

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



научный рецензируемый журнал

• ВЕСТНИК СИБАДИ •

The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

“Vestnik SibADI”

Том 18, № 1. 2021
Сквозной номер выпуска – 77
Vol. 18, no. 1. 2021
Continuous issue – 77

наука
science

creation
творчество

образование
education

innovations
инновации

technology
технологии

tradition
традиции

ISSN 2071-7296 (Print)
ISSN 2658-5626 (Online)
DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-6

ВЕСТНИК СИБАДИ

THE RUSSIAN AUTOMOBILE AND HIGHWAY INDUSTRY JOURNAL

DOI 10.26518/2071-7296

**ТОМ 18, № 1. 2021. СКВОЗНОЙ НОМЕР ВЫПУСКА – 77
(VOL. 18, NO. 1. 2021. CONTINUOUS ISSUE – 77)**

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 раз в год

Подписной индекс в каталоге

ООО «Урал-Пресс» 66000

Founder and Publisher:

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

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

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 Rospechat Agency's catalog

www.vestnik.sibadi.org
e-mail: vestniksibadi@yandex.ru

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», 2021

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

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

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),
05.22.08 – Управление процессами перевозки (технические науки),
05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки),
05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки),
05.23.05 – Строительные материалы и изделия (технические науки),
05.23.08 – Технология и организация строительства (технические науки),
05.23.11 – 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.

Журнал индексируется и архивируется:

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

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 26.02.2021. Дата выхода в свет 26.02.2021. Формат 60×84 1/8 Гарнитура Arial. Печать оперативная.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 27,25 Тираж 500 экз. Заказ 500 экземпляров. Свободная цена. Отпечатано в типографии Издательско-полиграфический комплекс Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия

Контент доступен под лицензией CC BY.

Поступившие в редакцию материалы не возвращаются.

Гонорары не выплачиваются.

Все статьи публикуются бесплатно.

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», 2021

"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),

05.22.08 – Management of the transportation process (Technical Sciences),

05.22.10 – Operation of automobile transport (Technical Sciences),

05.23.01 – Building structures, buildings and facilities (Technical Sciences),

05.23.05 – Building materials and products (Technical Sciences),

05.23.08 – Technology and organization of construction (Technical Sciences),

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

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

The journal is indexed and archived:

in Russian Index of Scientific Citations;

Dimensions;

EBSCO;

Ulrichsweb Global Serials Directory;

Google scholar

The European Library;

SOCIONET;

VINITI RAS;

Cyberlenika

The 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 26.02.2021. Publication date is 26.02.2021. Format is 60 × 84 1/4.

Headset is Arial, operational printing, offset paper, 27,25 conditionally printed sheets, 500 copies. Free of charge.

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

Content is available under license CC BY.

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

© Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", 2021

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 ID** 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

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

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

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

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

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

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

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 ID 0000-0001-8494-2852

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** A-4757-2016
ORCID ID 0000-0002-2378-3947

Макеев Сергей Александрович, д-р техн. проф. наук
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия
ORCID ID 0000-0002-2915-982X

Матвеев Сергей Александрович, д-р техн. наук, проф., Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 56297305000,
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

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, **ORCID ID** 0000-0002-4034-2457

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

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

Хмара Леонид Андреевич, д-р техн. наук, проф., Приднепровская государственная академия Строительства и Архитектуры, г. 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

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, **Researcher ID** N-3447-2017,
ORCID ID 0000-0001-7052-9602

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

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

Усачева Лилия Рафаиловна редактор-ответственный секретарь
e-mail: vestniksibadi@yandex.ru

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

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

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

EDITORIAL TEAM

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

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

Transport, mining and mechanical engineering

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. Sirotiyuk, 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 ID 0000-0002-0292-4421

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

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. Gorynin, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the «SurGUKMAO-Yugra», Surgut, Russia
Scopus Author ID 10040194400

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

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

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

ORCID ID 0000-0001-8494-2852

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

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

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 ID 0000-0002-2915-982X

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,
ORCID ID 0000-0001-7362-0399

Taalibek 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

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 ID** 0000-0002-4034-2457

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

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

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

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

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

Lilya R. Usacheva
Executive Journal Secretary
e-mail: vestniksibadi@yandex.ru

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

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

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

РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

В.Н. Кузнецова, Р.В. Романенко

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ 12**

В.А. Николаев

**НИЖНИЙ ПРИВОД АГРЕГАТА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ
ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕГО СЛОЯ АВТОДОРОГИ 30**

И.С. Кузнецов

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕЗЦА
ФРЕЗЕРНОГО РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРА С ГРУНТОМ 42**

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

А.И. Фадеев, С. Алхуссейни

**ОБСЛЕДОВАНИЕ ПАССАЖИРСКИХ ПОТОКОВ ПУТЕМ АНАЛИЗА
ВАЛИДАЦИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРОЕЗДНЫХ БИЛЕТОВ..... 52**

С.А. Аземша, И.Н. Кравченя

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПИСАНИЯ ДВИЖЕНИЯ
ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА
НА ДУБЛИРУЮЩИХ УЧАСТКАХ 72**

А.С. Кадыров, Б.К. Сарсембеков, А.Б. Кукешева

**ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА
ПО ОЧИСТКЕ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ УЛЬТРАЗВУКОМ 86**

Э.А. Сафронов, К.Э. Сафронов

**ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА БЕЗОПАСНОСТИ
ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ ДО 2024 ГОДА В ОМСКОЙ ОБЛАСТИ 96**

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

С.И. Цехош, Б.В. Журавский, П.И. Цехош

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗНОСА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЩЁТКИ
НА ЕЁ УПРУГУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ, НА ТРЕБУЕМОЕ УСИЛИЕ ПРИЖАТИЯ И
НА ДАВЛЕНИЕ НА ВЫХОДЕ ГИДРОПНЕВМОАККУМУЛЯТОРА УСТРОЙСТВА
УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ ЩЕТОЧНОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА 106**

В.С. Лесовик, А.А. Шеремет, И.Л. Чулкова, А.Э. Журавлева

**ГЕОНИКА (ГЕОМИМЕТИКА) И ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ
В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ 120**

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

V.N. Kuznetsova, R.V. Romanenko

ELECTROMECHANICAL TRANSMISSION OF TRACKED MACHINE ENERGY CHARACTERISTICS STUDY	13
---	-----------

Vladimir A. Nikolaiev

LOWER DRIVE OF CONTINUOUS ACTION UNIT TO FORM UNDERLAYING LAYER OF ROAD	31
--	-----------

Iliia S. Kuznetsov

THEORETICAL STUDY OF INTERACTION PROCESS OF CUTTER FOR MILLING WORKING EQUIPMENT OF EXCAVATOR WITH SOIL	43
--	-----------

PART II. TRANSPORT

A.I. Fadeev, S. Alhusseini

TRANSIT RIDERSHIP SURVEY BY ANALYSIS VALIDATION OF ELECTRONIC PASS TICKETS	53
---	-----------

S.A. Azemsha, I.N. Kravchenia

EFFICIENCY ASSESSMENT OF OPTIMIZING THE SCHEDULE OF URBAN PASSENGER TRANSPORT ON DUPLICATE SECTIONS	73
--	-----------

A.S. Kadyrov, B.K. Sarsembekov, A.B. Kukisheva

PLANNING AN EXPERIMENT FOR CLEANING EXHAUST GASES WITH ULTRASOUND	87
--	-----------

Eduard A. Safronov, Kirill E. Safronov

FEATURES OF ROAD SAFETY PROJECT IMPLEMENTATION UNTIL 2024 IN OMSK REGION	97
---	-----------

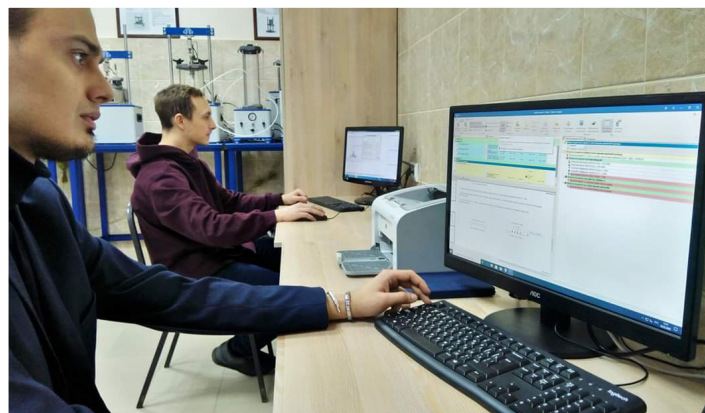
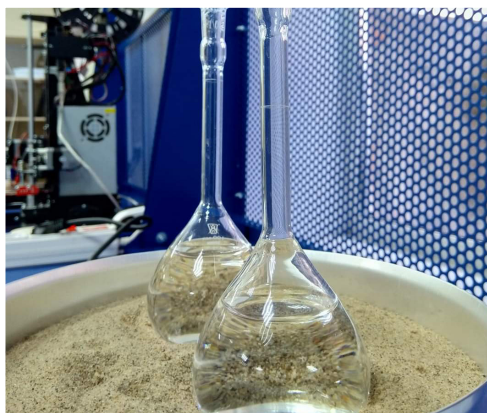
PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

S.I. Tsekhosh, B.V. Zhuravsky, P.I. Tsekhosh

STUDY OF CYLINDRICAL BRUSH WEAR EFFECT ON ITS ELASTIC CHARACTERISTICS, ON REQUIRED PRESSING FORCE AND ON PRESSURE AT THE OUTLET OF HYDRAULIC PNEUMATIC ACCUMULATOR FOR CONTROLLING POSITION OF CHIPPING WORKING BODY	107
---	------------

V.S. Lesovik, A.A. Sheremet, I.L. Chulkova, A.E. Zhuravleva

GEONICS (GEOMIMETICS) AND SEARCH FOR OPTIMAL SOLUTIONS IN BUILDING MATERIALS SCIENCE.....	121
--	------------



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



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

УДК 629.1.032

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-12-29>

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ

В.Н. Кузнецова¹, Р.В. Романенко²¹ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»;²Омский автобронетанковый инженерный институт,
г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Применение в конструкции гусеничной машины электромеханической трансмиссии позволяет повысить комплексный показатель подвижности, увеличить запас хода, топливную экономичность, максимальную скорость движения, снизить время разгона и др. Повышение показателей подвижности достигается за счет рабочих характеристик дизель-генератора и энергетических характеристик электрических машин. Это позволяет обеспечить функционирование моторно-трансмиссионной установки гусеничной машины таким образом, чтобы избежать неблагоприятных с точки зрения энергетической эффективности режимов работы как дизель-генератора, так и составных элементов электромеханической трансмиссии (генератора, тягового электрического двигателя, накопителя энергии), и реализовать высокую эффективность всей системы.

Методы исследования. Для улучшения подвижности и осуществления алгоритма управления электромеханической трансмиссией, обеспечивающий рациональный расход топлива, необходимо понимать об эффективных режимах работы как дизель-генератора, так и основных элементов электромеханической трансмиссии. В качестве способа решения данной задачи в настоящей работе предлагается посредством разработанной математической модели провести исследование энергетических характеристик основных элементов электромеханической трансмиссии при различных режимах движения гусеничной машины.

Результаты. Моделирование движения гусеничной машины с электромеханической трансмиссией дает возможность помимо определения параметров составных частей трансмиссии (генератор, накопитель энергии, тяговый двигатель) сформировать предварительные требования к ее характеристикам.

Обсуждение и заключение. Для решения данных задач необходимо смоделировать процесс движения гусеничной машины с учетом исходных данных, которые адекватны реальным условиям эксплуатации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гусеничная машина, электромеханическая трансмиссия, режим движения, моделирование.

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы выражают благодарность редакции журнала «Вестник СибАДИ» и рецензентам статьи.

Поступила 24.01.21, принята к публикации 26.02.21.

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: Кузнецова В.Н. Исследование энергетических характеристик электромеханической трансмиссии гусеничной машины / В.Н. Кузнецова, Р.В. Романенко. – DOI <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-12-29> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 1(77). – С. 12–29.

© Кузнецова В.Н., Романенко Р.В., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-12-29>

ELECTROMECHANICAL TRANSMISSION OF TRACKED MACHINE ENERGY CHARACTERISTICS STUDY

Victoria N. Kuznetsova¹, Roman V. Romanenko²

¹Siberian State Automobile and Highway University,
Automobile and Highway University (SibADI),

²Omsk Automobile and Armored Engineering Institute
Omsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. The use of an electromechanical transmission in the design of a tracked vehicle allows an increase in the complex indicator of mobility, an increase in the range, fuel efficiency, maximum speed, a decrease in acceleration time, etc. The improvement of these indicators is achieved mainly due to the different performance characteristics of the internal combustion engine and the energy characteristics of electrical machines. The latter fact makes it possible to ensure the operation of the power plant of the tracked vehicle in such a way as to avoid unfavorable operating modes of both the internal combustion engine and the elements of the electromechanical transmission (a generator, a traction electric motor, an energy storage) from the point of view of energy efficiency, and to realize the high efficiency of the entire system.

Research methods. To improve the mobility and implement a rational strategy for electromechanical transmission control, it is necessary to have an idea of the effective modes of operation of the main elements of the power plant. As a way to solve this problem it is proposed to study the energy characteristics of the main elements of an electromechanical transmission using the developed mathematical model for various modes of movement of a tracked vehicle.

Results. Modeling the motion of a tracked vehicle with an electromechanical transmission makes it possible, in addition to determining the transmission parameters, to formulate preliminary requirements for its characteristics.

Discussion and conclusion. To solve these problems, it is necessary to simulate the process of movement of a tracked vehicle, taking into account the initial data that are adequate to real operating conditions.

KEYWORDS: tracked vehicle, electromechanical transmission, driving mode, simulation.

ACKNOWLEDGEMENTS.. The authors express their gratitude to the Russian Automobile and Highway Industry Journal editorial staff and the reviewers of the article.

Submitted 21.01.21, revised 26.02.21.

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: Kuznetsova V.N., Romanenko R.V. Electromechanical transmission of tracked machine energy characteristics study. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (1):12-29. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-12-29>

© Kuznetsova V.N., Romanenko R.V., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений совершенствования конструкции шасси не только колесных, но и гусеничных машин является применение электромеханических трансмиссий (ЭМТ) с гибридными силовыми установками^{1,2} [1, 2, 3, 4, 5]. В результате проведенных исследований разработаны различные функциональные схемы электромеханических трансмиссий, способы управления двигателем гибридных силовых установок, методики обоснования, выбора и расчета режимных и эксплуатационных параметров агрегатов гибридных силовых установок и электромеханических трансмиссий, обеспечивающих требования к подвижности машин, их тягово-динамических свойств, увеличения запаса хода и топливной экономичности техники^{3, 4, 5, 6, 7} [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования процесса движения гусеничной машины проводились на основе математической модели, предусматривающей учет магнитных и электрических потерь в электрических машинах, и параметров накопителей энергии⁷ [11]. Моделирование движения проводилось по типовым циклам движения гусеничной машины (ГМ) с электромеханической трансмиссией (ЭМТ) [9, 11]. При осуществлении моделирования учитывались потери на буксование для получения максимальных значений электрических потерь в электроприводе. Исследования проводились в среде программирования Vissim.

На основе работ, посвященных данной тематике [12, 13], сформулирована математическая модель движения гусеничной машины с электромеханической трансмиссией, отличительной особенностью которой является учет электрических, магнитных потерь, возникаю-

щих в тяговых электрических двигателях (ТЭД) при переходных процессах:

$$\dot{X}_c = \frac{1}{m} [(P_2 + P_1 - P_{f1} - P_{f2}) \sin \varphi + R_6 \cos \varphi; \quad (1)$$

$$\dot{Y}_c = \frac{1}{m} [(P_2 + P_1 - P_{f1} - P_{f2}) \cos \varphi - R_6 \sin \varphi; \quad (2)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{1}{J_c} [(P_2 - P_1 + P_{f1} - P_{f2}) \frac{B}{2} - \sin \varphi \cdot M_c; \quad (3)$$

$$\dot{\omega}_r = [M_d - M_{rn} k_r] \frac{1}{J_1}; \quad (4)$$

$$\dot{\omega}_{тэд1} = [M_{тэд1} \cdot k_r - \frac{P_1 \cdot R_{вк}}{i_{6п}}] \frac{1}{J_2}; \quad (5)$$

$$\dot{\omega}_{тэд2} = [M_{тэд2} \cdot k_r - \frac{P_1 \cdot R_{вк}}{i_{6п}}] \frac{1}{J_3}. \quad (6)$$

В системе уравнений (1) – (6) использованы следующие обозначения: X_c , Y_c – координаты центра тяжести машины в декартовой системе координат, м; φ – курсовой угол, рад; ω_{rn} , $\omega_{эд1}$, $\omega_{эд2}$ – частоты вращения генератора и тяговых электродвигателей, рад/с; m – масса машины, кг; P_1 , P_2 – силы тяги на ведущих колесах, Н; P_{f1} , P_{f2} – сопротивление передвижению колёс, Н; R_6 – сила сопротивления боковому перемещению всех колес, определяемая как сумма поперечных составляющих сил трения колес о грунт; J_c , J_1 , J_2 , J_3 – момент инерции корпуса относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести, момент инерции дизель-генератора, бортовых электродвигателей с присоединенными к ним массами, кг; M_c , M_d , M_{rn} , $M_{тэд1}$, $M_{тэд2}$ – моменты сопротивления повороту гусеничной машины, двигателя внутреннего сгорания, генератора, электродвигателей соответственно, Н·м; $R_{вк}$ – радиус ведущего колеса, м; i_p – передаточные числа в редукторе, k_r – коэффициент, определяемый магнитным потоком генератора.

¹ Дидманидзе О. Н. Эффективность тягово-транспортных средств при использовании накопителей энергии / О. Н. Дидманидзе, С. А. Иванов, Н. Н. Пуляев. Москва: Мегатрип. 2018. 189 с.

² Гук М.Э. Синтез оптимального регулятора с переключаемой структурой для управления асинхронным электродвигателем / М.Э. Гук, В.С. Юденков. Минск : БГУИР. 2014. 359 с.

³ Савочкин В.А. Статистическая динамика транспортных и тяговых машин. – Москва: Машиностроение. 1993. 320 с.

⁴ Держанский В.Б. Алгоритмы управления движением транспортной машины. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та. 2010. 142 с.

⁵ Фаробин Я.Е. Теория поворота транспортных машин. – Москва: Машиностроение, 1970. 176 с.

⁶ Воронин С.Г. Электропривод летательных аппаратов. – Челябинск: Челяб. гос. техн. ун-т. 2011. 516 с.

⁷ Исаков П.П. Электромеханические трансмиссии гусеничных тракторов. Теория и расчёт / П.П. Исаков, П.Н. Иванченко, А.Д. Егоров. Л.: Машиностроение. 1981. 302 с.

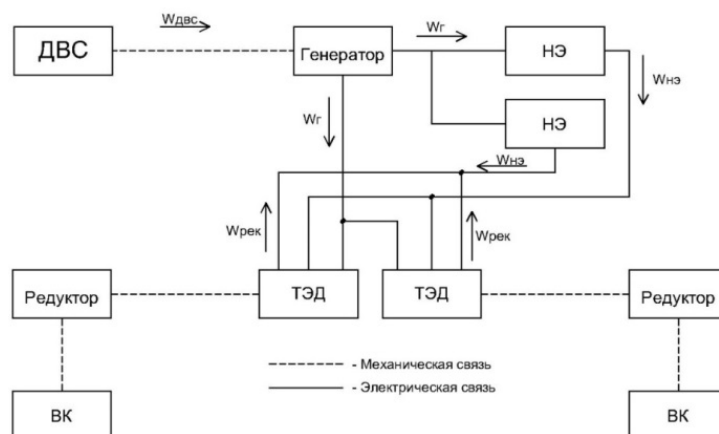


Рисунок 1 – Схема распределения потоков энергии между агрегатами ЭМТ:
 ТЭД – тяговый электрический двигатель, НЭ – накопитель энергии, ВК – ведущие колеса,
 $W_{рек}$ – рекуперативная энергия ТЭД, $W_{двс}$, $W_{Г}$, $W_{НЭ}$ – энергия двигателя внутреннего сгорания,
 генератора, накопителя энергии соответственно

Figure 1 – Diagram of the distribution of energy flows between EMT units
 ТЭД – traction electric motor, НЭ – energy storage, ВК – drive wheels,
 $W_{рек}$ – driving wheels traction electric motor, $W_{двс}$, $W_{Г}$, $W_{НЭ}$ – internal combustion engine energy,
 generator, energy storage device respectively

Основные допущения, принятые в математической модели:

- сопротивления повороту считаются по формулам Ф.А. Опейко, В.В. Гуськова [11];
- не учтена упругость элементов двигателя и гусениц;
- не рассмотрены частичные характеристики дизельного двигателя;
- не рассмотрены статические характеристики дизельного двигателя;
- при составлении математического описания электрических машин ЭМТ (генератор, тяговые электрические двигатели) приняли допущения, позволяющие построить математическую модель^{8,9} [12, 13] на базе непрерывных динамических уравнений Парка-Горева;
- не учтена индуктивность в ТЭД.

