vu N. T. Deformation criteria for reinforced concrete frames under accidental action [Критерии деформации железобетонных каркасов при случайном воздействии]. Magazine of Civil Engineering, 109 (1). 2022.

6. Федорова Н. В., Кореньков П. А., Ву Н. Г. Методика экспериментальных исследований деформирования монолитных железобетонных каркасов зданий при аварийных воздействиях // Строительство и реконструкция, № 4 (78). 2018. С. 42-52.

7. Каргина Е. Е., Аксенов В. Н. Сравнение технико-экономических показателей монолитных зданий стеновой и каркасной конструктивных схем при расчете на прогрессирующее обрушение // Инженерный вестник Дона. № 5. 2020.

8. Кодыш Э. Н., Трекин Н. Н., Никитин И. К. Проектирование многоэтажных зданий с железобетонным каркасом. М.: Издательство АСВ. 2009. 346 с.

9. Alshairh I. M., Abadel A. A., Alrubaydi M. Precast RC structures progressive collapse resistance: Current knowledge and future requirements [Сопротивление прогрессирующему обрушению сборных железобетонных конструкций]. Structures, 27 (2022). Pp. 338-352.

10. Qian K., Liang S-L., Fu F., Fang Q. Progressive collapse resisstance of pregast concrete beumcolumn sub-assemblages with high-performance dry connections [Сопротивление прогрессирующему обрушению сборных железобетонных каркасов с высокоэффективными узловыми соединениями]. Engineering Structures, 2019. 109552.

11. Емельянов С. Г., Федорова Н. В., Колчунов В. И. Особенности проектирования узлов конструкций жилых и общественных зданий из панельно-рамных элементов для защиты от прогрессирующего обрушения // Строительные материалы. 2017. № 3. С. 23-26.

12. Qian K., Li B. Investigation into resilience of precast concrete floors against progressive collapse // ACI Structures. 116 (2). 2019. Pp. 171-182.

13. Chemodurov V. T., Korenkov P. A., Leonenko Yu. S., Korenkova O. O. Physical modeling of reinforced concrete structures exposed to emergency loads // Journal of Physics: Conference Series. 1425. 2020. 012061. 14. Dmitriev A. N., Lalin V. V. Comparison of different procedures for progressive collapse. Analysis of RC Flat slab structures under corner column. Loss scenario // Buildings. 2021. 11. 405.

15. Bredean L., Botez M. The influence of beam design and the slabs effect on the progressive collapse resisting mechanism development for RC framed structures // Engineering Failure Analysis. 91 (2018). Pp. 527-542.

16. Краснощеков Ю. В., Заполева М. Ю. Серии железобетонных изделий перекрытий и покрытий. М. Вологда: Инфра-инженерия. 2020. 280 с.

17. Качурин В. К. Теория висячих систем. Статический расчет. М.: Госстройиздат, 1962. 224 с.

18. Краснощеков Ю. В. Расчет каркасного здания на прогрессирующее обрушение при аварийном отказе колонны // Строительная механика и расчет сооружений. № 1. 2017. С. 54-58.

#### REFERENCES

1. Azim I., Yang J., Bhatta S., Wang F., Liu Q. Factors influencing the progressive collapse resistance of RC frame structures. Journal of Building Engineering, 27 (2020). 100986.

2. Krasnoshchekov Yu. V. Ustoychivost karkasnogo zdaniya pri otkaze kolonny (uroki tragedii Seula) [Stability of a frame building in case of column failure (lessons from the tragedy of Seoul)]. Promyshlennoe I grazhdanskoe stroitelstvo [Industrial and civil construction. 2019; 12: 4-10. (In Russ.)

3. Androsova N. B., Vetrova O. A. Analis issledovaniy I trebovaniy po zashchite zdaniy I sooruzheniy ot progressiruyushchego obrusheniya v zakonodatelno-normativnyh dokumentakh Rossii I stranakh Evrosoyuza [Analysis of research and requirements for the protection of buildings and structures from progressive collapse in the legislative and regulatory documents of Russia and the EU countries]. Stroitelstvo I rekonstruktsiya. 2019; 1: 85-96. (In Russ.)