Для проведения имитационного моделирования движения ГМ с ЭМТ необходимо определить рациональный алгоритм управления электромеханической трансмиссией. Главными вопросами в ходе разработки алгорит-

ма управления ЭМТ являются: определение последовательности распределения потоков мощности и условий подключения второго потока мощности от накопителя энергии. Последовательность и условия распределения мощности в ЭМТ должны основываться на условиях движения и обеспечивать выполнение требований к динамике, а также обеспечивать минимальный расход топлива ДВС.

Из приведенной схемы (рисунок 1) следует возможность реализации двух режимов работы ЭМТ:

- 1) раздельная работа генератора (Г) и накопителя (НЭ);
- 2) совместная работа генератора и накопителя.

Различие данных режимов состоит в том, что при раздельной работе Г и НЭ на отдельных участках движения энергия поступает на ТЭД только от генератора. При совместной работе имеет место одновременная работа Г и НЭ на ТЭД.

⁸ Воронин С.Г. Электропривод летательных аппаратов. – Челябинск: Челяб. гос. техн. ун-т. 2011. 516 с.

⁹ Закладной А.Н. Энергоэффективный электропривод с вентильными двигателями / А.Н. Закладной, О.А. Закладной. – Киев: Либра, 2012. 190 с.

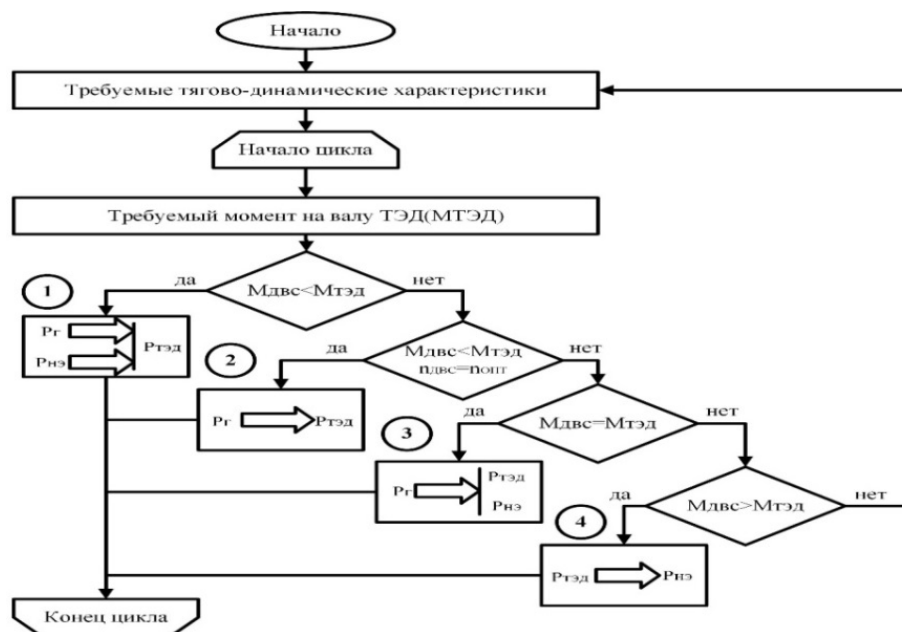


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма управления ЭМТ гусеничной машины:

$P_{тэд}$ – мощность электрического тока тягового электродвигателя; $P_{г}$ – мощность электрического тока генератора; $P_{нэ}$ – плотность электрической энергии накопителя энергии; $M_{двс}$ – момент дизель-генератора, $M_{тэд}$ – момент тягового электродвигателя

Figure 2 – Block diagram of the interaction algorithm of elements electromechanical transmission of a tracked vehicle

$P_{тэд}$ – electric current of traction motor; $P_{г}$ – electric current of generator; $P_{нэ}$ – electrical energy density of the energy storage device; $M_{двс}$ – diesel generator time, $M_{тэд}$ – traction electric motor time

Целесообразность реализации того или иного режима зависит от нескольких факторов, среди них основными являются:

- требуемые значения момента для обеспечения движения в заданных условиях;
- степень заряженности НЭ;
- оптимальные (по условиям минимизации удельного расхода топлива) значения момента и частоты вращения вала ДВС.

Основываясь на возможных режимах работы ЭМТ последовательного типа, а также на основных мероприятиях по организации эффективной работы ДВС в составе ЭМТ, можно предложить базовый алгоритм управления агрегатов электромеханической трансмиссии и выбора оптимального с точки зрения энергетической эффективности режима работы ЭМТ, представленного на рисунке 2.

Для подтверждения адекватности разработанной математической модели и определения необходимых значений параметров основных элементов электромеханической трансмиссии [12, 13] было проведено имитационное моделирование, основными задачами которого являются:

- исследование энергетических характеристик ЭМТ при прямолинейном движении гусеничной машины по типовым циклам;
- исследование управляемого криволинейного движения гусеничной машины с электромеханической трансмиссией;
- определение количественных значений механических потерь на буксование;
- определение электрических и магнитных потерь, возникающих в тяговом электродвигателе.

Математические зависимости для описания процессов имитационных моделей приведены в [12].

Для проведения имитационного моделирования за основу была взята структурная схема электромеханической трансмиссии гусеничной машины (рисунок 3), состоящей из дизельного двигателя внутреннего сгорания (ДВС) «КамаЗ 740.75» мощностью 320 кВт при 2000 об/мин, генератора (Г) с возбуждением от постоянных магнитов (генератор вырабатывает электрическую энергию номинальной мощностью 300 кВт (до 800 В переменного тока при частоте вращения 2000 об/мин), вы-

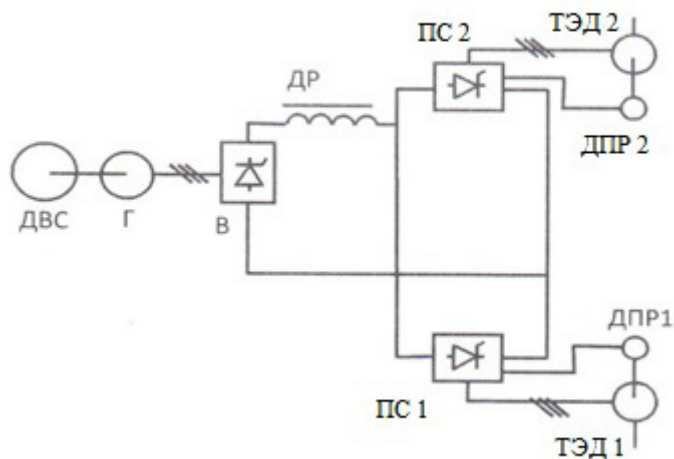


Рисунок 3 – Структурная схема электромеханической трансмиссии ГМ

Figure 3 – Block diagram of ГМ electromechanical transmission

Таблица
Характеристики типовой трассы и цикла движения

Table
Characteristics of the reference line and cycle

№ участка	f_c	Длина участка, м	№ п/п режима	Режим	Величина ускорения, м/с ²	Скорость, км / ч
1	0,06	450	1.1	Ускорение	Расчетная	0,5–70
			1.2	Постоянная скорость	-	70
			1.3	Поворот	-	60
			1.4	Замедление	-2,0	70–15

прямителя (В), двух тяговых электродвигателей (ТЭД) с датчиками положения ротора (ДПР), установленных по бортовой схеме и снабженных преобразователями силовыми (ПС). ТЭД представляет собой бесконтактную трехфазную электрическую машину с постоянными магнитами на роторе. Тяговые электродвигатели имеют обмотки с выделенными для внешнего подключения выходами с шести витков и с двух витков. Таким образом, при разгоне гусеничного шасси возможно переключение обмоток электродвигателя с 6 витков на 2 витка, обеспечивая тем самым постоянную мощность на электродвигателях во всем диапазоне скоростей гусеничного шасси. Номинальная мощность электродвигателя – 150 кВт, кратковременная мощность – 200 кВт. Кроме того, для проведения имитационного моделирования были использованы следующие исходные данные:

- тип гусеничной машины – многоцелевой транспортер легкобронированный (МТ-ЛБу): общая масса машины 15 т, в том числе 11 т – собственная масса, 4 т – грузоподъемность;
 - скорость движения до 70 км/ч;
 - типовая трасса [11]: фрагмент, требующий наибольшего ускорения и поворот $r = 104$ м.
- На предлагаемом участке типовой трассы движение должно осуществляться согласно циклу: разгон – движение с постоянной скоростью – поворот – торможение (таблица).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Целью исследования алгоритма управления электромеханической трансмиссией является проверка работы реле-регулятора и магнитного потока генератора в условиях заряда накопителя энергии при рекуперативном торможении гусеничной машины.

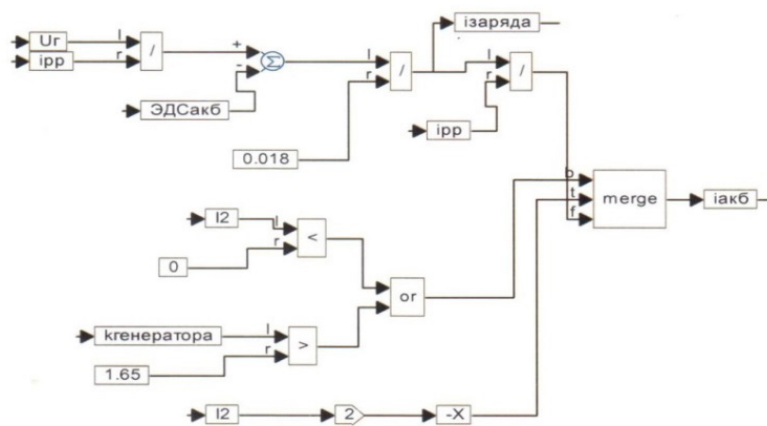


Рисунок 4 – Блок-схема вычисления силы тока накопителя энергии:

i_{pp} – коэффициент усиления;
 U_r – напряжение на клеммах генератора, В;
 k_g – коэффициент, определяемый магнитным потоком генератора;
 I_2 – ток, поступающий в тяговый электродвигатель левого борта, А;
 r – сопротивление, Ом; t – время, с; f – частота генерации;
 $ЭДС_{акб}$ – электродвижущая сила накопителя энергии

Figure 4 – Block diagram for calculating the current strength of the energy storage

i_{pp} – amplification constant;
 U_r – voltage on generator terminals, В;
 k_g – constant determined by the magnetic flow of the generator;
 I_2 – current entering port side traction engine, А;
 r – resistance, Ом; t – time, с; f – generation frequency;
 $ЭДС_{акб}$ – electromotive power of the energy storage device

Управляющее воздействие на силовых преобразователях обоих бортов начинается в момент времени ($t = 5$ с), коэффициент усиления силового преобразователя изменяется с 1 до 2 за 1,7 с. Это приводит к снижению скорости машины с 65 км/ч до 32 км/ч. На рисунке 4 показана блок-схема вычисления силы тока перед реле-регулятором и силы зарядного тока непосредственно на накопитель энергии.

За счет введения в математическую модель регулирования магнитного потока генерато-

ра удалось при рекуперативном торможении предотвратить противоток в генераторе и направить всю электрическую энергию от тяговых электрических двигателей, работающих в генераторном режиме, только на заряд накопителя энергии (НЭ).

На рисунках 5 и 6 приведены блок-схемы вычисления ЭДС накопителя энергии (НЭ) в зависимости от степени заряженности НЭ и заряда накопителя энергии в процессе рекуперативного торможения.

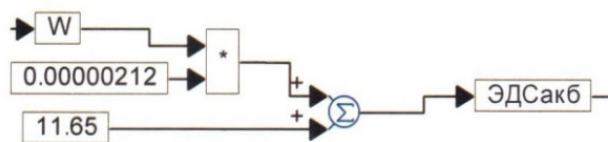


Рисунок 5 – Блок-схема вычисления ЭДС накопителя энергии:

W – энергия заряда, Вт/ч

Figure 5 – Block diagram for calculating the EMF of the energy storage
 W -charge energy, W/h

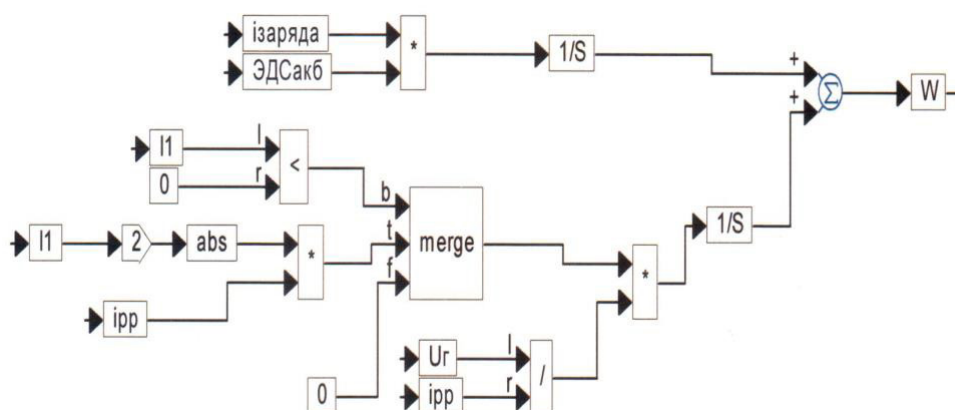


Рисунок 6 – Блок-схема вычисления заряда накопителя энергии:

i_{pp} – коэффициент усиления;
 U_r – напряжение на клеммах генератора, В;
 $\text{ЭДС}_{\text{акб}}$ – электродвижущая сила накопителя энергии;
 I_1 – ток тягового электродвигателя правого борта, А;
 $i_{\text{заряда}}$ – ток заряда

Figure 6 – Block diagram for calculating the charge of the energy storage

i_{pp} – amplification constant;
 U_r – voltage on generator terminals, В;
 $\text{ЭДС}_{\text{акб}}$ – electromotive power of the energy storage device;
 I_1 – starboard traction motor current, А;
 $i_{\text{заряда}}$ – current charge

Интерес представляют зависимости ЭДС в процессе совместной работы генератора и НЭ на тяговые электродвигатели (рисунок 7). В интервале времени $t = 4,5 \dots 13,6$ с энергетическая установка работает в «гибридном

режиме». ЭДС генератора почти совпадает с ЭДС накопителя энергии, а они выше ЭДС тяговых электродвигателей, что соответствует физическому смыслу процесса.

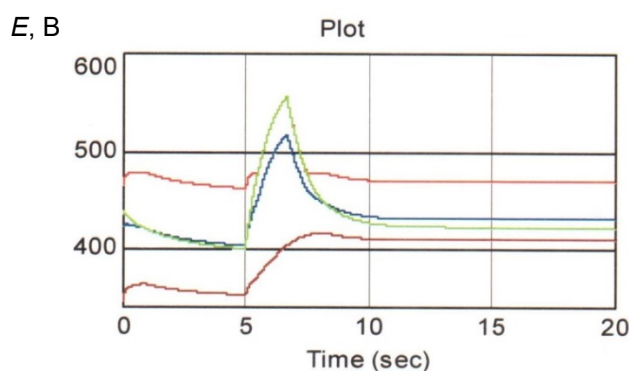


Рисунок 7 – Изменение ЭДС генератора, накопителя энергии и тягового электрического двигателя при совместной работе:

– ЭДС левого и правого тяговых электродвигателей;
 – ЭДС генератора;
 – ЭДС накопителя энергии

Figure 7 – Modification of the EMF of the generator, the energy storage device and the traction electric motor in joiny work

– EMF of the left and right traction electric motors;
 – EMF of the generator;
 – EMF of the energy accumulator

На рисунке 8 приведен график изменения коэффициента усиления реле-регулятора, а на рисунке 9 график изменения момента дизель-генератора во времени. Момент дизель-генератора ограничен корректурной характеристикой, что и заложено в алгоритме управления реле-регулятора в «гибридном режиме».

На рисунке 10 представлен график заряда накопителя энергии. При подключении второго потока мощности тратится почти 100 кДж, которые постепенно восполняются при достаточно равномерном движении (до 5 с и после 14 с).

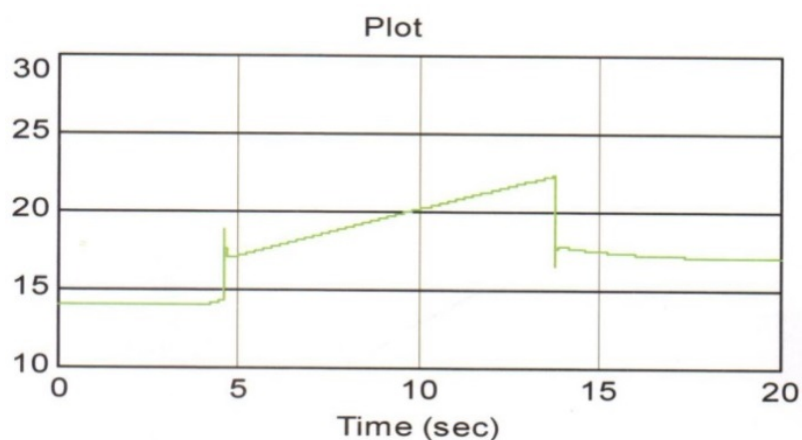
 K 

Рисунок 8 – Изменение коэффициента усиления реле-регулятора во времени

Figure 8 – Change of the relay controller gain over time

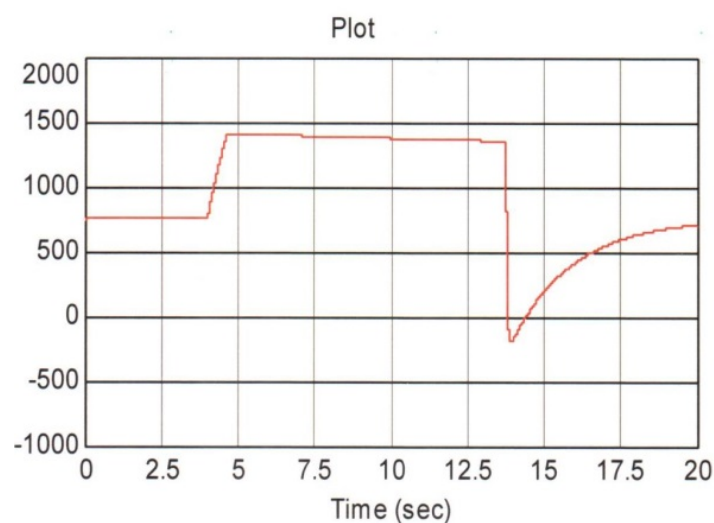
 $M, \text{ Н} \cdot \text{м}$ 

Рисунок 9 – Изменение момента дизель-генератора во времени

Figure 9 – Diesel generator torque change over time

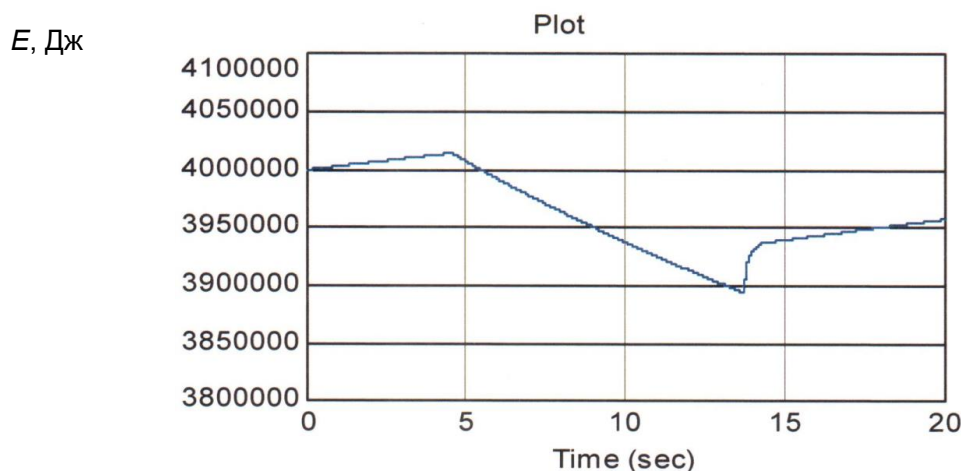


Рисунок 10 – Изменение заряда накопителя энергии во времени

Figure 10 – Changing the charge of the energy storage unit over time

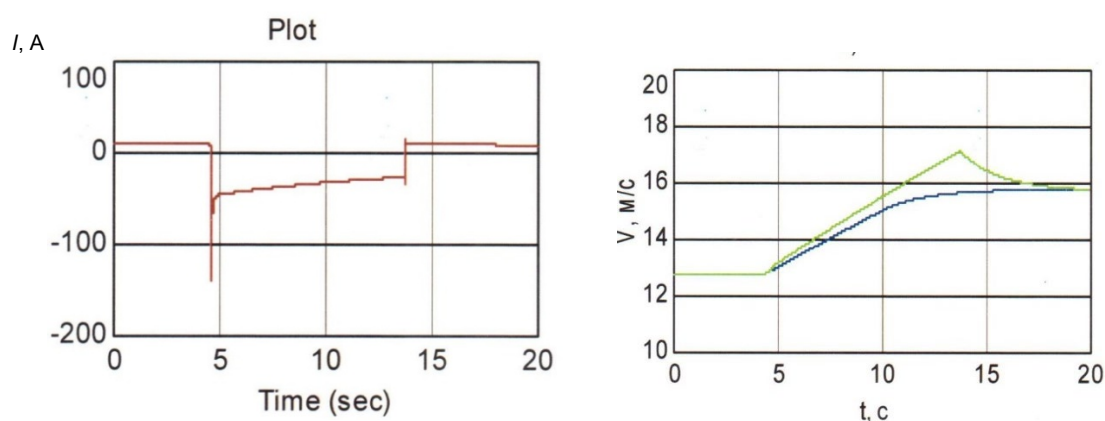


Рисунок 11 – Изменение тока разряда накопителя энергии и изменение скорости движения гусеничной машины во времени

Figure 11 – Changing the discharge current of the energy storage device and changing the speed of the tracked vehicle unit over time

На рисунке 11 приведены графики тока разряда НЭ и скорости гусеничной машины. Для сравнения на графике скорости гусеничной машины дана зависимость скорости от времени в случае отсутствия второго потока мощности, то есть накопителя энергии (синяя линия). Машина достигает скорости в 16 м/с, медленнее на 21%.

Особый интерес представляет криволинейное движение гусеничной машины с электромеханической трансмиссией, так как поворот может осуществляться за счет торможения отстающего борта замыканием тягового электродвигателя (ТЭД) на активное сопротивление. Как результат, можно получить определенное количество рекуперативной электрической энергии.

Для перевода в режим рекуперации тягового электродвигателя необходимо, чтобы его частота вращения стала выше частоты вращения идеального холостого хода. Данное условие реализовано с помощью силового преобразователя, изменяющего соотношения тока и напряжения (рисунок 12).

Поворот гусеничной машины происходит за счет снижения тока правого тягового электродвигателя до нуля. Торможение тяговых электродвигателей происходило за счет работы силовых преобразователей.

В программе реализовано переключение коэффициента трансформации $i_{тр}$ в момент времени ($t = 5$ с) и дальнейший вход машины в поворот ($r = 9$ м). Заданы следующие условия дороги: коэффициент передвижения $\psi_{min} = 0,12$ как на правой гусенице, так и на левой; коэффициент сцепления суммарный $\phi_{max} = 0,65$; коэффициент сопротивления повороту $\mu_{max} = 0,7$. Тяговые электродвигатели работают в режиме небольших скоростей при $k = 2,95$,

где коэффициент k является произведением $C_e \cdot \Phi_{эд}$ (C_e – постоянная величина для данного типа электродвигателя, $\Phi_{эд}$ – магнитный поток электродвигателя). Поворот осуществляется на скорости движения в 4 м/с.

При положительном токе I_2 ТЭД питается от дизель-генератора, а при отрицательном I_1 – при рекуперативном торможении возвращает энергию в сеть. Отличие в данном способе управления тяговыми электродвигателями зависит от направления тока тягового электродвигателя отстающего борта.

Энергия, которая возвращается от тяговых электродвигателей, заряжает накопитель энергии. Дизель-генератор в свою очередь переходит на режим экономичного расхода топлива.

На рисунке 13 приведены результаты изменения коэффициента трансформации во времени, полученные в результате имитационного моделирования криволинейного движения гусеничной машины.

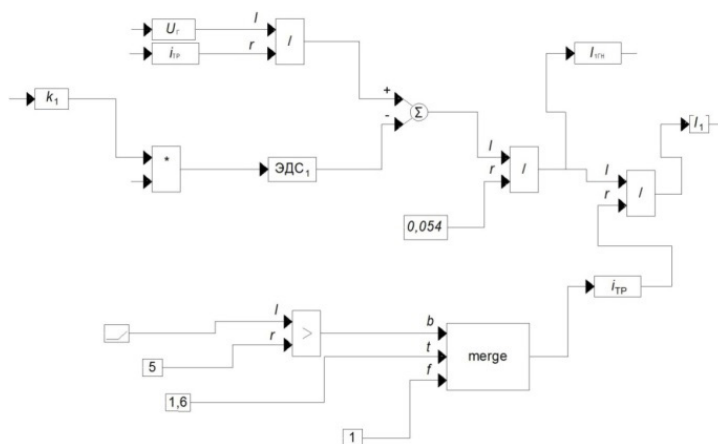


Рисунок 12 – Блок-схема системы управления поворотом гусеничной машины:

$i_{тр}$ – коэффициент трансформации;
 U_r – напряжение на клеммах генератора, В;
 k_1 – коэффициент, определяемый магнитным потоком генератора;
 $I_{1ГН}$ – ток, поступающий в ТЭД 1, работающий в генераторном режиме, А;
 I_1 – ток, поступающий в тяговый электродвигатель правого борта, А;
 r – сопротивление, Ом; t – время, с; f – частота генерации;
 $ЭДС_1$ – электродвижущая сила генератора

Figure 12 – Block diagram of a tracked vehicle steering control system

$i_{тр}$ – transformation ratio;
 U_r – voltage on generator terminals, В;
 k_1 – constant determined by the magnetic flow of the generator;
 $I_{1ГН}$ – current entering the TEM 1, working in a generating mode, А;
 I_1 – current entering starboard traction engine, А;
 r – resistance, Ом; t – time, с; f – generation frequency;
 TEM_1 – generator electromotive force

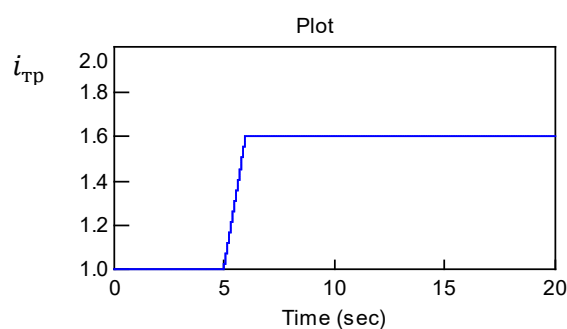


Рисунок 13 – Изменение коэффициента трансформации во времени

Figure 13 – Change in the transformation ratio over time

Изменение коэффициента трансформации привело к изменению величин токов I_1 и I_2 (рисунок 14).

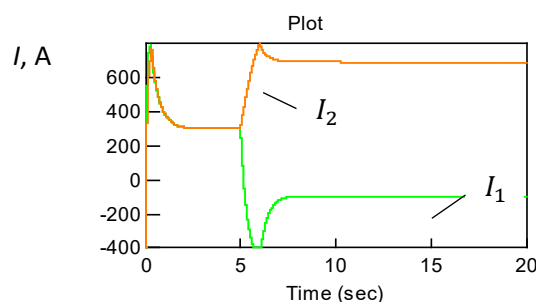


Рисунок 14 – Изменение токов тяговых электродвигателей во времени

Figure 14 – Changes in the currents of traction motors over time

По энергетическим же показателям, то есть по затратам мощности на поворот, рекуперативное торможение характеризуется зависимостями, приведенными на рисунке 15.

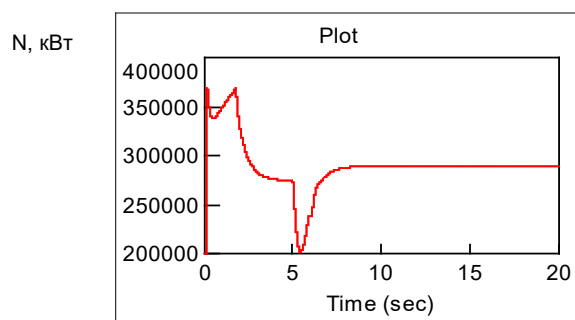


Рисунок 15 – Изменение мощности дизель-генератора при рекуперативном торможении

Figure 15 – Change in the power of the diesel generator with regenerative braking

Интерес представляет мощность рекуперации при движении гусеничной машины с большой скоростью и малой кривизной (минимальный радиус – 104 м, скорость на прямом участке – 18 м/с, скорость при повороте – 17,4 м/с) (рисунок 16) и работе тяговых электродвигателей при режиме больших скоростей (при $k = 0,98$; $R = 0,018$ Ом).

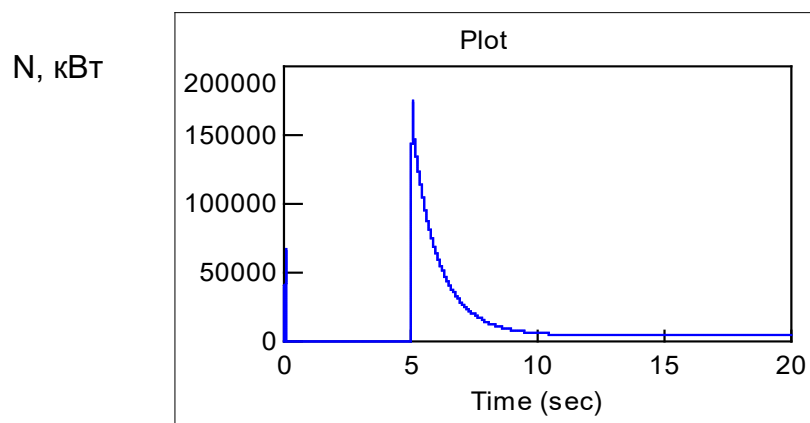


Рисунок 16 – Изменение мощности рекуперации при движении гусеничной машины со скоростью 18 м/с

Figure 16 – Change in recuperation power driving tracked vehicle with a speed of 18 m / s

Мощность, передаваемая тяговым электродвигателем забегающего борта при скорости машины, равной 18 м/с в установившемся радиусе поворота $r = 104$ м, составляет 170 кВт. В процессе входа в поворот рекуперативная мощность, как видно из рисунка 16, составляет 150 кВт, в установившемся повороте – 5 кВт.

Целью проведения имитационного моделирования буксования гусеничной машины являлось получение количественных значений механических потерь на буксование, а также электрических и магнитных потерь, возникающих в тяговых электрических двигателях.

На рисунках 17 и 18 даны блок-схемы определения коэффициента буксования и силы тяги по бортам.

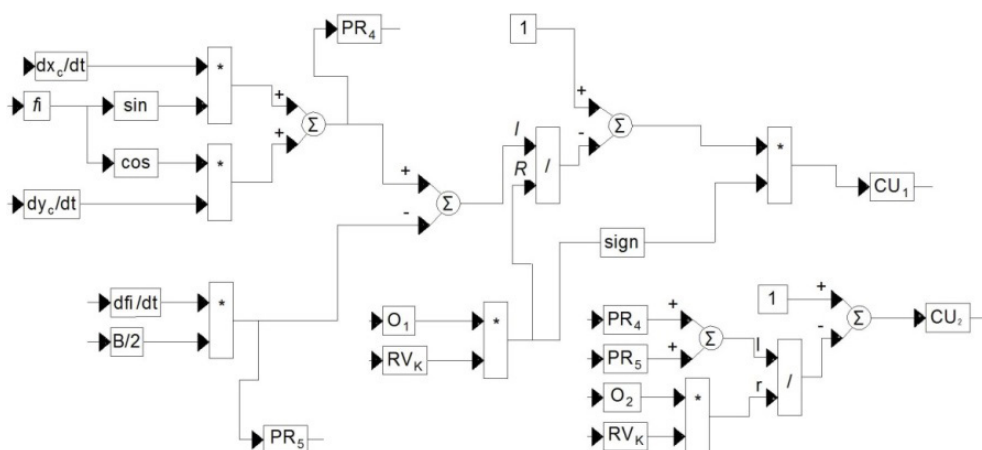


Рисунок 17 – Блок-схема определения коэффициента буксования:

PR_4 – боковая сила инерции правого борта, Н;
 PR_5 – боковая сила инерции левого борта, Н;
 RV_k – радиус ведущего колеса, м;
 CU_1 – буксование гусениц правого борта;
 CU_2 – буксование гусениц левого борта

Figure 17 – Block diagram for determining the slip coefficient

PR_4 – starboard lateral inertia, Н;
 PR_5 – lateral force of port inertia, Н;
 RV_k – drive wheel radius, m;
 CU_1 – starboard tumbling;
 CU_2 – port side tug

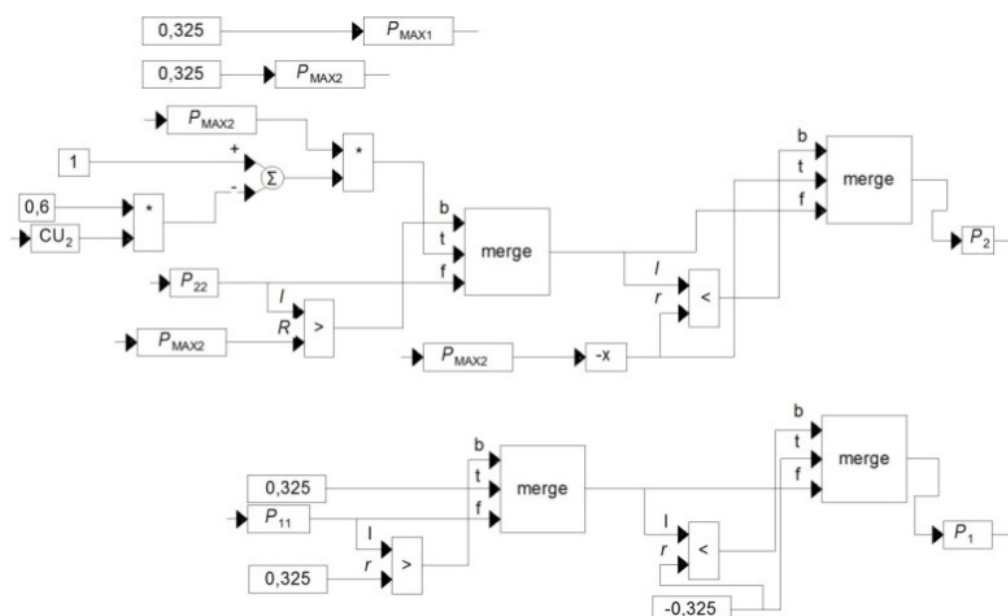


Рисунок 18 – Блок-схема определения силы тяги по бортам:
 P_{MAX1} – максимальное значение относительной тяги на правом борту;
 P_{MAX2} – максимальное значение относительной тяги на левом борту;
 P_{11} – промежуточное значение силы тяги на правом борту;
 P_{22} – промежуточное значение силы тяги на левом борту

Figure 18 – Block diagram for determining the thrust forces along the sides
 P_{MAX1} – maximum value of relative thrust on the starboard side;
 P_{MAX2} – maximum value of relative thrust on port side;
 P_{11} – intermediate starboard thrust value;
 P_{22} – intermediate load on port side

На рисунках 19 и 20 представлены результаты моделирования движения гусеничной машины на участке типового цикла [11]. Как видно из рисунка 18, в процессе разгона машины на заданном участке изменяется коэффициент буксования.

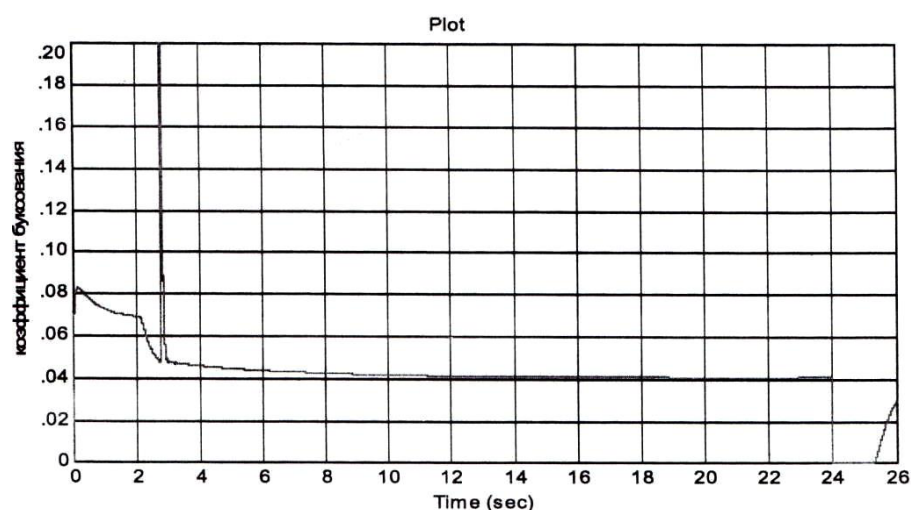


Рисунок 19 – Изменение коэффициента буксования во времени

Figure 19 – Change in slip coefficient over time

Потери на буксование в период разгона составляют более 20 кВт (см. рисунок 20).

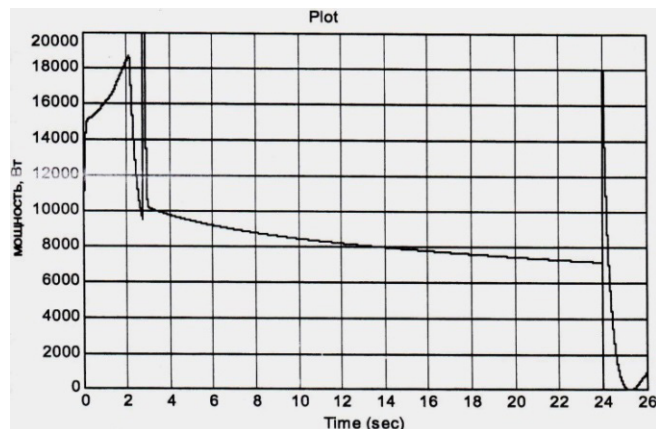


Рисунок 20 – Изменение мощности потерь на буксование

Figure 20 – Change in power slip losses

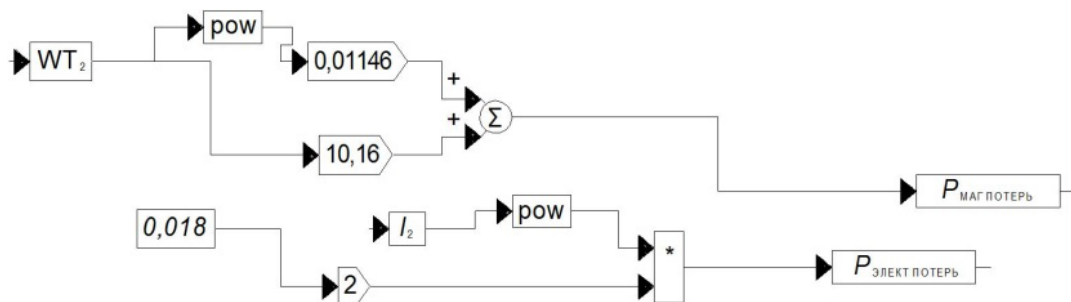


Рисунок 21 – Блок-схема определения магнитных и электрических потерь в тяговых электродвигателях:

WT_2 – энергия тягового электродвигателя левого борта при торможении, Вт/кг;

I_2 – сила тока тягового электродвигателя левого борта, А;

$P_{\text{МАГ. ПОТЕРЬ}}$ – мощность магнитных потерь ТЭД, Вт/кг;

$P_{\text{ЭЛЕКТ. ПОТЕРЬ}}$ – мощность электрических потерь ТЭД, Вт

Figure 21 – Block diagram of the determination of magnetic and electrical losses in traction motors

WT_2 – energy of left-hand drive electric motor during braking, W/kg;

I_2 – port side traction motor current, A;

$P_{\text{МАГ. ПОТЕРЬ}}$ – TEM magnetic loss rate, W/kg;

$P_{\text{ЭЛЕКТ. ПОТЕРЬ}}$ – TEM electrical loss power, W

Таким образом, потери на буксование являются весомой величиной. В заданных условиях по динамическим требованиям к гусеничной машине, участках разгона с «тяжелым грунтом» составляют 20 кВт при заданной мощности тяговых электродвигателей 150 кВт.