4. Rekunov S. S., Kosova A. Yu., Ivanov S. Yu., Zavyalov I.S. Raschyot mnogoetazhnogo zdaniya na progressiruyushchee obrushenie pri seysmicheskom vosdeystvii [Calculation of a multi-storey building for progressive collapse under seismic influence]. Inzhenerno-stroitelny vestnik Prikaspiya. 2021; 3 (36): 15-20. (In Russ.)

5. Fedorova N. V., Vu N. T. Deformation criteria for reinforced concrete frames under accidental action. Magazine of Civil Engineering. 109 (1). 2022.

6. Fedorova N. V., Korenkov P. A., Vu N. G. Meyodika experimentalnyh issledovaniy deformirovaniya monolitnyh zhelezobetonnyh karkasov zdaniy pri avariynyh vozdeystviyah [Methods of experimental studies of deformation of monolithic reinforced concrete frames of buildings under emergency impacts]. Stroitelstvo I rekonstruktsiya. 2018; 4 (78): 42-52. (In Russ.)

7. Kargina E. E., Aksyonov V. N. Sravnenie techniko-ekonomicheskih pokazateley monolitnyh zdaniy stenovoy I karkasnoy konstruktivnyh schem pri raschyote na progressiruyushchee obrushenie [Comparison of technical and economic indicators of monolithic buildings of wall and frame structural schemes in the calculation of progressive collapse]. Inzhenerny vestnik Dona. 2020; 5. (In Russ.)

8. Kodysh E. N., Trekin N. N., Nikitin I. K. Proektirovanie mnogoetazhnyh zdaniy s zhelesobetonnym karkasom [Design of multi-storey buildings with reinforced concrete frame]. Moscow, Isdatelstvo ASV, 2009. 346 p. (In Russ.)

9. Alshairh I. M., Abadel A. A., Alrubaydi M. Precast RC structures progressive collapse resistance: Current knowledge and future requirements. Structures. 27 (2022). Pp. 338-352.

10. Qian K., Liang S-L., Fu F., Fang Q. Progressive collapse resisstance of pregast concrete beum-column sub-assemblages with high-performance dry connections. Engineering Structures. 2019. 109552.

11. Emelyanov S. G., Fyodorova N. V., Kolchunov V. I. Osobennosti proektirovaniya uzlov konstruktsiy zhylyh I obshchestvennyh zdaniy iz panelno-ramnyh elementov dlya zashchity ot progressiruyushchego obrusheniya [Design features of structural units of residential and public buildings made of panel-frame elements to protect against progressive collapse]. Stroitelnye materialy. 2017; 3: 23-26. (In Russ.)

12. Qian K., Li B. Investigation into resilience of precast concrete floors against progressive collapse. ACI Structures. 116 (2). 2019. Pp. 171-182.

13. Chemodurov V. T., Korenkov P. A., Leonenko Yu. S., Korenkova O. O. Physical modeling of reinforced concrete structures exposed to emergency loads. Journal of Physics: Conference Series. 1425. 2020. 012061.

14. Dmitriev A. N., Lalin V. V. Comparison of different procedures for progressive collapse. Analysis of RC Flat slab structures under corner column. Loss. Buildings. 2021. 11. 405.

15. Bredean L., Botez M. The influence of beam design and the slabs effect on the progressive collapse resisting mechanism development for RC framed structures. Engineering Failure Analysis. 91. 2018: 527-542.

16. Krasnoshchekov Yu. V., Zapoleva M. Yu. Serii zhelesobetonnyh izdeliy perekrytiy I pokrytiy [Series of reinforced concrete products of floors and coatings]. Moskow-Vologda, Infra-Inzheneriya. 2020. 280 p. (In Russ.)

17. Kachurin V. K. Teoriya visyachih system. Staticheskiy raschyot [Theory of hanging systems. Static calculation]. Moskow. Gosstroyizdat. 1962: 224. (In Russ.)

18. Krasnoshchekov Yu. V. Raschyot karkasnogo zdaniya na progressiruyushchee obrushenie pri avariynom otkaze kolonny [Calculation of a frame building for progressive collapse in case of an emergency failure of the column]. Stroitelnaya mechanika I raschyot sooruzheniy. 2017;1: 54-58. (In Russ.)