На рисунке 21 приведена блок-схема определения магнитных и электрических потерь.

На рисунке 22 даны количественные значения магнитных и электрических потерь в тяго-

вом электродвигателе при движении машины в различных режимах (разгон, движение с постоянной скоростью, торможение).

Как видно из рисунка 22, магнитные и электрические потери достигают максимальных значений в процессе разгона и торможения машины: до 20 кВт. При установившемся движении магнитные и электрические потери достигают значений 10 кВт в каждом тяговом электродвигателе.

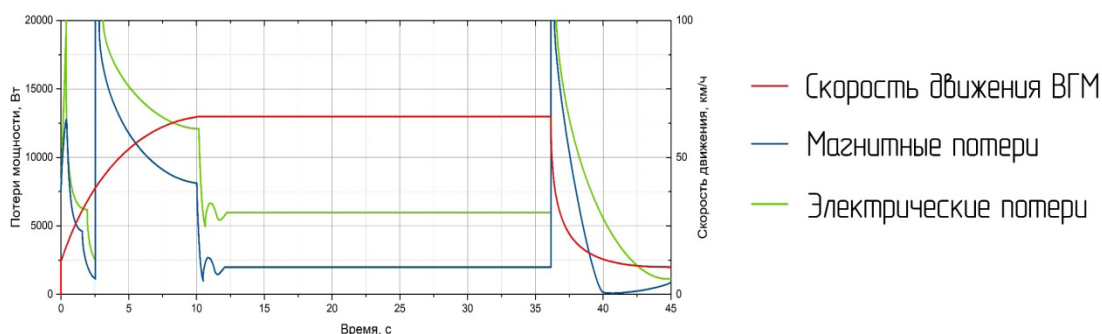


Рисунок 22 – Магнитные и электрические потери в тяговых электродвигателях при движении машины в различных режимах

Figure 22 – Magnetic and electrical losses in traction motors when the car is moving in various modes

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В ходе проведения имитационного моделирования было установлено, что потери на буксование в переходных процессах достигают до 15% от мощности тяговых электродвигателей. Это подтверждает необходимость учета указанных потерь при расчете энергетических показателей тяговых электродвигателей.

2. Имитационное моделирование показало, что магнитные и электрические потери в тяговых электродвигателях в установившемся режиме движения составляют 7% мощности каждого тягового электродвигателя, а в переходных режимах достигают 14% мощности каждого тягового электродвигателя. Соответственно необходимо учитывать их при расчете энергетических характеристик тяговых электромашин.

3. В ходе проведения имитационного моделирования было установлено, что применение разработанного алгоритма управления электромеханической трансмиссией позволяет дизель-генератору работать по экономической характеристике, что обеспечивает минимальный расход топлива в заданных режимах движения.

4. В результате проведенного имитационного моделирования был исследован алгоритм управления электромеханической трансмиссией. Сформулировано условие подключения второго потока мощности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gai J., Huang Sh., Zhou G., LI Sh. Design method of power coupling mechanism scheme for double side motors coupling drive transmission // China Mechanical Engineering. 2014. 25 (13). 1739-1743. doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.707.
2. Кулаков Н.А., Селифонов В.В., Черанев С.В. Выбор оптимальной конструкции механической части электрической трансмиссии специального колесного шасси 8x8 // Известия МГТУ «МАМИ». 2010. № 1. С. 78–82.
3. Гомберг Б.Н., Кондаков С.В., Носенко Л.С. Имитационное моделирование движения быстроходной гусеничной машины с электрической трансмиссией // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2012. 18 (37). С. 73–81.
4. Лепешкин А.В. Критерии оценки энергоэффективности многоприводных колесных машин // Автомобильная промышленность. 2010. № 10. С. 19–23.
5. Кулаков Н.А., Лепешкин А.В., Черанев С.В. Разработка и исследование математической модели полноприводного четырехосного автомобиля с электротрансмиссией // Известия МГТУ (МАМИ). 2011. № 2 (12). С. 95–105.
6. Савинкин В.В., Кузнецова В.Н. Разработка конструкции гибридного привода поворотной платформы землеройной машины для выполнения строительных работ // Вестник СибАДИ. 2015. № 1 (41). С. 17–24.
7. Galvagno E., Velardocchia M., Rondinelli E. Electro-Mechanical Transmission modelling for series-hybrid tracked tanks // International Journal of Heavy Vehicle Systems 19 (03). 256-280. DOI. 10.1504/IJHVS.2012.047916.

8. Романенко Р.В., Сергеев В.В. Моделирование криволинейного движения роботизированной военной гусеничной машины с электромеханической трансмиссией // Робототехника и техническая кибернетика. 2020. 8.(1). С. 34–40.

9. Романенко Р.В., Дружинин П.В., Сергеев В.В. Реализуемая схема комбинированной силовой установки с электромеханической трансмиссией наземного робототехнического комплекса, выполняющего задачи материально-технического обеспечения // Наука и военная безопасность. 2018. № 12. С. 21–26.

10. Романенко Р.В., Дружинин П.В. Обоснование типовых циклов движения военных гусеничных машин с электромеханической трансмиссией // Актуальные вопросы перспективных направлений применения ВВСТ. 2019. С. 113–117.

11. Кузнецова В.Н., Романенко Р.В. Основные аспекты методики обоснования эксплуатационных характеристик гусеничной машины с электромеханической трансмиссией // Вестник СибАДИ. 2020. 17 (5). С. 574–584.

12. Кондаков С.В., Павловская О.О. Исследование поворота энергоэффективной быстроходной гусеничной машины с интеллектуальной электрической трансмиссией // Вестник машиностроения. 2014. №11. С. 51–55.

REFERENCES

1. Gai J., Huang Sh., Zhou G., Li Sh. Design method of power coupling mechanism scheme for double side motors coupling drive transmission // *China Mechanical Engineering*. 2014; 25(13): 1739-1743. doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.707.

2. Kulakov N.A., Selifonov V.V., Cheranyov S.V. Vybór optimal'noj konstrukcii mekhanicheskoy chasti elektricheskoy transmissii special'nogo kolesnogo shassi 8x8 [The choice of the optimal design of the mechanical part of the electric transmission of the special wheeled chassis 8x8]. *Izvestiya MGTU (MAMI)*. 2010; 1: 78-82. (In Russian)

3. Gomberg B.N. Imitating modelling of the movement of a fast-moving tracked vehicle fitted with electrical transmission / B.N. Gomberg, S.V. Kondakov, L.S. Nosenko // *Bulletin of South Ural State University. Power Engineering series*. 2012; 18(37): 73-81.

4. Lepeshkin A.V. Kriterii ocenki energoefektivnosti mnogoprivodnykh kolesnykh mashin [Criteria for evaluating the energy efficiency of multi-drive wheeled vehicles]. *Automotive industry*. 2010; 10: 19-23. (In Russian)

5. Kulakov N.A., Lepeshkin A.V., Cheranev S.V. Razrabotka i issledovanie matematicheskoy modeli polnoprivodnogo chetyrekhosnogo avtomobilya s elektrotransmissiej [Development and research of a mathematical model of an all-wheel drive four-axle vehicle with electric transmission]. *Scientific peer-reviewed journal Izvestiya MSTU (MAMI)*. 2011; 2 (12): 95-105. (In Russian)

6. Savinkin V.V. Razrabotka konstrukcii gibridnogo privoda povorotnoj platformy zemlerojnoj mashiny dlya vypolneniya stroitel'nykh rabot [Development of

the design of a hybrid drive of a rotary platform of an earthmoving machine for performing construction work] / V.V. Savinkin, V.N. Kuznetsova // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2015; 1 (41): 17-24. (In Russian)

7. Isakov P.P. Elektromekhanicheskie transmissii gusenichnykh traktorov. Teoriya i raschyot [Electromechanical transmissions of tracked tractors. Theory and calculation] / P.P. Isakov, P.N. Ivanchenko, A.D. Egorov. L. : *Mechanical engineering*. 1981. 302 p. (In Russian)

8. Galvagno E., Velardocchia M., Rondinelli E. Electro-Mechanical Transmission modelling for series-hybrid tracked tanks // *International Journal of Heavy Vehicle Systems*. 19 (03): 256-280. DOI. 10.1504/IJHVS.2012.047916.

9. Romanenko R.V. Modelirovanie krivoliniynogo dvizheniya robotizirovannoy voennoy gusenichnoy mashiny s elektromekhanicheskoy transmissiej [Modeling curvilinear movement of a robotic military tracked vehicle with electromechanical transmission] / R.V. Romanenko, V.V. Sergeev // *Robotics and technical cybernetics*. Volume 8. No. 1. SPb. : TsNII RTK. 2020: 34-40. (In Russian)

10. Romanenko R.V. Obosnovanie tipovykh ciklov dvizheniya voennykh gusenichnykh mashin s elektromekhanicheskoy transmissiej [Substantiation of typical movement cycles of military tracked vehicles with electromechanical transmission] // *Aktual'nye voprosy perspektivnykh napravlenij primeneniya VVST*. 2019: 113-117. (In Russian)

11. Kuznetsova V.N. The main aspects of the methodology for substantiating the operational characteristics of a tracked vehicle with an electromechanical transmission / V.N. Kuznetsova, R.V. Romanenko // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(5): 574-584.

12. Kondakov S.V. Investigation of the turn of an energy-efficient high-speed tracked vehicle with an intelligent electric transmission / S.V. Kondakov, O.O. Pavlovskaya // *Bulletin of mechanical engineering* № 11. - Chelyabinsk: YuGU, 2014: 51-55.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Кузнецова В.Н. Формулирование проблемы исследований. Формулировка направления и темы исследования. Руководство процессом разработки темы. Выбор методологии и методов исследования (50%).

Романенко Р.В. Обзор результатов предыдущих исследований. Постановка задач исследования. Обозначение алгоритма аналитических исследований. Формулировка результатов и выводов (50%).

AUTHORS' CONTRIBUTION

Victoria N. Kuznetsova, the research problem formulation, the area of the subject of research formulation, the theme development process guideline, the choice of research methodology and methods (50%).

Roman V. Romanenko, the review of the results of previous studies, research tasks statement, the algorithm for analytical studies formulation, the results and conclusions (50%) formulation.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецова Виктория Николаевна – д-р техн. наук, проф., Scopus Author ID 8671569200, проф. кафедры «Эксплуатация и сервис транспортно-технологических машин и комплексов в строительстве» ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).

Романенко Роман Владимирович – старший преподаватель 7-й кафедры (ремонта бронетанковой и автомобильной техники), Омский автобронетанковый инженерный институт, филиал Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева (ВА МТО) (644098, Омск, Военный 14-й городок, 119, roman82enko@mail.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Victoria N.Kuznetsova, Dr. of Sci., Professor, of the Operation and service of transport-technological machines and complexes in construction Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Scopus Author ID 8671569200(644080, Omsk, Mira ave., 5 e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).

Roman V.Romanenko, Senior lecturer of the 7th repair of armored and automobile equipment department, Omsk Automobile and Armored Engineering Institute, a branch of General of the Army A.V. Khrulev Military Academy of Logistics (VA MTO) (644098, Omsk, Military 14th town, 119, roman82enko@mail.ru).

УДК 625.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-30-41>

НИЖНИЙ ПРИВОД АГРЕГАТА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕГО СЛОЯ АВТОДОРОГИ

В.А Николаев

ФГБОУ ВО ЯГТУ,

г. Ярославль, Россия

Nikolaev53@inbox.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Агрегат непрерывного действия для формирования подстилающего слоя предназначен для увеличения производительности труда при строительстве автомобильных дорог и других объектов, для строительства которых необходимо снятие верхнего слоя грунта. В ковше агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог предусмотрено использование рабочих органов, осуществляющих резание грунта лезвиями ножей. Отрезанный грунт поступает в ковши. Рассмотрены силы, приложенные к ковшу. Теоретически обоснованные общие затраты энергии на резание грунта объёмом один кубический метр ковшами агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог 109 килоджоулей. На основании проведённых расчётов можно определить вращающий момент, мощность, необходимую для нижнего привода, передаточное отношение от гидромотора к звёздочкам, разработать конструкцию многих элементов агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог.

Методика исследования. Для определения вращающего момента, мощности, необходимой для нижнего привода, передаточного отношения от гидромотора к звёздочкам, к проекции ковша на горизонтальную плоскость приложены все силы, направленные по ходу ковша. В результате их сложения выявлено общее максимальное тяговое усилие перемещения всех ковшей в период их заполнения грунтом. На основании этого дана методика расчётов искомых параметров. Существует опасность высыпания грунта из ковша при его повороте на ведущих звёздочках нижнего привода. Для проверки полученных параметров рассмотрен поворот ковша на 90° на ведущих звёздочках нижнего привода. Выявлены силы, действующие на грунт, расположенный в ковше, в момент начала поворота ковша. Составлена система уравнений, на основе которой установлено условие недопустимости высыпания грунта из ковша при его повороте на ведущих звёздочках.

Результаты. В результате сложения сил, направленных по ходу ковша, определено общее максимальное тяговое усилие перемещения всех ковшей в период их заполнения грунтом, тяговое усилие на правую цепь и левую цепь. По разрушающей нагрузке выбраны тяговые цепи. Рассчитаны: вращающий момент нижнего привода, угловая скорость приводных звёздочек, мощность, необходимая для нижнего привода, передаточное отношение от гидромотора к звёздочкам. Исходя из передаваемой мощности выбран для нижнего привода агрегата героторный гидромотор. На основе расчётов разработана конструкция цепей, опорного катка, подвески цепей.

Заключение. На основании проведённых расчётов выявлены: максимальное тяговое усилие перемещения всех ковшей в период их заполнения грунтом 11870 ньютонов, вращающий момент нижнего привода 2362 ньютонметров, скорость цепей 1,686 метров в секунду, угловая скорость приводных звёздочек 8,47 радиан в секунду, мощность, необходимая для нижнего привода, 20 киловатт. Исходя из передаваемой мощности целесообразно использовать для нижнего привода агрегата героторный гидромотор МТ-160 и одноступенчатый планетарный редуктор с передаточным отношением от гидромотора к звёздочкам 7,674. Проведённые расчёты позволили разработать конструкцию многих элементов агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: агрегат непрерывного действия, грунт, проекции сил в горизонтальной плоскости, тяговое усилие, тяговые цепи, вращающий момент, нижний привод, приводные звёздочки.

Поступила 19.01.21, принята к публикации 26.02.21.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Николаев В.А. Нижний привод агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодороги / В.А. Николаев. – DOI <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-30-41> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18(77), № 1. – С. 30-41.

© Николаев В.А., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-30-41>

LOWER DRIVE OF CONTINUOUS ACTION UNIT TO FORM UNDERLAYING LAYER OF ROAD

Vladimir A. Nikolaiev

Yaroslavl Technical University,

Yaroslavl, Russia

nikolaev53@inbox.ru

ABSTRACT

Introduction. A continuous action unit for the formation of an underlying layer is designed to increase productivity in the construction of roads and other facilities, for which it is necessary to remove the top layer of soil. In the bucket of the continuous action unit to form an underlying layer of roads provides the use of working bodies, cutting the ground with blades of knives. The cut-off soil enters the buckets. The forces attached to the bucket are considered. Theoretically reasonable total energy costs for ground cutting of one cubic meter by buckets of continuous action unit to form an underlying layer of roads requires 109 kilojoules. Based on the calculations carried out, it is possible to determine the torque, the power required for the lower drive, the transmission ratio from the hydraulic motor to the stars, to develop the design of many elements of the continuous action unit to form the underlying layer of the road.

The method of research. To determine the torque, the power required for the lower drive, the transmission ratio from the hydraulic motor to the asterisks, to the projection of the bucket on the horizontal plane attached all forces are applied directed along the bucket. As a result of their addition, the total maximum traction force of moving all the boilers during their filling with soil was revealed. On the basis of this, the method of calculating the parameters of the required is given. There is a danger of the ground being poured out of the bucket when it is rotated on the leading stars of the lower drive. To check the parameters received, the bucket is rotated by 90 degrees on the leading stars of the lower drive. The forces acting on the ground, located in the bucket, at the moment of the beginning of the turn of the bucket were revealed. A system of equations has been created, on the basis of which the condition of inadmissibility of the dumping of soil from the bucket at its turn on the leading stars has been established.

Results. As a result of the addition of forces directed in the course of the bucket, the total maximum traction force of moving all the boilers during their filling with the ground, traction force on the right chain and left chain is defined. Traction chains are chosen by destructive load. The torque of the lower drive, the angular speed of the drive stars, the power required for the lower drive, the transmission ratio from the hydraulic motor to the asterisk are calculated. Based on the transferable power, a gerotor motor is chosen for the lower drive of the unit. On the basis of the calculations the design of chains, support rink, chain suspension have been developed.

Conclusion. Based on the calculations made, the maximum traction force of all the buckets during the period when they are filled with soil is 11,870 newtons, the torque of the lower drive is 2,362 newtonometers, the speed of the chains is 1,686 meters per second, the angular velocity of the drive stars is 8,47 radians per second, power required for lower drive is 20 kilowatts. Based on the transferable power, it is advisable to use MT-160 gerotor motor and a single-stage planetary gearbox with a transmission ratio from the hydraulic motor to the stars 7,674. The calculations made it possible to develop the design of many elements of the continuous action unit to form an underlying layer of roads.

KEYWORDS: Continuous action unit, soil, projection of forces in horizontal plane, traction force, traction chains, torque, lower drive, drive stars.

Submitted 19.01.21, revised 26.02.21.

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: Nikolaev V.A. Lower drive of continuous action unit to form underlying layer of road. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (1):30-41. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-30-41>

© Nikolaiev V.A., 2021



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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1) определены: вращающий момент, мощность, необходимая для нижнего привода, передаточное отношение от гидромотора к нижнему приводу;

2) разработаны конструкции: цепи, опорного катка, подвески цепей, конструктивные параметры которых получены на основе расчётов;

3) осуществлена проверка параметров ковша и ведущей звёздочки нижнего привода на недопустимость высыпания грунта из ковша при его повороте на ведущей звёздочке.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для формирования подстилающего слоя автомобильных дорог используют технические средства циклического действия. Их рабочие органы осуществляют преимущественно энергозатратное резание грунта, которое теоретически можно уподобить резанию пуансоном. Теоретические основы такого резания грунта весьма подробно рассмотрены [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]. Затраты энергии на резание грунта можно существенно уменьшить путём применения резания лезвиями.

Агрегат непрерывного действия для формирования подстилающего слоя [25] предназначен для увеличения производительности труда при строительстве автомобильных дорог и других объектов, для строительства которых необходимо снятие верхнего слоя грунта. В ковше агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог предусмотрено использование рабочих органов, осуществляющих резание грунта лезвиями ножей [26, 27]. Отрезанный грунт поступает в ковши. Рассмотрены силы, приложенные к ковшу [27]. Теоретически обоснованные общие затраты энергии на резание грунта объёмом один кубический метр ковшами агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог. На основании проведённых расчётов можно определить вращающий момент, мощность, необходимую для нижнего привода, передаточное отношение от гидромотора к нижнему приводу, разработать конструкцию многих элементов агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Определим мощность, необходимую для нижнего привода, передаточное отношение от

гидромотора к звёздочкам, используя расчётные данные [27]. Допустим, ковш №1 пустой. Со схемы сил в горизонтальной плоскости [27], приложенных к ковшу, перенесём на рисунок 1 все силы, направленные по ходу ковша и сложим их.

Допустим, заполнение ковшей грунтом происходит равномерно по ходу их перемещения. Шаг расчёта:

$$K = \frac{F_{кхmax} - F_{кхmin}}{n_{гр}}, \quad (1)$$

где $F_{кхmin}$ – суммарная минимальная горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения одного пустого ковша; $F_{кхmax}$ – суммарная максимальная горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения одного наполненного ковша; $n_{гр}$ – количество ковшей, наполняемых грунтом, с учётом ковшей на угловых роликах. Общее максимальное тяговое усилие $F_{кх}$ перемещения всех ковшей в период их заполнения грунтом равно сумме тяговых усилий. Из рисунка 1 определим тяговое усилие на правую цепь $P_{кхпр}$ и тяговое усилие на левую цепь $P_{кхлев}$.

Для расчёта цепей максимальное тяговое усилие перемещения всех ковшей в период их заполнения грунтом следует увеличить:

- на натяжение, необходимое для нормальной работы цепей, создаваемое натяжным устройством;

- усилие преодоления трения в цапфах холостых колёс и звёздочек от предварительного натяжения цепей;

- усилие преодоления сил инерции в момент начала движения цепей;

- усилие преодоления сил трения в шарнирах цепей;

- прочие усилия, например, на преодоление трения при перегибах на ведущей звёздочке и поворотном ролике.

Из опыта расчётов цепей [6] сумма перечисленных дополнительных усилий составляет приблизительно 35% от тягового усилия. Поэтому увеличим тяговое усилие на правую (по ходу), более нагруженную, цепь:

$$P_{\Sigma кхпр} = 1,35 P_{кхпр}. \quad (2)$$

Разрушающая нагрузка цепи

$$S_p = n_p P_{\Sigma кхпр}, \quad (3)$$

где n_p – коэффициент запаса прочности.

По разрушающей нагрузке выбираем стандартную тяговую цепь. Разработаем конструкции цепи, опорного катка, подвески цепей на основе расчётов [27].

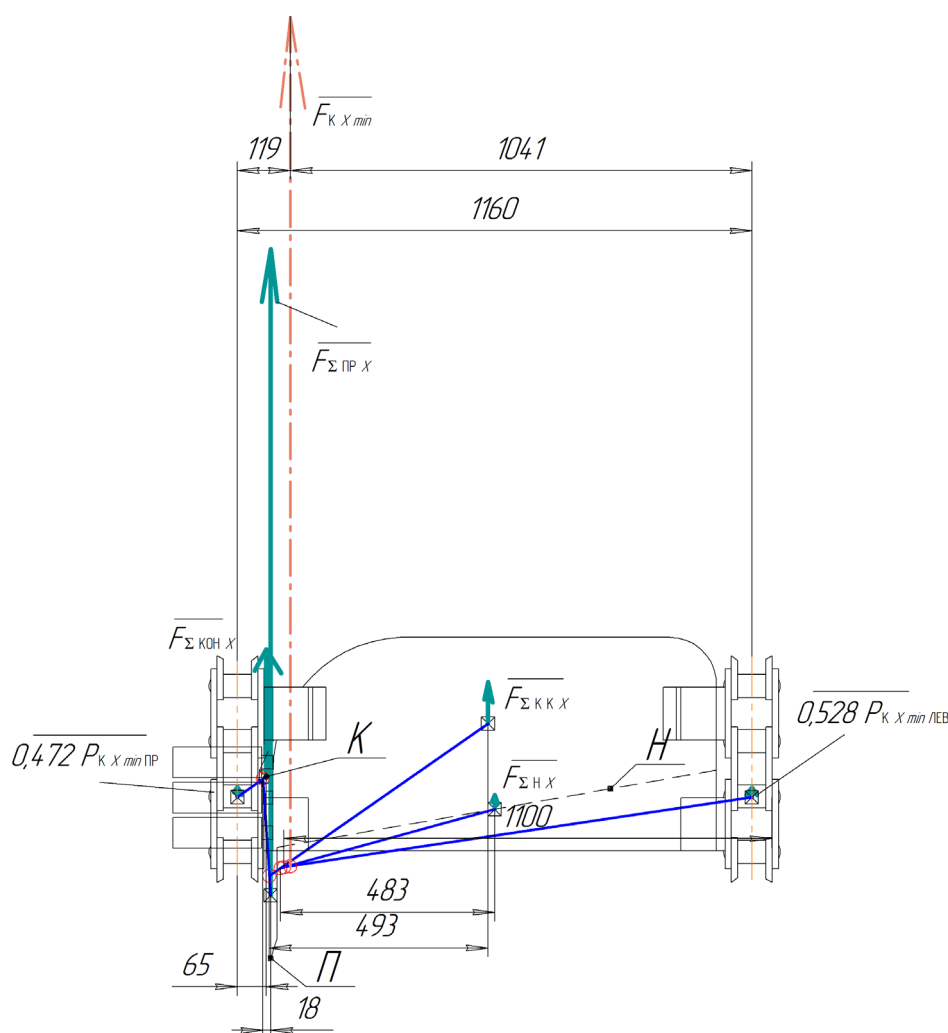


Рисунок 1 – Схема сил в горизонтальной плоскости, приложенных к ковшу и направленных по ходу ковша

Figure 1 – A diagram of forces in a horizontal plane, applied to the bucket and directed along to the bucket

Общее максимальное тяговое усилие перемещения всех ковшей в период их заполнения грунтом $F_{кх}$. Радиус начальной окружности приводной звёздочки r_n . Отсюда вращающий момент нижнего привода

$$M_{нп} = F_{кх} r_n. \quad (4)$$

Скорость цепей $v_{ц}$ [1]. Угловая скорость приводных звёздочек

$$\omega_{нп} = \frac{v_{ц}}{r_n}. \quad (5)$$

Мощность, необходимая для нижнего привода,

$$N_{нп} = M_{нп} \omega_{нп}. \quad (6)$$

Передаточное отношение от гидромотора к нижнему приводу

$$i_{нпгп} = \frac{\omega_{гмп}}{\omega_{нп}}, \quad (7)$$

где $\omega_{гмп}$ – угловая скорость гидромотора.

Существует опасность высыпания грунта из ковша при его повороте на ведущих звёздочках нижнего привода. Для проверки полученных параметров рассмотрим поворот ковша на 90° на ведущих звёздочках нижнего привода (рисунок 2).

В момент начала поворота ковша на грунт, расположенный в ковше, действует сила G тяжести, центробежная сила инерции $F_{цб}$ и сила инерции F_j , вызванная торможением грунта в начале поворота. При этом сила F_j стре-

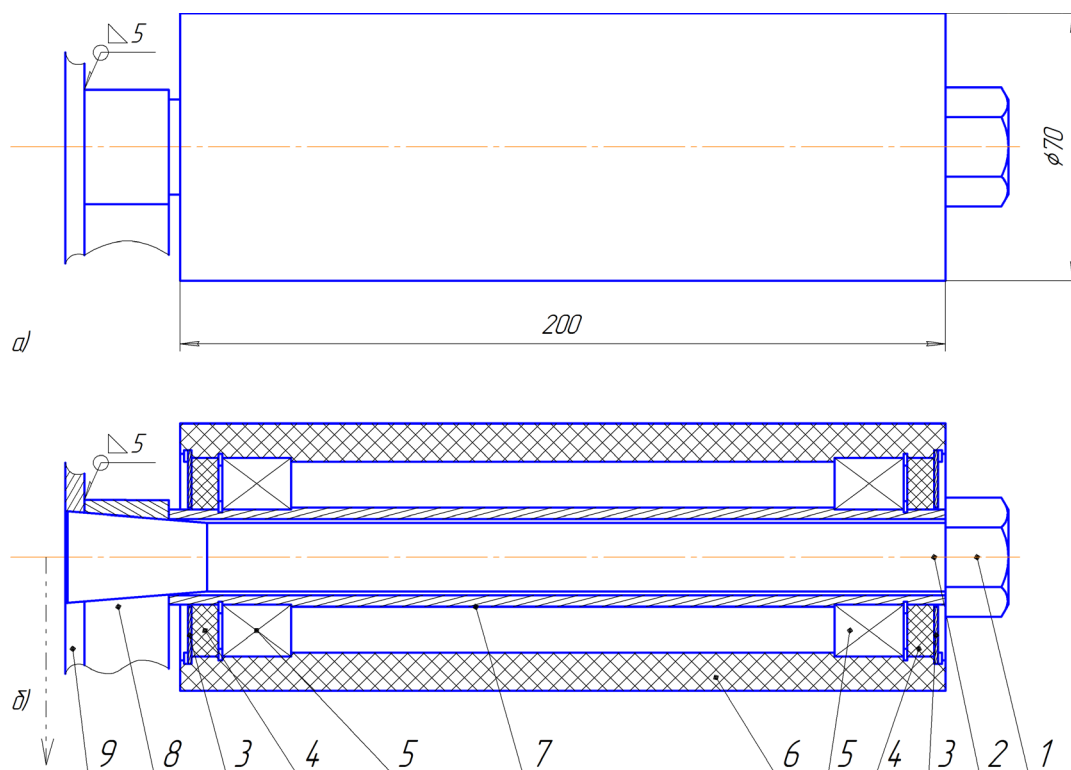


Рисунок 4 – Опорный каток: а – вид; б – сечение совместно с гусеницей: 1 – гайка; 2 – ось; 3 – защитная шайба; 4 – уплотнение; 5 – закрытый подшипник; 6 – обод; 7 – втулка; 8 – планка; 9 – корпус ковша

Figure 4 – Support rink: a) view; b) a section with a caterpillar; 1 – nut; 2 – axis; 3 – defensive puck; 4 – seal; 5 – closed bearing; 6 – rim; 7 – sleeve; 8 – bar; 9 – bucket casing

Ролики цепи выполнены с ребром для восприятия поперечных нагрузок. Цепи 2 содержат пластины 3 для фиксирования осей. Это позволяет быстро разъединить цепи в любом месте для устранения неисправности. Посредством передних угольников 1 корпус ковша 5 жёстко присоединён к звеньям цепей. Задние угольники 4 мягко присоединены к другим звеньям цепей. В них запрессованы пальцы 7. К корпусу ковша приварены кронштейны 8 с прорезями, в которых расположены амортизирующие компенсаторы 6. Амортизирующие компенсаторы позволяют смещаться звеньям цепей, присоединённых к корпусу ковша, относительно друг друга при изгибе цепей на поворотных роликах.

Применено цанговое крепление осей опорных катков (рисунок 4). К корпусу каждого ковша 9 приварены три планки 8 с прорезями, выполненными с уклоном. В каждую планку вставлена ось 2 с надетой на неё втулкой 7. На втулке с обеих сторон установлены подшипники 5, уплотнения 4 и защитные шайбы 3. На подшипники установлен обод 6. При затягивании гайки 1 обратный конус оси фиксирует её в планке. Для изменения глубины хода ковша в грунте ослабляют гайки и перемещают ось каждого опорного катка по планке, затем затягивают гайки. Для снятия опорного катка следует отвернуть гайку и вынуть ось внутрь ковша. Остальные элементы опорного катка при эксплуатации не разбирают. При неисправности опорный каток заменяют.

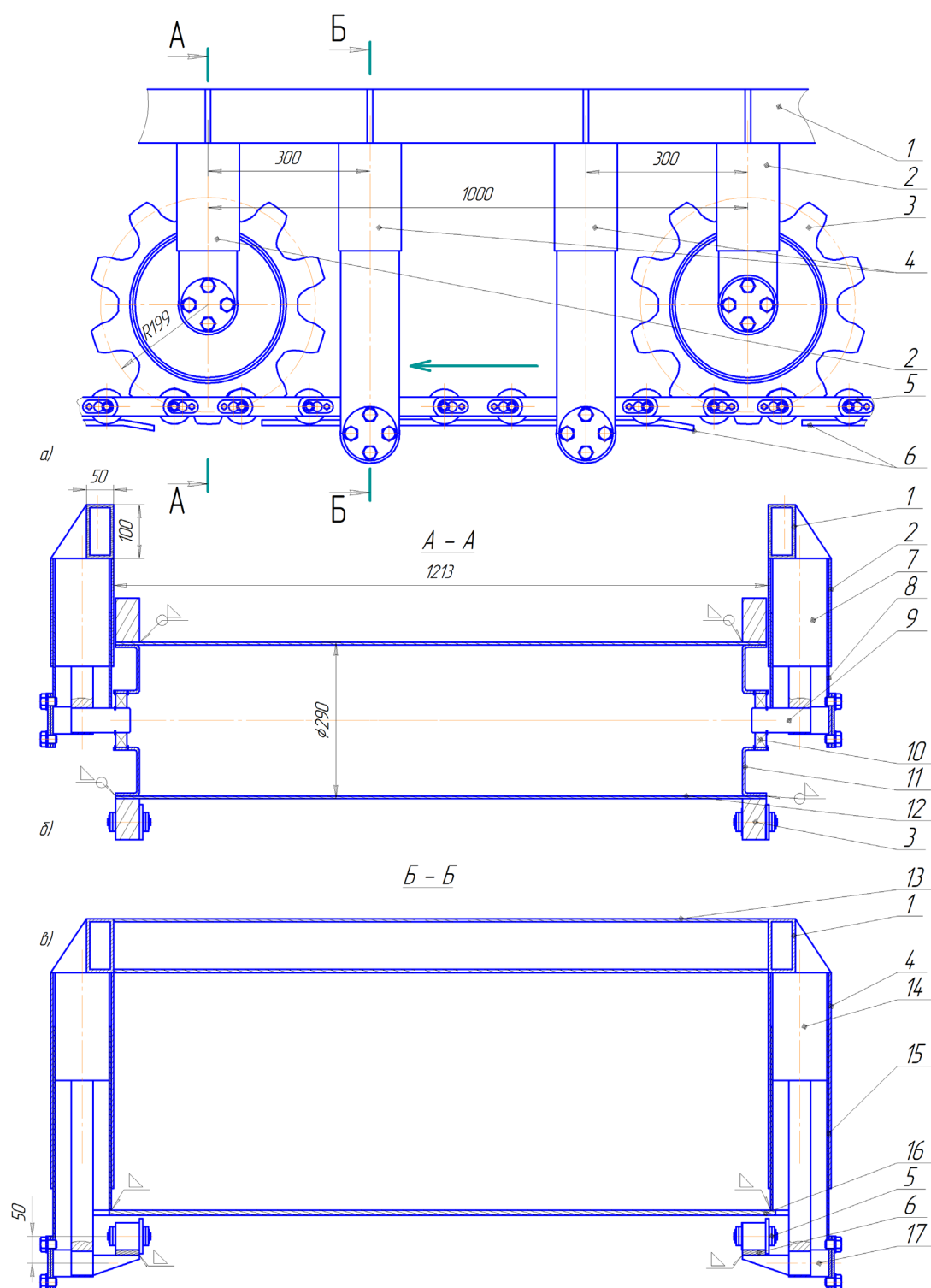


Рисунок 5 – Подвеска цепей: а – вид сбоку (сзади по ходу агрегата); б – сечение А – А; в – сечение Б – Б; 1 – лонжерон (средней или правой рамы); 2, 4 – внешняя направляющая; 3 – ролик; 5 – цепь; 6 – поддерживающая планка; 7 – гидроцилиндр роликов; 8, 15 – внутренняя направляющая; 9, 17 – цапфа; 10 – подшипник; 11 – диск; 12 – трубчатая ось; 13 – траверса; 14 – гидроцилиндр поддержки; 16 – связь

Figure 5 – Chain suspension: a) side view (back in the course of the unit); b) Section A – A; c) Section B – B; 1 – sparger (middle or right frame); 2, 4 – external guide; 3 – roller; 5 – chain; 6 – supporting bar; 7 – hydrocylinder rollers; 8, 15 – internal guide; 9, 17 – herp; 10 – bearing; 11 – disk; 12 – tubular axis; 13 – traverse; 14 – support hydrocylinder; 16 – connection

Уточним радиус начальной окружности ведущих звёздочек нижнего привода. Так как шаг цепи $t = 125\text{мм}$, примем на них по 10 зубьев. Тогда радиус начальной окружности ведущей звёздочки нижнего привода $r_n = 199\text{мм}$. Для копирования неровностей рельефа опорными катками на цепи сверху воздействуют звездообразные ролики 3 (рисунок 5), которые имеют сходные параметры с ведущими звёздочками нижнего привода.

Средняя и правая рама сварена из лонжеронов 1 и траверс 13. К лонжеронам приварены внешние направляющие 2, 4, гидроцилиндры роликов 7. Гидроцилиндры роликов сообщаются с гидропневмоаккумулятором управления роликами. В штоки гидроцилиндров роликов запрессованы цапфы 9, к которым присоединены внутренние направляющие 8. На цапфах 9 установлены подшипники 10, а на них – диски 11 с приваренной к ним трубчатой осью 12 со звездообразными роликами. К лонжеронам также приварены гидроцилиндры поддержки 14, сообщаются с гидропневмоаккумулятором управления поддерживающими планками. В штоки гидроцилиндров поддержки запрессованы цапфы 17, к которым присоединены внутренние направляющие 15, связанные связями 16. К цапфам 17 приварены поддерживающие планки 6. Цепь 5 перемещается между роликами и поддерживающими планками. В зависимости от свойств грунта автоматика, изменяя давление в гидропневмоаккумуляторах, регулирует ход ковшей так, чтобы они не выглублялись из грунта и не создавали избыточное сопротивление перемещению.

Общее максимальное тяговое усилие перемещения всех ковшей в период их заполнения грунтом $F_{\text{кх}} \approx 11870\text{Н}$. Радиус начальной окружности приводной звёздочки $r_n = 0,199\text{м}$. Вращающий момент нижнего привода (4): $M_{\text{нп}} = 11870 \cdot 0,199 = 2362\text{Нм}$.

Скорость цепей $v_{\text{ц}} = 1,686\text{ м/с}$ [1]. Угловая скорость приводной звёздочки (5):

$$\omega_{\text{нп}} = \frac{1,686}{0,199} \approx 8,47\text{ рад/с}.$$

Мощность, необходимая для нижнего привода (6),

$$N_{\text{нп}} = 2362 \cdot 8,47 = 20012\text{Вт} \approx 20\text{кВт}.$$

Примем нижний привод агрегата от гидромотора. Кроме создания вращающего момента, гидромотор смягчает воздействие перегрузок на элементы привода. Исходя из передаваемой мощности выберем героторный

гидромотор МТ-160, угловая скорость ротора $\omega_{\text{гмп}} = 65\text{ рад/с}$, мощность – 26,5 кВт.

Передаточное отношение от гидромотора к нижнему приводу (7):

$$i_{\text{нпмп}} = \frac{65}{8,47} \approx 7,674.$$

Необходима установка одноступенчатого планетарного редуктора. Нижний привод цепей предназначен для создания тягового усилия с целью резания грунта и заполнения им ковшей. Для предохранения цепей от внезапных перегрузок, например, при встрече ковша с камнем или корнем дерева, необходима установка в нижнем приводе предохранительной муфты. На предохранительной муфте установлен датчик, а в приводе ходовой части энергетической установки – бортовые фрикционы. При срабатывании предохранительной муфты агрегат немедленно останавливается.

Для проверки полученных параметров рассмотрим поворот ковша на 90° на ведущей звёздочке нижнего привода (см. рисунок 2). Подставим в неравенство (8) значения параметров: расстояние $l_{\text{п}} = 427\text{мм}$, угол $\varphi_{\text{п}} = 60,67^\circ \approx 1,0586\text{рад}$, $r_3 = 200\text{мм}$. Получим $427 > 1,0586 \cdot 200$. Условие выполняется. При таких параметрах ковша и ведущей звёздочки нижнего привода грунт не высыплется из ковша при его повороте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведённых расчётов выявлены: максимальное тяговое усилие перемещения всех ковшей в период их заполнения грунтом $F_{\text{кх}} \approx 11870\text{Н}$, вращающий момент нижнего привода $M_{\text{нп}} = 2362\text{Нм}$, скорость цепей $v_{\text{ц}} = 1,686\text{ м/с}$, угловая скорость приводных звёздочек $\omega_{\text{нп}} = 8,47\text{ рад/с}$, мощность, необходимая для нижнего привода, $N_{\text{нп}} \approx 20\text{кВт}$. Исходя из передаваемой мощности целесообразно использовать для нижнего привода агрегата героторный гидромотор МТ-160 и одноступенчатый планетарный редуктор с передаточным отношением от гидромотора к звёздочкам $i_{\text{нпмп}} = 7,674$. Проведённые расчёты позволили разработать конструкцию многих элементов агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жук А.Ф. Теоретическое обоснование рациональной технологической схемы и параметров ротационного плуга. Сборник научных трудов «Теория

и расчёт почвообрабатывающих машин». Т 120. Москва: Машиностроение, 1989. С. 145–153.