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Краснощеков Юрий Васильевич – д-р. техн. наук, проф. кафедры «Строительные конструкции».

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Yuriy V. Krasnoshchekov – Dr. of Sci, Professor of the Building Structures Department.



УДК: 69.07 https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-300-306 https://elibrary.ru/WMDFPG Научная статья



## БЕТОН КАК ОДИН ИЗ ФАКТОРОВ ОБРУШЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЗДАНИЙ В БУРУНДИ

#### Э. Микерего, Ж. Ндикумана

Университет Бурунди, факультет инженерных наук; департамент строительства г. Бужумбура, Бурунди mikeregoemmanuel@hotmail.com, http://orcid.org/0000-0002-5743-6476, ndimanajustin@gmail.com, http://orcid.org/0000-0002-9875-4112 ზтветственный автор

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В данной статье представлены результаты натурной оценки участия бетона в обрушении железобетонных зданий в Бурунди.

Материалы и методы. Исследование проводилось определением прочности на сжатие бетонных конструктивных элементов исследуемых железобетонных зданий. Прочность на сжатие определялась на колоннах, балках и перекрытиях с помощью промышленного склерометра «SCHMIDT 2000» в соответствии с протоколом, описанным в «NFEN12504-2(2003)». Было изучено 17 (семнадцать) строящихся трехэтажных зданий. Для каждого здания, участвующего в исследовании, были исследованы железобетонные несущие элементы первого этажа. Полученные результаты были классифицированы в соответствии с марками цемента (32,5) и (42,5), которые использовались в бетонах исследованных зданий. Было проведено сравнение прочностей на сжатие, полученных в натурных условиях, с нормативными значениями. Достоверность полученных результатов была подтверждена корреляцией между результатами, полученными в натурных и лабораторных условиях.

**Результаты.** Данное исследование показало, что в Бурунди до 100% обрушений приходится на сооружения, построенные частными лицами. Было выявлено, что 100% колонн, 82% балок и 82% плит из бетона, изготовленного с использованием цемента марки (32,5), имели прочность на сжатие ниже нормативного значения (25 МПа). Также 50% колонн, 50% балок и 84% плит из бетона на основе цемента высокой марки (42,5) была ниже нормативного значения (35МПа).

**Обсуждение и заключение.** В данном исследовании была доказана достоверность результатов, полученных методом склерометрического испытания на железобетонных зданиях. Показано, что бетон является одним из факторов обрушения железобетонных зданий, построенных частными лицами в Бурунди. Отмечено, что низкосортный цемент оказывает большее влияние на разрушение желЗезобетонных конструкций, чем высокосортный. В качестве рекомендации: процесс строительства железобетонных зданий в Бурунди необходимо регулировать и контролировать.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** бетон, железобетонные конструкции, факторы обрушения конструкций, обрушение зданий в Бурунди.

Статья поступила в редакцию 11.11.2021; одобрена после рецензирования 10.03.2022; принята к публикации 12.04.2022.

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: Микерего Э., Ндикумана Ж. Бетон как один из факторов обрушения железобетонных зданий в Бурунди // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 2(84). С. 300-306. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-300-306

© Микерего Э., Ндикумана Ж., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.



https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-300-306 https://elibrary.ru/WMDFPG Original article

### CONCRETE AS A FACTOR IN REINFORCED CONCRETE BUILDINGS COLLAPSE IN BURUNDI

#### Emmanuel Mikerego \*, Justin Ndikumana

University of Burundi; Engineering Sciences Faculty; Department of Civil Engineering Bujumbura – Burundi mikeregoemmanuel@hotmail.com, http://orcid.org/0000-0002-5743-6476, ndimanajustin@gmail.com, http://orcid.org/0000-0002-9875-4112 \*corresponding author

#### ABSTRACT

**Introduction.** This paper presents the results of the assessment in-situ of the involvement of the concrete in the collapse of reinforced concrete buildings in Burundi.