2. Попов Г.Ф. Рабочие органы фрез. Москва: Материалы НТС ВИСХОМ. Вып. 27. ОНТИ ВИСХОМ, 1970 С. 490–497.

3. Карасёв Г.Н. Определение силы резания грунта с учётом упругих деформаций при разрушении // Строительные и дорожные машины, 2008. №4. С. 36–42.

4. Карнаухов А.И., Орловский С.Н. Определение затрат удельной энергии на процесс резания лесных почв торцевыми фрезами // Строительные и дорожные машины, 2010. №1. С. 20–22.

5. Кравец И.М. Определение критической глубины резания при комбинированном резании грунтов гидрофрезой // Строительные и дорожные машины, 2010. №5. С. 47–49.

6. Кириллов Ф.Ф. Детерминированная математическая модель временного распределения тягового усилия для многолезцовых рабочих органов землеройных машин // Строительные и дорожные машины, 2010. №11. С. 44–48.

7. Берестов Е.И. Влияние трения грунта по поверхности ножа на сопротивление резанию // Строительные и дорожные машины, 2010. №11. С. 34–38.

8. Вершинин А.В., Зубов В.С., Тюльнев А.М. Повышение эффективности дискофрезерных рабочих механизмов для разработки мёрзлых грунтов // Строительные и дорожные машины, 2012. №8. С. 42–44.

9. Баловнев В.И., Нгуен З.Ш. Определение сопротивлений при разработке грунтов рыхлителем по интегральному показателю прочности // Строительные и дорожные машины, 2005. №3. С. 38–40.

10. Ryabets N., Kurzner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy. // Cold Regions Science and Technology. 2003. Vol. 36. P. 115–128.

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

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

13. Sun X. ACT-timely experimental study on meso-scopic damage development of frozen soil under triaxial shearing. // Rock and Soil Mechanics. 2005. №8. P. 150–163.

14. Li Q. Development of Frozen Soil Model. // Advances in Earth Science. 2006. №12. P. 96–103.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

24. Драняев С.Б., Чаткин М.Н., Корявин С.М. Моделирование работы винтового Г-образного ножа почвообрабатывающей фрезы // Тракторы и сельхозмашины, 2017. №7. С. 13–19.

25. Николаев В.А. Определение скорости цепей и размеров пласта грунта, отрезаемого ковшом агрегата для удаления верхнего слоя грунта с подстилающего слоя автодороги // Вестник СибАДИ, 2020. №1. С. 32–43.

26. Николаев В.А. Анализ взаимодействия кромки лезвия консольного ножа с грунтом // Вестник СибАДИ, 2020. №2. С. 172–181.

27. Николаев В.А. Затраты энергии на резание грунта ковшами агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодороги // Вестник СибАДИ, 2020. №6. С. 676–688.

REFERENCES

1. Zhuk A.F. Teoreticheskoe obosnovanie racional'noj tekhnologicheskoy skhemy i parametrov rotacionnogo pluga [Theoretical justification of the rational technological scheme and parameters of the rotary plow]. *Sbornik nauchnykh trudov «Teoriya i raschyot pochvoobrabatyvayushchih mashin»*. Т 120. Moscow, *Mashinostroenie*, 1989: 145–153. (in Russian)

2. Popov G.F. Rabochie organy frez [Working bodies of milling cutters]. Moscow, *Materials VISHOM NTS. ISS. 27. ONTI VISHOM*, 1970: 490–497. (in Russian)

3. Karasyev G.N. Opredelenie sily rezaniya grunta s uchyotom uprugih deformatsij pri razrushenii [Determination of the cutting force of the soil, taking into account elastic deformations during destruction]. *Construction and road machinery*, 2008; 4: 36–42. (in Russian)

4. Karnaukhov A.I., Orlovskiy S.N. Opredelenie zatrat udel'noj energii na process rezaniya lesnykh pochv torcevyimi frezami [Determination of the specific energy costs for the process of cutting forest soils with end mills]. *Construction and road machinery*, 2010; 1: 20-22. (In Russian)
5. Kravets I.M. Opredelenie kriticheskoy glubiny rezaniya pri kombinirovannom rezanii gruntov gidrofrezoy [Definition of critical depth of cut for the combined cutting the soil hidromasaj]. *Construction and road machinery*, 2010. 5: 47-49. (In Russian)
6. Kirillov F.F. Determinirovannaya matematicheskaya model' vremennogo raspredeleniya tyagovogo usiliya dlya mnogorezцовых рабочих органов землеройных машин [Deterministic mathematical model of the time distribution of traction force for multi-cutter working bodies of earthmoving machines]. *Construction and road machinery*, 2010; 11: 44-48. (In Russian)
7. Berestov E.I. Vliyaniye treniya grunta po poverhnosti nozha na soprotivleniye rezaniyu [Effect of soil friction on the knife surface on the cutting resistance]. *Construction and road machinery*, 2010. No 11: 34-38. (In Russian)
8. Vershinin A.V., Subov V.S., Tyulnev A.M. Povysheniye effektivnosti diskofrezernykh rabochih mekhanizmov dlya razrabotki myorzlykh gruntov [Improving the efficiency of disc-milling working mechanisms for the development of frozen soils]. *Construction and road machinery*, 2012; 8: 42-44. (In Russian)
9. Balovnev V.I., Nguen Z.SH. Opredeleniye soprotivleniy pri razrabotke gruntov ryhlitelem po integral'nomu pokazatelyu prochnosti [Determination of resistances in the development of soils with a ripper according to the integral strength index]. *Construction and road machines*, 2005. 3: 38-40. (In Russian)
10. Ryabets N., Kurzner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy. *Cold Regions Science and Technology*. 2003; 36: 115-128.
11. Liu X., Liu P. Experimental research on the compressive fracture toughness of wing fracture of frozen soil. *Cold Regions Science and Technology*. 2011; 65: 421-428.
12. Talalay P.G. Subglacial till and Bedrock drilling. *Cold Regions Science and Technology*. 2013. 86: 142-166.
13. Sun X. ACT-timely experimental study on meso-scopic damage development of frozen soil under triaxial shearing. *Rock and Soil Mechanics*. 2005; 8: 150-163.
14. Li Q. Development of Frozen Soil Model. *Advances in Earth Science*. 2006; 12: 96-103.
15. Atkinson J. The Mechanics of Soils and Foundations. *CRC Press*. 2007: 448 p.
16. Balovnev V.I., Danilov R.G., Ulitich O.YU. Issledovanie upravlyaemykh nozhevyykh sistem zemlerojno-transportnykh mashin [Research of controlled knife systems of earthmoving and transport machines]. *Construction and road vehicles*. 2017; 2: 12-15. (In Russian)
17. Nilov V.A., Fyodorov E.V. Razrabotka grunta skreperom v usloviyakh svobodnogo rezaniya [Ground scraper development in free cutting conditions]. *Construction and road machines*, 2016; 2: 7-10. (In Russian)
18. CHmil' V.P. Nasosno-akkumulyativnyy privod ryhlitelya s avtomaticheskim vyborom ugla rezaniya [Pump-accumulator drive of the ripper with automatic selection of the cutting angle]. *Construction and road machines*, 2016; 11: 18-20. (In Russian)
19. Kabashev R.A., Turgumbaev S.D. Eksperimental'nye issledovaniya processa kopaniya gruntov rotorno-diskovymi rabochimi organami pod gidrostaticheskim davleniem [Experimental studies of the process of digging soil by rotary-disk working bodies under hydrostatic pressure]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2016; 4: 23-28. (In Russian)
20. Syomkin D.S. O vliyaniy skorosti raboche-go organa na silu soprotivleniya rezaniyu grunta [On the influence of the speed of the working body on the strength of the resistance to cutting the soil]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2017; 1: 37-43. (In Russian)
21. Konstantinov YU.V. Metodika raschyota soprotivleniya i momenta soprotivleniya rezaniyu pochvy pryamym plastinchatym nozhom frezy [Method of calculating the resistance and moment of resistance to cutting the soil with a straight plate cutter knife]. *Tractors and agricultural machines*, 2019; 5: 31-39. (In Russian)
22. Syromyatnikov YU.N., Hramov I.S., Vojnash S.A. Gibkij element v sostave rabochih organov rotor-noj pochvoobrabatyvayushchej ryhlitel'no-separiruyushchej mashiny [Flexible element in the composition of the working bodies of the rotary tillage loosening and separating machine]. *Tractors and agricultural machines*, 2018; 5: 32-39. (In Russian)
23. Parhomenko G.G., Parhomenko S.G. Silovoy analiz mekhanizmov peremeshcheniya rabochih organov pochvoobrabatyvayushchih mashin po zadanoj traektorii [Power analysis of the mechanisms of movement of working bodies of tillage machines along a given trajectory]. *Tractors and agricultural machines*, 2018; 1: 47-54. (In Russian)
24. Dranyaev S.B., CHatkin M.N., Koryavin S.M. Modelirovaniye raboty vintovogo G-obraznogo nozha pochvoobrabatyvayushchej frezy [Simulation of the operation of a screw L-shaped knife of a tillage cutter]. *Tractors and agricultural machines*, 2017; 7: 13-19. (In Russian)
25. Nikolayev V.A. Opredeleniye skorosti cepej i razmerov plasta grunta, otrezaemogo kovshom agregata dlya udaleniya verhnego sloya grunta s podstila-yushchego sloya avtodorogi [Determination of the speed of the chains and the size of the soil layer cut by the bucket of the unit to remove the top layer of soil from the underlying layer of the highway]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2020; 1: 32-43. (In Russian)

26. Nikolayev V.A. Analiz vzaimodejstviya kromki lezviya konsol'nogo nozha s gruntom [Analysis of the interaction of the edge of the cantilever knife blade with the ground]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2020; 2: 172-181. (In Russian)

27. Nikolaev V.A. Zatraty jenergii na rezanie grunta kovshami agregata nepreryvnogo dejstvija dlja formirovaniya podstilajushhego sloja avtodorogi [Energy Expenditure on ground cutting by buckets of the unit of continuous action to form the underlying layer of the road]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2020; 6: 676-688. (In Russian)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Николаев Владимир Анатольевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные и дорожные машины» ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет» (г. Ярославль, Московский пр., 88, тел. 8 910 961 51 87), e-mail: nikolaev53@inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir A. Nikolaev, Dr. of Sci., Professor of the Construction and Road Machines Department, Yaroslavl Technical University. Yaroslavl, Moscow Avenue, 88. Phone: 8 910 961 51 87, e-mail: nikolaev53@inbox.ru.

УДК 622.692.4

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-42-50>

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕЗЦА ФРЕЗЕРНОГО РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРА С ГРУНТОМ

И.С. Кузнецов

ФГБОУ ВО «СибАДИ»,

г. Омск, Россия

mrprogamer111@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Трубопроводный транспорт РФ составляет значительную долю в экономике нашей страны, однако срок эксплуатации многих трубопроводов на сегодняшний момент составляет несколько десятков лет. В связи с этим возрастает количество аварийных ситуаций, причем степень их воздействия на инфраструктуру и окружающую среду год от года возрастает. Важным является решение проблемы своевременности ремонта трубопроводной системы при помощи современных и эффективных методов. Использование средств механизации позволяет существенно сократить сроки проведения ремонтных работ и их себестоимость.

Материалы и методы. В результате проведенных исследований разработана математическая модель взаимодействия резца фрезерного рабочего оборудования гидравлического экскаватора с разрабатываемым грунтом. В ней учитываются физико-механические свойства грунта и скорость внедрения резца в точку контакта с грунтом.

Результаты. Получена зависимость, позволяющая определить силу внедрения резца фрезерного рабочего оборудования в грунт.

Обсуждение и заключение. Результаты проведенных теоретических исследований рекомендуется использовать для расчета конструктивных и режимных параметров при проектировании и создании фрезерного рабочего оборудования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экскаватор гидравлический, оборудование рабочее, фреза роторная, математическая модель, трубопровод, ремонт, грунт.

БЛАГОДАРНОСТИ. Автор благодарит за поддержку научных исследований коллектив кафедры «ТНКИ» ФГБОУ ВО «СибАДИ», а также рецензентов статьи.

Поступила 05.01.21, принята к публикации 26.02.21.

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

© Кузнецов И.С., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-42-50>

THEORETICAL STUDY OF INTERACTION PROCESS OF CUTTER FOR MILLING WORKING EQUIPMENT OF EXCAVATOR WITH SOIL

Ilya S. Kuznetsov

Siberian State Automobile and Highway University,
Russia, Omsk
mrprogamer111@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. The pipeline transport of the Russian Federation makes up a significant share in the economy of our country. However, the service life of many pipelines at the moment is several decades. In this regard, the number of emergency situations is increasing. Moreover, the degree of their impact on infrastructure and the environment is increasing from year to year. It is important to solve the problem of timely repair of the pipeline system using modern and effective methods. The use of mechanization means can significantly reduce the time of repair work and their cost.

Materials and methods. As a result of the research, a mathematical model of the interaction of the cutter of the milling working equipment of a hydraulic excavator with the excavated soil has been developed. It takes into account the physical and mechanical properties of the soil and the speed of penetration of the cutter at the point of contact with the soil.

Results. The dependence is obtained, which allows determining the force of penetration of the cutter of the milling working equipment into the soil.

Discussion and conclusions. It is recommended to use the results of the performed theoretical studies for calculating the design and operating parameters in the design and creation of milling working equipment.

KEYWORDS: hydraulic excavator, working equipment, rotary milling cutter, mathematical model, pipeline, repair, undermining, soil.

Submitted 05.01.21, revised 26.02.21.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

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

© Kuznetsov I.S., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Трубопроводный транспорт Российской Федерации насчитывает сотни тысяч километров [1, 2, 3, 4, 5]. «Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 г.»¹ предусматривает необходимость обеспечения даже самых труднодоступных районов нашей страны углеводородным сырьем и другими полезными ресурсами, поэтому актуальной является задача поддержания и восстановления исправного и работоспособного состояния всей трубопроводной системы. Данная научная задача требует решения не только в нашей стране, но и в других странах [6, 7, 8, 9, 10].

Техническое обслуживание и ремонт трубопроводов требует больших капитальных вложений и трудовых затрат [11, 12, 13, 14, 15, 16]. Необходимо стремиться к высокой степени механизации технологических и совершен-

ствованию рабочего оборудования существующих машин, используемых для сервисных работ при эксплуатации трубопроводов [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23].

Согласно нормативным документам для проведения земляных работ, осуществляемых во время ремонта трубопровода, необходимо использовать гидравлический молот, устанавливаемый на гидравлический экскаватор. Кроме того, гидромолот предлагается использовать для рыхления грунта под трубопроводом. Эта операция нужна для освобождения трубопровода от грунта для проведения полотноц трубукладчика под трубопроводом. Схема производства работ гидравлическим молотом представлена на рисунке 1. Разработку оставшегося грунта на расстоянии 0,2 м от стенки трубопровода следует выполнять вручную с помощью шанцевого инструмента (лом, кирка), не допуская ударов по трубопроводу²².

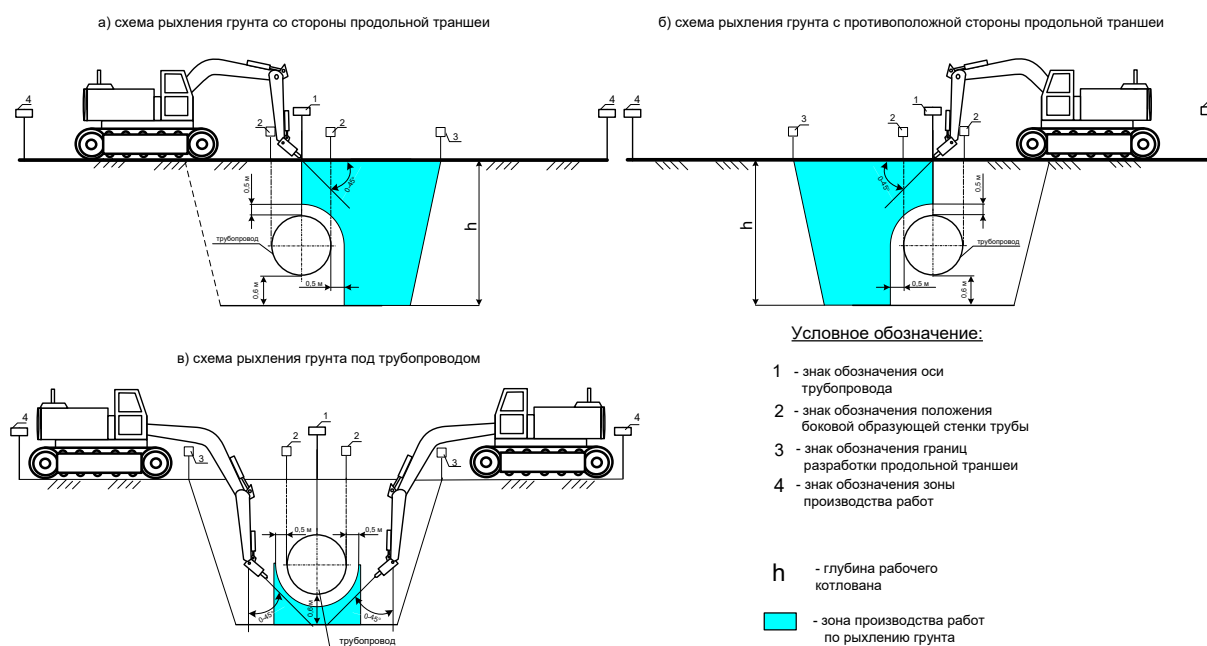


Рисунок 1 – Схема производства земляных работ гидравлическим молотом

Figure 1 – Diagram of earthworks with a hydraulic hammer

¹ Стратегия пространственного развития Российской Федерации до 2025 г. [Электронный ресурс]: утверждена распоряжением Правительства РФ от 13.02.2019 г. № 207-р. Доступ из справочной правовой системы «Консультант плюс» (дата обращения: 05.01.2021).

² РД 23.040.00 «Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов» – М.: ОАО «АК «Транснефть», 2014. – 516 с.

Для выполнения этих операций предлагается использование перспективного фрезерного рабочего оборудования, устанавливаемого на гидравлический экскаватор [24]. Фрезерная головка рабочего оборудования снабжена резцами для разрушения грунта. Установленный на рабочем оборудовании шнек обеспечивает удаление разрыхленного грунта из зоны рыхления. Использование такого оборудования позволяет значительно повысить эффективность земляных работ за счет полной механизации и повышения безопасности их производства.

Рассмотрим процесс взаимодействия резцов фрезерного рабочего оборудования с разрабатываемым грунтом.

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Резец рассматривается в виде трех конических и одной цилиндрической части (рисунок 2).

Заглубление резцов в грунт представляет собой периодически повторяющийся процесс с периодом угла поворота рабочего оборудования

$$\varphi_0 = \frac{2\pi}{n}, \quad (1)$$

где n – количество резцов в одном ряду.

В конце каждого периода каждый резец врежется в грунт на глубину h (рисунок 3), и



Рисунок 2 – Общий вид резца фрезерного рабочего оборудования экскаватора

Figure 2 – A general view of the milling cutter working equipment of excavator

в течение следующего периода заглубления с массива грунта срезается слой грунта с постоянной толщиной h . В дальнейшем, при установившемся режиме, все резцы будут снимать грунт постоянной толщиной стружки h и формой стружки, показанной на рисунке 3.