**Materials and Methods.** The study consisted in the identification of the compressive strengths of the concrete structural elements of the reinforced concrete buildings under study. The compressive strengths were identified on the columns, beams and slabs using an industrial SCHMIDT 2000 sclerometer according to the protocol described in NF EN 12504-2(2003). Seventeen (17) three-storey buildings under construction were studied. For each building involved in the study, the reinforced concrete bearing elements of the first floor were studied. The results obtained were classified according to the cement grades (32.5) and (42.5) that were used in the studied buildings. A comparison of the compressive strengths obtained in-situ was established in relation to the normative values according to the cement grade used. The reliability of the obtained results was confirmed by the correlation between the results obtained in the laboratory conditions on the reinforced concrete experimental samples.

**Results.** This study showed that in Burundi up to 100% of collapses are caused by privately built structures. It was proved that the compressive strengths of 100% of the columns, 82% of the beams and 82% of the slabs that were made with a low-grade cement (32.5) had compressive strengths lower than the normative value (25MPa). In addition, the compressive strengths of 50% of the columns, 50% of the beams and 84% of the slabs made with a high-grade cement (42.5) were also proved to have compressive strengths lower than the normative values (35MPa).

**Discussion and conclusion.** In this study, the reliability of the results obtained by sclerometer test in-situ on the reinforced concrete buildings has been proved. Concrete has been shown to be a factor in the collapse of privately built reinforced concrete buildings in Burundi. Low-grade cement was observed to have a high impact in the collapse of reinforced concrete structures than the high-grade one. Therefore, as a recommendation, the process of building reinforced concrete buildings in Burundi needs to be regulated and controlled.

KEYWORDS: concrete, reinforced concrete structures, factors of structures collapse, buildings collapse in Burundi.

The article was submitted 11.11.2021; approved after reviewing 10.03.2022; accepted for publication 12.04.2022.

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:* Mikerego E., Ndikumana J.Concrete as a factor in reinforced concrete buildings collapse in Burundi. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2022; 19 (2): 300-306. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-300-306

© Mikerego E., Ndikumana J., 2022



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



#### INTRODUCTION

In Burundi, architectural and structural design are the mainly documents required to obtain a building permission. These are issued by the urban planning authorities. Thereafter, no measures are planned by the competitive authority for the verification of the material quality, technology and workforce involved in the construction works specifically for structures erected by individuals. Usually, the collapses happen during the construction process. For example, some known cases of collapse of reinforced concrete buildings are the Tankoma, Kinindo, Winterekwa and Buterere cases. In general, the causes are not known. Buildings collapse in cities is a real risk in town planning in developing countries [1, 2]. That is why there exist a number of norms that gives a protocol of procedures for non-destructive approaches in order to conduct assessments on the mechanical performances of the concrete in-situ or on the precast-concrete<sup>1,2</sup> [3, 4]. These are used to identify whether the concrete is or not one of the factors of the collapse of reinforced concrete buildings. In foreign literature, a number of assessments have been conducted on the causes of the collapse of reinforced structures [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].



a b c Figure 1 – Experimental samples preparation (a) and compression testing under hydraulic press (b) and sclerometer (c) used in the laboratory and in-situ study

а

Figure 2 – Random example of source of construction materials (a) used in manufacturing concrete (b) used in individual reinforced concrete buildings (c) in Burundi Source: compiled by the authors.

b

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> СТО 56947007-29.240.55.269-2019. Требования к качеству конструкций, материалов и выполненных работ при строительстве (реконструкции) ВЛ 35 – 750 кВ. ПАО «ФСК ЕЭС» 2019.



Source: compiled by the authors.

С

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> ГОСТ 22690-88 «Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. Поправка ИУС № 5 1989».



Figure 3 – Designation of the type of the investigated bearing elements (column, beam and slab) on the seventeen (17) three-storey buildings Source: compiled by the authors.

However, these assessments cannot totally be related to Burundi because they do not take into consideration the local conditions.

#### MATERIAL AND METHODS

The main instrument that was planned to be used in the investigation of the studied structures was the sclerometer *«SCHMIDT 2000»*. Thus, the first step of the research was to identify the correlation between the results obtained from the compression test under the hydraulic press and the results given by the sclerometer on the same experimental samples of the ordinary concrete (Fig.1). Two cement grades were considered for the concrete: low-grade cement (32.5) and highgrade cement (42.5).