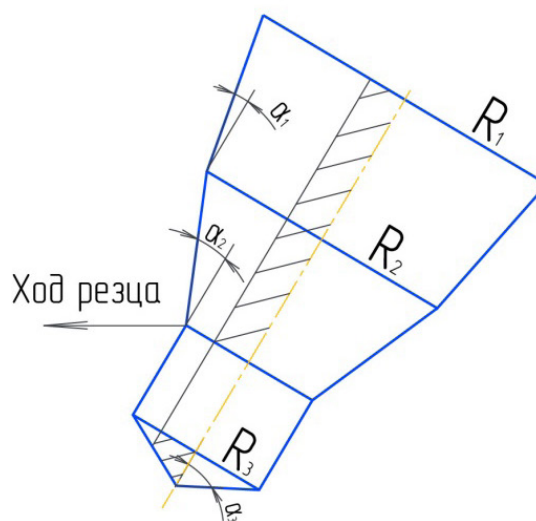
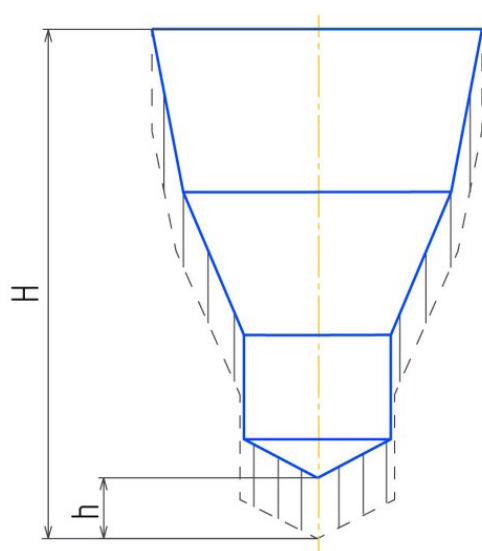


Рисунок 3 – Взаимодействие резца с срезаемой стружкой грунта

Figure 3 – Interaction of the cutter with the soil chips

Рассмотрим процесс внедрения в грунт одного из конусов. Естественно предположить, что величина наименьшего сопротивления внедрению будет тогда, когда направление заглабления резца совпадает с осевой линией усеченного конуса, и грунт, контактирующий с усеченным конусом, движется вдоль его образующих.

Поскольку сила внедрения резца в грунт не зависит от направления заглабления, для наглядности рассмотрим внедрение в вертикальном направлении (рисунок 4).

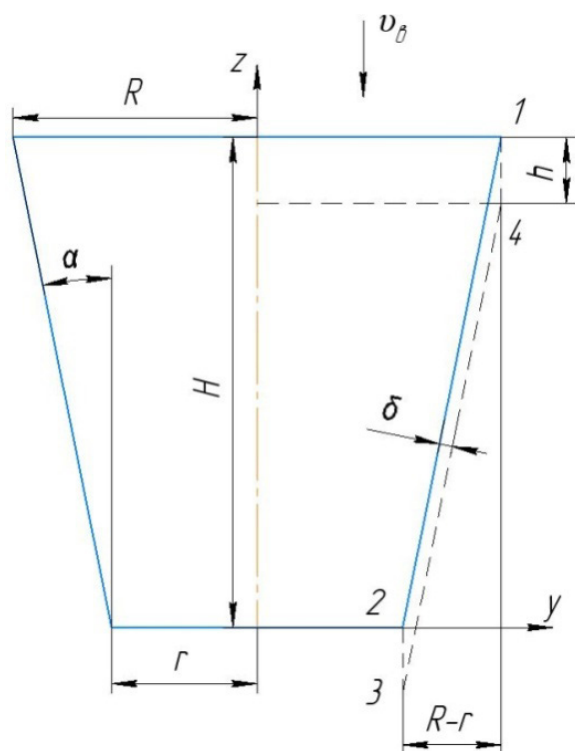


Рисунок 4 – Расчетная схема для определения силы внедрения резца в разрабатываемый грунт:
 R – больший радиус конической части резца,
 r – меньший радиус конической части резца,
 H – высота конической части резца,
 h – толщина стружки,
 δ – ход резца, α – угол резания, v_d – скорость резания

Figure 4 – Design scheme for determining the force of penetration of the cutter into the developed soil
 R – larger radius of the conical part of the cutter,
 r – smaller radius of the conical part of the cutter, H – height of the conical part of the cutter, h – chip thickness,
 δ – cutter stroke, α – cutting angle, v_d – cutting speed

Силу внедрения определим из зависимости [25]:

$$W_b = \iint_S U \cdot P \cdot f(Z) \cdot \sqrt{1 + f'^2(Z)} dS, \quad (2)$$

где P – давление грунта на боковую поверхность усеченного конуса; S – площадь части поверхности усеченного конуса, отсекаемая боковой стенкой траншеи до прохода резца (площадь области интегрирования 1234) (см. рисунок 4);

$$y = f(Z) = r + Z \tan \alpha, \quad (3)$$

$$U = \sin(\arctg(f'(Z))) + \mu_0 \cos(\arctg f'(Z)). \quad (4)$$

Из зависимости (3) дифференцированием получаем

$$f'(Z) = \tan \alpha. \quad (5)$$

С учетом последнего равенства получим

$$U = \sin(\arctg(\tan \alpha)) + \mu_0 \cos(\arctg(\tan \alpha)) = \sin \alpha + \mu_0 \cos \alpha. \quad (6)$$

$$\sqrt{1 + f'^2(Z)} = \sqrt{1 + \tan^2 \alpha} = \frac{1}{\cos \alpha}. \quad (7)$$

Из [25] следует

$$P = \frac{\gamma_0}{1 - b_1} \cdot \dot{L}^2, \quad (8)$$

где γ_0 – плотность грунта; b_1 – сжимаемость грунта; $\dot{L}$ – скорость внедрения резца в точке контакта с грунтом.

$$\dot{L} = f'(H) \cdot \dot{H} = \tan \alpha \cdot v_d, \quad (9)$$

где v_d – скорость внедрения резца в грунт.

С учетом зависимости (9) выражение (8) принимает вид

$$P = \frac{\gamma_0}{1 - b_1} \cdot v_d^2 \tan^2 \alpha. \quad (10)$$

Из анализа зависимостей (5), (7) и (9) видно, что величина $U \cdot P \cdot \sqrt{1 + \tan^2 \alpha}$ является величиной постоянной и может быть выведена за знак интеграла. Таким образом, интеграл (2) принимает вид

$$W_b = U \cdot P \cdot \sqrt{1 + f'^2(Z)} \iint_S dS \quad (11)$$

$$dS = U \cdot P \cdot \sqrt{1 + f'^2(Z)} \cdot S.$$

Из рисунка 4 видно, что

$$\frac{S}{2} = \iint_D \frac{dydz}{\cos(\vec{n}^{OX})}, \quad (12)$$

где D – область интегрирования 1234 (см. рисунок 4); $\cos(\vec{n}^{OX})$ – косинус угла между нормалью $\vec{n}$ в произвольной точке поверхности усеченного конуса и осью OX декартовой системы координат.

$$z_1 = (y - r)tg\alpha, z_2 = (y - r)ctg\alpha, \quad (13)$$

$$y_1 = r, y_2 = R. \quad (14)$$

Координаты точки поверхности усеченного конуса удовлетворяют уравнению

$$\sqrt{x^2 + y^2} = r + ztg\alpha \quad (15)$$

или

$$\Phi = x^2 + y^2 - (r + ztg\alpha)^2 = 0. \quad (16)$$

Берем частные производные по переменным x, y, z :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = 2x, \quad (17)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} = 2y, \quad (18)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = -2(r + ztg\alpha) \cdot tg\alpha, \quad (19)$$

$$\cos(\vec{n}^{OX}) = \frac{\partial \Phi / \partial x}{M}, \quad (20)$$

где M – абсолютная величина вектора нормали, проекции которой обозначены в зависимостях (17) – (19).

$$M = \sqrt{\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z}\right)^2} = 2(r + ztg\alpha)\sqrt{1 + tg^2\alpha} = \frac{2(r + ztg\alpha)}{\cos\alpha}. \quad (21)$$

С учетом выражений (17) и (21) из зависимости (20) находим

$$\cos(\vec{n}^{OX}) = \frac{2x \cdot \cos\alpha}{2(r + ztg\alpha)} = \frac{x \cdot \cos\alpha}{(r + ztg\alpha)}. \quad (22)$$

Из выражения (16) следует зависимость

$$x = \sqrt{(r + ztg\alpha)^2 - y^2}, \quad (23)$$

с учетом которого зависимость (22) принимает вид

$$\cos(\vec{n}^{OX}) = \frac{\sqrt{(r + ztg\alpha)^2 - y^2}}{r + ztg\alpha} \cos\alpha. \quad (24)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Учитывая зависимости (13), (14), (24), вычислим интеграл (12):

$$\begin{aligned} \frac{S}{2} &= \int_{y_1}^{y_2} \int_{z_1}^{z_2} \frac{(r + ztg\alpha)dydz}{\sqrt{(r + ztg\alpha)^2 - y^2}} = \\ &= \int_{y_1}^{y_2} dy \int_{z_1}^{z_2} \frac{d[(r + ztg\alpha)^2 - y^2]}{\sqrt{(r + ztg\alpha)^2 - y^2} \cdot 2tg\alpha} dz = \\ &= \frac{1}{2tg\alpha} \int_{y_1}^{y_2} \sqrt{(r + ztg\alpha)^2 - y^2} \Big|_{z_1}^{z_2} dy = \\ &= \frac{h^{1.5} \cdot tg^{1.5}\alpha \cdot 2^{1.5}}{6tg^2\alpha h} [(R + 0.5h \cdot tg\alpha)^{1.5} - \\ &\quad - (r + 0.5 \cdot h \cdot tg\alpha)^{1.5}]. \end{aligned} \quad (25)$$

Откуда

$$\begin{aligned} S &= \frac{2 \cdot 2^{1.5} \cdot h^{1.5} tg^{1.5}\alpha}{6htg^2\alpha} [(R + 0.5htg\alpha)^{1.5} - \\ &\quad - (r + 0.5htg\alpha)^{1.5}] = \\ &= 0.94 \sqrt{\frac{h}{tg\alpha}} [(R + 0.5htg\alpha)^{1.5} - \\ &\quad - (r + 0.5htg\alpha)^{1.5}]. \end{aligned} \quad (26)$$

С учетом выражений (4), (6), (7), (10), (26) из зависимости (11) окончательно находим

$$\begin{aligned} W_B &= \frac{(\sin\alpha + \mu_0 \cos\alpha)}{\cos\alpha} \cdot \frac{\gamma_0}{1 - b_1} \cdot \vartheta_B^2 tg^2\alpha \times \\ &\quad \times 0.94 \sqrt{\frac{h}{tg\alpha}} [(R + 0.5htg\alpha)^{1.5} - \\ &\quad - (r + 0.5htg\alpha)^{1.5}] = \\ &= (tg\alpha + \mu_0) \cdot \frac{\gamma_0}{1 - b_1} \cdot \vartheta_B^2 \cdot h(R - r) \cdot tg^2\alpha \times \\ &\quad \times 0.94 \sqrt{\frac{h}{tg\alpha}} [(R + 0.5htg\alpha)^{1.5} - \\ &\quad - (r + 0.5htg\alpha)^{1.5}]. \end{aligned} \quad (27)$$

Для резца, показанного на рисунке 3, полное сопротивление внедрению в грунт составит (рисунок 5):

$$W_B = \frac{\gamma_0}{1-b_1} \cdot g_B^2 \cdot 0,94\sqrt{h} \cdot \sum_{i=1}^3 (tg\alpha_i + \mu_0) \cdot tg^2\alpha_i [(R + 0,5htg\alpha)^{1,5} - (r + 0,5htg\alpha)^{1,5}]. \quad (28)$$

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные зависимости позволяют определить силы сопротивления, действующие на резец фрезерного рабочего оборудования гидравлического экскаватора в процессе взаимодействия с разрабатываемым грунтом. Математическая модель учитывает такие физико-механические свойства грунта, как плотность, сжимаемость, а также скорость внедрения резца в точку контакта с грунтом. Это позволило описать процесс взаимодействия рабочего органа с грунтом наглядно и всесторонне.

Результаты исследований применимы при оптимизации конструктивных и режимных параметров фрезерного рабочего оборудования гидравлического экскаватора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аладинский В.В., Малков А.Г., Ушаков А.В. Метод ремонта газопроводов с использованием труб, бывших в эксплуатации // Территория Нефтегаз. 2009. № 8. С. 56–60.
2. Булавинцева А.Д., Мазуркин П. М. Динамика аварий по причиненному ущербу на линейной части магистральных нефтепроводов ОАО АК «Транснефть» // Современные наукоемкие технологии. 2011. № 4. С. 64–67.
3. Куркин А.С., Бровко В.В., Пономарев П.А. Особенности ремонтных конструкций и технологий, их сварки при ремонте магистральных трубопроводов без замены // Журнал нефтегазового строительства. 2015. № 1. С. 40–43.
4. Черняев К.В. Мониторинг технического состояния нефтепроводов // Трубопроводный транспорт нефти. 2000. № 9. С. 14–17.
5. Булавинцева А.Д., Мазуркин П.М. Динамика аварий по причиненному ущербу на линейной части магистральных нефтепроводов ОАО «АК «Транснефть» // Современные наукоемкие технологии. 2011. № 4. С. 64–67.
6. Tiratsoo John About decommissioning of production and transportation of oil: the UK experience // Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. 2017. № 1. pp. 82-83.
7. Ruggieri C., Fernando D. Numerical modelling of ductile crack extension in highpressure pipeline with

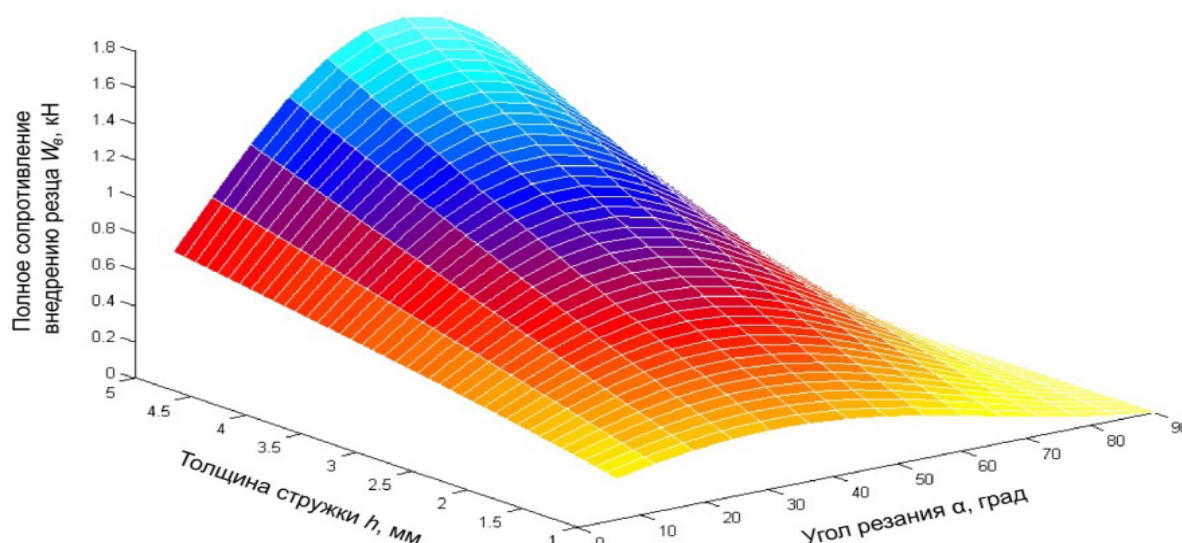


Рисунок 5 – Зависимость силы сопротивления внедрению резца в грунт от угла резания и толщины срезаемой стружки

Figure 5 – Dependence of the resistance force against the penetration of the cutter into the ground on the cutting angle and the thickness of the cut chips

longitudinal flaws // Eng. Struct. 33 (5) (2011) 1423-1438. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.01.001

8. Archibald I.C. Soil stabilizer // Pipeline and gas Journal. 1984. No 11. pp. 44-46.

9. Timashev S., Bushinskaya A. Methods of Assessing Integrity of Pipeline Systems with Different Types of Defects // Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems. 2016. pp. 9-43. DOI: 10.1007/978-3-319-25307-7-2.

10. Mourad N., Rabia K. Pipelines Reliability Analysis Under Corrosion Effect and Residual Stress // Arabian Journal for Science and Engineering. 2015, Vol. 40, Iss. 11. pp. 3273-3283. DOI: 10.1007/s13369-015-1723-9.

11. Chen F., Wu Ch. A novel methodology for forecasting gas supply reliability of natural gas pipeline systems // Frontiers in Energy. Issue 2. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11708-020-0672-5>.

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

13. Набиев Р.Р. Обеспечение надёжности длительно эксплуатируемых нефтепроводов // Трубопроводный транспорт нефти. 2010. № 12. С. 9-11.

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

15. Лукьянов А.А. Анализ напряженно-деформированного состояния ремонтных конструкций магистральных трубопроводов // Сварка и контроль. 2013. С. 181-188.

16. Большаков А.М., Сыромятникова А.С., Алексеев А.А. Непроектные положения газопроводов, проложенных подземным способом в районах многолетнемерзлых грунтов // Газовая промышленность. 2014. № 4. С. 66-69.

17. Емельянов Р.Т., Султанов Н.С., Закурдаев А.В., Скурихин Л.В. Моделирование динамики регулируемого гидромотора // Вестник КрасГАУ. 2014. № 8. С. 181-185.

18. Мухамедова Д.Ч. Современные технические и технологические решения по повышению эффективности ремонта газопроводов // Молодой ученый. 2011. № 5 (28). Т. 1. С. 86-88.

19. Мустафин Ф.М. Технология сооружения газонефтепроводов / Ф.М. Мустафин, Л.И. Быков – Уфа: Нефтегазовое дело, 2007. 632 с.

20. Аникин Е.А. Эффективные методы ремонта магистральных трубопроводов. - Москва: ИРЦ Газпром, 2001. 108 с.

21. Баталин Ю.П., Березин В.Л., Телегин Л.Г., Курепин Б.Н., Организация строительства магистральных трубопроводов: Москва: Недра, 1980. 344 с.

22. Салюков В.В. Ремонт локальных участков трубопровода / В.В. Салюков, Н.Х. Халлыев, В.Г. Селиверстов и [др.] – Москва: ИРЦ Газпром, 2001. 73 с.

23. Пенчук В.А. Закономерности разрушения грунта рабочими органами машин для земляных работ // Известия ВУЗов. Строительство. 1999. № 1.

24. Демиденко А.И., Кузнецов И.С. Совершенствование конструкции рабочего оборудования гидравлического экскаватора // Вестник СибАДИ. 2020; 17(1): 12-21. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-12-21>.

25. Сагомоян А.Я. Проникание. Москва: Изд-во МГУ, 1974. 231 с.

REFERENCES

1. Aladinskiy V.V., Malkov A.G., Ushakov A.B. Metod remonta gazoprovodov s ispol'zovaniyem trub, byvshikh v ekspluatatsii [Method of gas pipeline repair using used pipes]. *Territoriya Neftegaz*. 2009; 8: 56-60. (In Russian)

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

3. Kurkin A. S., Brovko V.V., Ponomarev P.A. Osobennosti remontnykh konstruksiy i tekhnologii ikh svarki pri remonte magistral'nykh truboprovodov bez zameny [Features of repair structures and their welding technologies during repair of main pipelines without replacement]. *Zhurnal neftegazovogo stroitel'stva*. 2015; 1: 40-43. (In Russian)

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

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

6. Tiratsoo John About decommissioning of production and transportation of oil: the UK experience // Science Jamp Technologies: *Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2017; 1: 82 - 83.

7. Ruggieri C., Fernando D. Numerical modeling of ductile crack extension in highpressure pipeline with longitudinal flaws // Eng. Struct. 33 (5) (2011) 1423-1438. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.01.001.

8. Archibald I.C. Soil stabilizer // Pipeline and gas Journal. 1984; 11: 44-46.

9. Timashev S., Bushinskaya A. Methods of Assessing Integrity of Pipeline Systems with Different Types of Defects // Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems. 2016: 9-43. DOI: 10.1007/978-3-319-25307-7-2.

10. Mourad N., Rabia K. Pipelines Reliability Analysis Under Corrosion Effect and Residual Stress // Arabian Journal for Science and Engineering. 2015; 40(11): 3273-3283. DOI: 10.1007/s13369-015-1723-9.