The next step was to visit the construction sites in progress in order to observe visually the quality of the construction materials, technology and workforce used in the execution of reinforced concrete constructions (Fig. 2).

The study continued by the analysis of the reports provided by the staff from the civil protection agency about building collapse in Burundi. Finally, in-situ experimental tests on compressive strengths were carried out with the sclerometer on the columns, beams and slabs of the first floor (Fig.3) of seventeen (17) three-storey buildings under construction in Bujumbura Mairie, Bujumbura Rural and Gitega. The tests were performed according to the European norm [3].

The in-situ measurements were recorded in tables designed for further processing according

to the cement grade (32.5 or 42.5) used for the concrete of the investigated buildings.

#### RESULTS

To start with, the results obtained show a good correlation between the tests obtained under the hydraulic press and the sclerometer (Fig.4; Fig.5).

As the results show (Fig.4, Fig.5), for concretes aged 28 days, the compressive strengths obtained by crushing under the hydraulic press are lower than those determined by the sclerometer with a maximum difference of 7%.

Furthermore, tests in-situ showed that there may be remarkable difference between the compressive strengths of the concrete for columns, beams and slabs for a given reinforced concrete building. That difference was found to be more accentuated for buildings with concrete made with high-grade cement (42.5) than those with concrete made with low-grad cement (32.5) (Fig.6).

Thus, a detailed analysis of the previous results (Fig.6) show that a 100% of the columns, 82% of the beams and 82% of the slabs of the reinforced concrete buildings made from cement grade (32.5) had compressive strengths lower than the required normative compressive strength (25MPa). In addition, it was also found that 50% of the columns, 50% of the beams and 84% of the slabs of the reinforced concrete buildings made with cement grade (42.5) had compressive strengths lower than the required normative compressive strength (35MPa) (Fig.6).



Figure 4 – Comparative results of compressive strengths obtained under t he hydraulic press and the sclerometer on the same experimental concrete samples with cement grade (32.5) Source: compiled by the authors.



Experimental samples (B1...B7) of concrete made with cement grade 42.5

Figure 5 – Comparative results of compressive strengths obtained under the hydraulic press and the sclerometer on the same experimental concrete samples with cement grade (42.5) Source: compiled by the authors.



Figure 6 – Compressive strengths determined by sclerometer test in-situ for concrete from columns, beams and slabs of the investigated reinforced concrete buildings Source: compiled by the authors.

304



Figure 7 – Concrete bearing elements whose compressive strengths are under normative compressive strengths in studied individual's reinforced concrete buildings in Burundi

#### Source: compiled by the authors.

#### **DISCUSSION AND CONCLUSION**

In this study, the reliability of the results obtained by sclerometer test in-situ on the reinforced concrete buildings has been proved. It is demonstrated that the concrete is one the factors of the collapse of reinforced concrete buildings constructed by individuals in Burundi. Low-grade cement is observed to have a high impact in the collapse of reinforced concrete structures than the high-grade one. Therefore, as a recommendation, the process of building reinforced concrete buildings in Burundi needs to be regulated and controlled.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Boateng F. G. Building collapse in cities in Ghana. A case for a historical-intitutional grounding for building risk in developping countries. International Journal of Disaster Risk reduction. Volume 50, Novemeber 2020, 101912.

2. Francis O. Okeke, Chinwe G. Sam-amobi, Francis I. Okeke. Role of local town planning authorities in building collapse in Nigeria: evidence from Enugu metropolis. Heliyon. xxx (xxxx) xxx.

3. NF EN-12504-2 (2003) Essai pour béton dans les structures. Partie 2: Essais non destructifs – Détermination de l'indice de rebondissement.

4. NF EN 13791 (2007). Assessment of concrete compressive strength in structures or in precast concrete products.

5. Конухин В. П., Смирнов Ю. Г., Орлов А. О. Оперативный контроль прочностных свойств бетона неразрушающим методом при возведении ответственных железобетонных конструкций в условиях Арктики // Арктика: экология и экономика. 2012. № 4 (8). 6. Ayadeji O. (2011). An examination of the causes and effects of Building Collapse in Nigeria. Journal of design and Built environment, 9, 2011.

7. ESIRIS. Identification, investigation et diagnostic des défauts d'un bâtiment existant. Annales du bâtiment et des Travaux publics, vol.66, 2014. pp. 206-211.

8. Nguyen N. T. Apport de l'étude de la variabilité spatiale des mesures non destructives en vue d'un meilleur diagnostic des ouvrages en béton armé. 32èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil (AUGC 2014), Orléans, 4-6 juin 2014. 8 p.

9. Ngoc Tan NGUYEN. Évaluation non destructive des structures en béton armé. Étude de la variabilité spatiale et de la combinaison des techniques. Thèse de Doctorat à l'Université de Bordeaux, juin 2014.

10. Oloyede S., Omoogun C. and Akinjare O. (2010). Tackling Causes of Frequent Building Collapse in Nigeria. Journal of Sustainable Development, 3, 2010.

11. Ngugi H. N., Mutuku R. N. and Gariy Z. A. (2014). Effects of Sand Quality on Compressive Strength of Concrete: A Case of Nairobi County and Its Environs, Kenya. Open Journal of Civil Engineering, 2014. Pp. 255-273.

12. Olanitori L. M. (2006). Mitigating the effect of Clay content of sand on concrete stregnth.31st conference on Our world in concrete and structures, Singapore. August 2006.

13. J. Gora Piasta W. Impact of mechanical resistance of aggregate on properties of concrete. Elsevier. Case studies in construction materials 13 (2020).

14. Machuki O.V. (2012). Causes of collapse of Building in Mombasa County. A case of Mombasa City – Kenya. Departement of extra Mural Studies. University of Nairobi. Kenya 2012.

15. Hong L., Gu X., Lin F. Influence of aggregate surface roughness on mechanical properties of interface and concrete, Constr. Build. Mater. 65 (2014). 16. Mansur Hamma-Adama. Causes of Building Failure And Collapse In Nigeria: Professionals «View» American Journal of Engineering Research (AJER). 2017. vol. 6, no. 12. pp. 289-300.

17. Olajumoke A, Oke I, Fajobi A, Ogedengbe M. Engineering failure analysis of failed building in Osun State, Nigeria. Journal of failure analysis and prevention. 9 (1). 2009.

18. Gulay F. G., Kaptan K., Bal E. I., Tezcan S. S. Scoring Method for the Collapse Vulnerability Assessment of R/C Buildings. The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction. Procedia Engineering 14 (2011) 1219–1228.

#### REFERENCES

1. Boateng F. G. Building collapse in cities in Ghana. A case for a historical-intitutional grounding for building risk in developping countries. *International Journal of Disaster Risk reduction*. Volume 50, Novemeber 2020, 101912.

2. Francis O. Okeke, Chinwe G. Sam-amobi, Francis I. Okeke. Role of local town planning authorities in building collapse in Nigeria: evidence from Enugu metropolis. Heliyon. xxx (xxxx) xxx.

3. NF EN-12504-2 (2003) Essai pour béton dans les structures. Partie 2: Essais non destructifs – Détermination de l'indice de rebondissement.

4. NF EN 13791 (2007). Assessment of concrete compressive strength in structures or in precast concrete products.

5. Konuhin V. P., Smirnov Ju. G., Orlov A. O. Operativnyj kontrol' prochnostnyh svojstv betona nerazrushajushhim metodom pri vozvedenii otvetstvennyh zhelezobetonnyh konstrukcij v uslovijah Arktiki. [Operational control of concrete strength properties by non-destructive method during erection of critical reinforced concrete structures in Arctic conditions]. *Arktika: jekologija i jekonomika*. 2012; 4 (8). (in Russ.)

6. Ayadeji O. (2011). An examination of the causes and effects of Building Collapse in Nigeria. Journal of design and Built environment, 9, 2011.

7. ESIRIS. Identification, investigation et diagnostic des défauts d'un bâtiment existant. Annales du bâtiment et des Travaux publics, vol.66, 2014. pp. 206-211.

8. Nguyen N. T. Apport de l'étude de la variabilité spatiale des mesures non destructives en vue d'un meilleur diagnostic des ouvrages en béton armé. 32èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil (AUGC 2014), Orléans, 4-6 juin 2014. 8 p.

9. Ngoc Tan NGUYEN. Évaluation non destructive des structures en béton armé. Étude de la variabilité spatiale et de la combinaison des techniques. Thèse de Doctorat à l'Université de Bordeaux, juin 2014.

10. Oloyede S., Omoogun C. and Akinjare O. (2010). Tackling Causes of Frequent Building Collapse in Nigeria. Journal of Sustainable Development, 3, 2010.

11. Ngugi H. N., Mutuku R. N. and Gariy Z. A. (2014). Effects of Sand Quality on Compressive Strength of Concrete: A Case of Nairobi County and

Its Environs, Kenya. *Open Journal of Civil Engineering*. 2014. Pp. 255-273.

12. Olanitori L. M. (2006). Mitigating the effect of Clay content of sand on concrete stregnth.31st conference on Our world in concrete and structures, Singapore. August 2006.

13. J. Gora Piasta W. Impact of mechanical resistance of aggregate on properties of concrete. Elsevier. *Case studies in construction materials* 13 (2020).

14. Machuki O.V. (2012). Causes of collapse of Building in Mombasa County. A case of Mombasa City – Kenya. Departement of extra Mural Studies. University of Nairobi. Kenya 2012.

15. Hong L., Gu X., Lin F. Influence of aggregate surface roughness on mechanical properties of interface and concrete, Constr. Build. Mater. 65 (2014).

16. Mansur Hamma-Adama. Causes of Building Failure And Collapse In Nigeria: Professionals «View» *American Journal of Engineering Research (AJER)*. 2017. vol. 6, no. 12. pp. 289-300.

17. Olajumoke A, Oke I, Fajobi A, Ogedengbe M. Engineering failure analysis of failed building in Osun State, Nigeria. *Journal of failure analysis and prevention*. 9 (1). 2009.

18. Gulay F. G., Kaptan K., Bal E. I., Tezcan S. S. Scoring Method for the Collapse Vulnerability Assessment of R/C Buildings. *The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*. Procedia Engineering 14 (2011) 1219–1228.

#### ВКЛАД СОАВТОРОВ

Микерего Э. Концептуализация, методология, обработка данных, написание статьи, научное редактирование текста.

Ндикумана Ж. Методология, сбор и обработка данных.

#### COAUTHOR'S CONTRIBUTION

*Emmanuel Mikerego – Conceptualization, methodology, data processing, writing of the article, scientific editing of the text.* 

Justin Ndikumana – Methodology, data collecting and processing.

#### ИНФОРМАЦИЯ АБ АВТОРАХ

Микерего Эммануэль – канд. техн. наук, преподаватель факультета инженерных наук, кафедры строительства.

Ндикумана Жистэн – магистрант факультета инженерных наук, кафедры строительства.

#### **INFORMATION ABOUT AUTHORS**

Emmanuel Mikerego – Dr. of Sci., Lecturer, University of Burundi, Engineering Sciences Faculty. B.P. 2700 Bujumbura – Burundi.

Justin Ndikumana – Graduate student; University of Burundi; Engineering Sciences Faculty; Department of Civil Engineering, B.P 2700 Bujumbura – Burundi.

#### 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 представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Обсуждение и заключение. Раздел содержит интерпретацию полученных результатов исследования, предположения о полученных фактах, сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

#### 9. Библиографический список (References)

В библиографический список включаются только те источники, которые автор использовал при подготовке статьи. Оформление библиографического списка регламентируется ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 20–40 источников, но не более 50. Из них за последние 3 года – рекомендуется указать не менее 20, иностранных – не менее 15. Важно правильно оформить ссылку на источник.

Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет.

Источники указываются в конце статьи в алфавитном порядке либо в порядке упоминания в тексте статьи.

Приводится на русском языке и в латинице по образцу, представленному на сайте журнала.

Аффилиация. Фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, ORCID i, Scopus Author ID, ResearcherID, далее указать все места работы, должность, название организации, служебный адрес, электронная почта, телефон, e-mail. Приводится на русском и английском языках.

Технические требования к оформлению.

Формат А4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом употреблении должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подрисуночной 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 – подрисуночные 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;

- лицензионным договором между ФГБОУ ВО «СибАДИ» и авторами;

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. Корректура 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.

308