11. Chen F., Wu Ch. A novel methodology for forecasting gas supply reliability of natural gas pipeline systems // *Frontiers in Energy*. Issue 2. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11708-020-0672-5>.
12. Zorin Ye.Ye., Tolstov A.E., Yefimov V.M. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye truboprovodov podzemnoy prokladki v usloviyakh kriolitozony [Stress-deformed condition of underground gasket pipelines in cryolitosone conditions]. *Neft', gaz i biznes*. 2015; 9: 9-12. (In Russian)
13. Nabiyeu R.R. Obespecheniye nadozhnosti dlitel'no ekspluatiruyemykh nefteprovodov [Ensuring reliability of long-term operated oil pipelines]. *Truboprovodnyy transport nefti*. 2010; 12: 9-11. (In Russian)
14. Sharygin YU. M., Romantsov S. V., Sharygin A. M. Povysheniye prochnosti defektnykh trub, usileniykh kompozitnymi muftami s boltovym soyedineniyem [Increased strength of defective pipes reinforced by composite couplings with bolted connection]. *Transport i podzemnoye khraneniye gaza*. 2002; 3:104-107. (In Russian)
15. Luk'yanov A. A. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya remontnykh konstruksiy magistral'nykh truboprovodov [Analysis of stress-strain state of repair structures of main pipelines]. *Svarka i kontrol'*. 2013: 181-188. (In Russian)
16. Bol'shakov A.M., Syromyatnikova A.S., Alekseyev A.A. Nproyektnyye polozheniya gazoprovodov, prolozhennykh podzemnym sposobom v rayonakh mnogoletnemerzlykh gruntov // *Gazovaya promyshlennost'*. 2014; 4: 66-69. (In Russian)
17. Yemel'yanov R.T., Sultanov N.S., Zakurdayev A.V., Skurikhin L.V. Modelirovaniye dinamiki reguliruyemogo gidromotora [Simulation of controlled hydraulic motor dynamics] *Vestnik KrasGAU*. 2014; 8: 181-185. (In Russian)
18. Mukhammedova D. CH. Sovremennyye tekhnicheskiye i tekhnologicheskiye resheniya po povysheniyu effektivnosti remonta gazoprovodov / D. CH. Mukhammedova. // *Molodoy uchenyy*. 2011; 5 (28). T. 1: 86-88. (In Russian)
19. Mustafin F.M. Tekhnologiya sooruzheniya gazonefteprovodov / F.M. Mustafin, L.I. Bykov – Ufa: *Neft'egazovoye delo*, 2007: 632. (In Russian)
20. Anikin Ye.A. Effektivnyye metody remonta magistral'nykh truboprovodov. - M.: IRTS Gazprom, 2001: 108. (In Russian)
21. Batalin YU.P., Berezin V.L., Telegin L.G., Kurepin B.N., Organizatsiya stroitel'stva magistral'nykh truboprovodov: M.: *Nedra*, 1980: 344. (In Russian)
22. Salyukov, V.V. Remont lokal'nykh uchastkov truboprovoda / V.V. Salyukov, N.KH. Khallyyev, V.G. Seliverstov i dr. - M.: IRTS Gazprom, 2001: 73. (In Russian)
23. Penchuk, V.A. Zakonomernosti razrusheniya grunta rabochimi organami mashin dlya zemlyanykh rabot // *Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo*, 1999; 1. (In Russian)
24. Demidenko A.I., Kuznetsov I.S. Sovershenstvovaniye konstruksii rabocheho oborudovaniya gidravlichesкого ekskavatora. Nauchnyy retsenziruyemyy zhurnal *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(1): 12-21. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-12-21>. (In Russian)
25. Sagomonyan, A.YA. Pronikaniye. M.: *Izd-vo MGU*, 1974. – 231. (In Russian)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Илья Сергеевич Кузнецов – студент факультета «Нефтегазовая и строительная техника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5 e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ilya S. Kuznetsov (Omsk, Russia) – Student of the Oil and Gas and Construction Equipment Faculty of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5 e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

ОБСЛЕДОВАНИЕ ПАССАЖИРСКИХ ПОТОКОВ ПУТЕМ АНАЛИЗА ВАЛИДАЦИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРОЕЗДНЫХ БИЛЕТОВ

А.И. Фадеев, С. Алхуссейни

Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Применяемые сегодня методы определения спроса общественного транспорта предполагают большие затраты времени, ресурсов и высокую трудоемкость. В этой связи особую перспективу представляет изучение транспортного спроса на основе сбора, интеграции и анализа больших и разнородных данных, генерируемых различными источниками в пространствах жизнедеятельности человека: Urban computing, Big data, Internet of things.

Материалы и методы. В настоящей статье представлен метод определения (восстановления) корреспонденций пассажиров общественным транспортом посредством интеллектуального анализа операций валидации электронных проездных билетов (electronic travel tickets): смарт-карты (smart card), транспортной карты, магнитной карты, мобильного телефона или других электронных устройств (electronic gadget), реквизиты которых при выполнении валидации фиксируются в автоматизированной системе управления перевозками.

Результаты. Алгоритм расчета пассажирских корреспонденций реализован в компьютерной программе с использованием реляционной СУБД MS SQL Server. Апробация эффективности разработанной методики и программного обеспечения осуществлена по данным системы пассажирского транспорта г. Красноярск.

Обсуждение и заключение. Описанный в статье метод расчета пассажирских потоков путем анализа операций валидации электронных проездных билетов и данных системы диспетчерского управления движением транспортных средств позволяет определять выполненные маршрутные и сетевые корреспонденции пассажиров и на этой основе осуществлять объективную оценку спроса общественного транспорта и технико-эксплуатационных показателей транспортной системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пассажирский поток, транспортный спрос, пассажирские корреспонденции, матрица пассажирских корреспонденций, общественный городской транспорт.

Поступила 17.11.20, принята к публикации 26.02.21.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Фадеев А.И. Обследование пассажирских потоков путем анализа валидаций электронных проездных билетов / А.И. Фадеев, С. Алхуссейни. – DOI <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-52-71> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 1(77). – С. 52-71.

© Фадеев А.И., Алхуссейни С., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-52-71>

TRANSIT RIDERSHIP SURVEY BY ANALYSIS VALIDATION OF ELECTRONIC PASS TICKETS

Aleksandr I. Fadeev, Sami Alhusseini
Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. The methods used today for determining the demand on public transport come with a big waste of time, resources and a need for great effort. In this regard, a special perspective is to study the transit demand based on the collection, integration and analysis of large and diverse data, which were generated by various sources of human life: Urban computing, Big data, Internet of things.

Materials and methods. This article presents a method for determining (restoring) the correspondence of transit passengers by means of intelligent analysis of validation operations data of electronic travel tickets (smart card, transport card, magnetic card, mobile phone or other electronic devices (electronic gadgets)), which are recorded in the automated transportation management system during validation.

Results. The algorithm for calculating passenger correspondence is implemented in a computer program using the relational DBMS MS SQL Server. The effectiveness of the proposed algorithm was verified by calculating the passenger correspondence of public transport in the city of Krasnoyarsk (Russia).

Discussion and conclusion. The described method for calculating passenger flows, based on analyzing the data of validation operations of electronic tickets and data from the transit dispatch control system, makes possible to determine the route and passengers correspondence and, to carry out an objective assessment of the demand for public transport and the technical and operational indicators of the transit system.

KEYWORDS: passenger flow, transit demand, passenger correspondence, matrix of passenger correspondence, public urban transport.

Submitted 17.11.20, revised 26.02.21

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: Fadeev A.I., Alhusseini S. Transit ridership survey by analysis validation of electronic pass tickets. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (1):52-71. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-52-71>

© Fadeev A.I., Alhusseini S., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Данные о пассажирских потоках (спросе общественного транспорта, пассажирских корреспонденциях) применяются при решении большинства задач транспортного планирования¹ [1]. Транспортный спрос определяется с использованием четырехстадийной процедуры расчета или путем натурного обследования^{2, 3} [2, 3, 4, 5]. Современная четырехстадийная процедура транспортного моделирования состоит из

- определения количества поездок (trip generation);
- расчета матрицы корреспонденций (trip distribution);
- разделения корреспонденций по видам передвижений (mode split, mode-share);
- распределения корреспонденций по сети (traffic assignment, route assignment, route choice).

Спрос общественного транспорта рассчитывается на третьем этапе данной процедуры, на котором осуществляется прогнозирование вероятности выбора способа передвижения различными доступными видами транспорта.

Натурные обследования пассажирских потоков применяются с целью изучения параметров транспортного спроса: распределения пассажирских корреспонденций по направлениям, колебаний во времени, оценки расчетных методов транспортного спроса [2], калибровки расчетных моделей.

Один из основных недостатков существующих методов определения транспортного спроса – большие затраты времени, ресурсов и высокая трудоемкость [6, 7, 8, 9]. Отчасти данная проблема решается за счет оборудования транспортных средств системами автоматизированного учета пассажиров. Однако такое оборудование требует дополнительных затрат и устанавливается далеко не во всех случаях.

В настоящее время особую перспективу представляют методы изучения транспортного спроса, основанные на сборе, интеграции и анализе больших и разнородных данных, генерируемых различными источниками в

пространствах жизнедеятельности человека: мобильными телефонами, транспортными средствами и т.д. (Urban computing, Big data, Internet of things, IoT) [10, 11]. Рассматриваемый подход применяется для решения основных проблем, с которыми сталкиваются города: загрязнение воздуха, потребление энергии, транспортный трафик и т. д.

В рамках данного подхода (Urban computing, Big data) определенный интерес представляет интеллектуальный анализ операций валидации **смарт-карт** (smart card). Данная задача рассмотрена в [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26]. Исследования проводились в странах, где используются смарт-карты для сбора оплаты за проезд. Считается [24], что информация систем оплаты проезда посредством смарт-карт позволяет определить матрицу пассажирских корреспонденций без применения дорогостоящих процедур анкетирования пассажиров.

Системы сбора платы за проезд по смарт-картам хранят местоположение пункта посадки пассажира. В большинстве систем места выхода пассажира не фиксируются и, соответственно, не записываются в базу данных. Пункт завершения поездки можно определить на основании пункта начала следующей поездки, если пассажир все поездки оплачивает смарт-картой.

В разработанных методиках удельный вес идентифицированных поездок составляет 66% [14], 62% [25], 80% [16]. Для компенсации нераспознанных поездок в работе [16] предлагается использовать поправочный коэффициент, рассчитываемый как отношение общего числа поездок к количеству идентифицированных корреспонденций.

В настоящей статье рассмотрен метод определения (восстановления) корреспонденций пассажиров общественным транспортом посредством интеллектуального анализа операций валидации электронных проездных билетов (electronic travel tickets): **смарт-карты** (smart card), транспортной **карты**, магнитной карты, мобильного телефона или других электронных устройств (electronic gadget), реквизиты которых при выполнении валидации

¹ Martin W. A., McGuskin N. A. Travel Estimation Techniques for Urban Planning. National Cooperative Research Program Report 365. Transportation Research Board. National Research Council, Washington, DC. 1998.

² Якимов М. Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов: монография / М.Р. Якимов. – Москва: Логос. 2013.

³ Трофименко Ю.В., Якимов М.Р. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов. – Москва: Логос. 2013.

фиксируются в автоматизированной системе управления перевозками.

Таким образом требуется определить множество выполненных маршрутных (P) и сетевых (H) пассажирских корреспонденций. Сетевые корреспонденции (поездки с пересадками) рассчитываются из маршрутных: сетевая корреспонденция пассажира состоит из одной или нескольких последовательных маршрутных корреспонденций. При этом, в отличие от существующих методов, необходимо обеспечить:

- обработку операций валидации электронного билета как в начале, так и в конце поездки;
- расчет параметров пассажирских потоков и матрицы корреспонденций с учетом нераспознанных операций валидации;
- анализ цепочки корреспонденций за длительный период;
- оценку репрезентативности полученных пассажирских корреспонденций генеральной совокупности поездок;
- эффективные критерии совместимости операций, посредством которых рассчитываются пункты отправления и назначения пассажира.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При выполнении транзакции валидации электронного билета в информационной системе фиксируются следующие данные: идентификатор (Id) проездного билета, время совершения операции, Id транспортного средства. Необходимо привязать валидацию к остановочному пункту маршрута. Для этого используются пакеты навигационных данных системы диспетчерского управления движением, содержащие Id транспортного средства, номер маршрута, время формирования пакета, координаты транспортного средства (широта и долгота). Посредством этих данных рассчитывается фактическая траектория движения транспортных средств по маршрутной сети, которая представляется реляционным отношением

$$W(A, I, T^a, T^d) , \quad (1)$$

где A – Id транспортного средства;

I – Id остановочного пункта;

T^a, T^d – время прибытия на остановочный пункт и время отправления соответственно.

Как упоминалось выше, операция валидации проездного билета может быть осуществлена как в начале, так и в конце поездки, т.е. остановочный пункт валидации билета – это пункт отправления или назначения поездки пассажира. Считаем, что пассажир осуществляет валидацию электронного билета в течение движения до следующей остановки, если оплата осуществляется в начале поездки или на перегоне перед выходом из транспорта (оплата в конце поездки). На рисунке 1 приведена иллюстрация принципа определения остановочного пункта валидации при оплате проезда в начале поездки. К i -му остановочному пункту относятся все валидации, выполненные после прибытия в данный пункт до прибытия в следующий $i+1$ -й остановочный пункт, т.е. к i -й остановке относятся j -я и $j+1$ -я валидации электронного билета. $j+2$ -я, $j+3$ -я и $j+4$ -я операции относятся к $i+1$ -му остановочному пункту. Так, при валидации билета в начале поездки пунктом отправления пассажира считается остановка, предыдущая к транзакции, если валидация в конце поездки – первая остановка после оплаты проезда является пунктом назначения пассажира.

Таким образом формируется реляционное отношение множества транзакций валидации электронных билетов

$$R(D, S, M, K, A, I, T^a, T^d) , \quad (2)$$

где D – Id транзакции (уникальный номер транзакции валидации);

S – Id проездного билета;

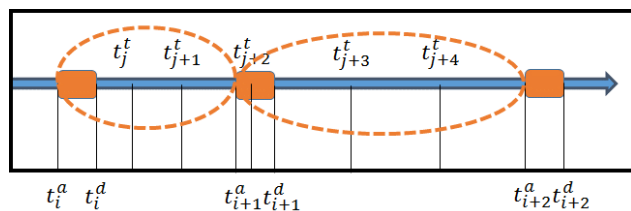
M, K – номер маршрута и направление движения соответственно;

A – Id транспортного средства;

I – Id остановочного пункта;

T^a – время прибытия на остановочный пункт;

T^d – время отправления из остановочного пункта.



t_j^t – время валидации;
 t_i^a – время прибытия на остановку;
 t_i^d – время отправления с остановки;
 t_j^t – the time taken to validate;
 t_i^a – time of the vehicle arrival;
 t_i^d – departure time from the bus stop

Рисунок 1 – Схема определения остановочного пункта валидации электронного билета

Figure 1 – Diagram of determining a stopping point for an electronic ticket validation

Транзакция валидации – это кортеж отношения, который обозначается как $r(d, s, m, k, a, i, t^a, t^d)$.

Множество маршрутных корреспонденций – это

$$P(D, I^b, T^b, I^e, T^e, L), \quad (3)$$

где D – Id транзакции валидации;

I^b, I^e – Id начального и конечного пунктов корреспонденции соответственно;

T^b, T^e – время начала и окончания корреспонденции;

L – длина поездки.

Сетевая корреспонденция состоит из одной или нескольких взаимосвязанных маршрутных корреспонденций, т.е.

$$h_j = \{p_x, p_{x+1} \dots\}. \quad (4)$$

Рассмотрим алгоритм определения маршрутных корреспонденций пассажира, который основан на анализе упорядоченного по времени множества валидаций электронного проездного билета (операций оплаты за проезд одного пассажира), выбранного за определенный период времени. Алгоритм последовательно повторяется для каждого электронного проездного билета.

Как упоминалось выше, в транзакции валидации электронного билета зафиксирован один из пунктов поездки. При оплате проезда в начале поездки – это начальный пункт, в конце поездки – конечный. Противоположный пункт поездки (конечный или начальный) определяется на основании анализа смежной транзакции. При оплате проезда в начале поездки смежной является следующая транзакция, в

конце поездки – предыдущая транзакция.

Текущая и смежная транзакции должны отвечать условиям связанности, т.е. валидации электронного билета в обеих транзакциях должны быть выполнены в начале или конце поездки. В противном случае определить маршрутную корреспонденцию пассажира (начальный или конечный пункт поездки) невозможно, анализируемая текущая транзакция валидации билета остается нераспознанной.

Схемы связанных транзакций даны на рисунке 2, а и 2, б. Транзакции на рисунке 2, в не отвечают данному условию, т.к. остановочные пункты валидации расположены зеркально: в конце j -й поездки и начале $j+1$ -й поездки.

Таким образом, корреспонденция может быть определена при выполнении одного (а или б) из следующих условий:

а) операция валидации выполнена в начале поездки, расстояние между пунктами валидации текущей и следующей транзакций больше пешеходной доступности и в подмножестве остановочных пунктов маршрута текущей транзакции, расположенных за пунктом валидации, имеется остановочный пункт, находящийся в пешеходной доступности от пункта валидации следующей поездки (см. рисунок 2, а);

б) операция валидации выполнена в конце поездки, расстояние между пунктами валидации текущей и предыдущей транзакций больше пешеходной доступности и в подмножестве остановочных пунктов, расположенных в маршруте текущей транзакции перед пунктом валидации, имеется остановочный пункт в пределах пешеходной доступности от пункта валидации предыдущей транзакции (см. рисунок 2, б).

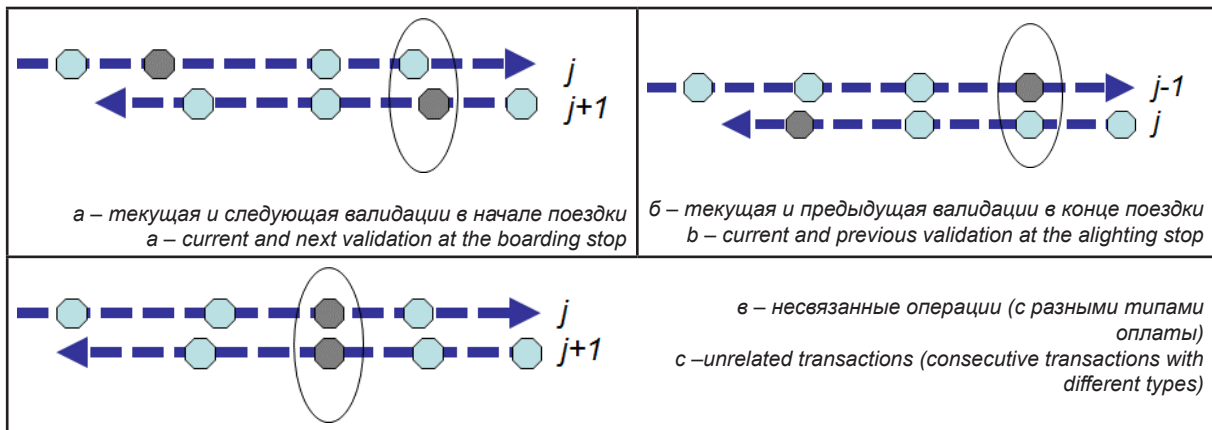


Рисунок 2– Возможные варианты следования транзакций валидации электронного билета, где – остановочный пункт валидации

Figure 2 – Possible consecutive transaction of validation electronic travel tickets, where: – validation stopping point

Таким образом можно записать условия связанных транзакций:

а) при оплате в начале поездки

$$l(i_j, i_{j+1}) > L_p; \min l(i_j^+, i_{j+1}) < L_p; \quad (5)$$

б) при оплате в конце поездки

$$l(i_j, i_{j-1}) > L_p; \min l(i_j^-, i_{j-1}) < L_p, \quad (6)$$

где L_p – расстояние пешеходной доступности остановочных пунктов;

i_j, i_{j+1}, i_{j-1} – пункт валидации текущей, следующей или предыдущей транзакции соответственно;

i_j^+ – остановочный пункт маршрута, следующий за пунктом валидации текущей транзакции;

i_j^- – остановочный пункт маршрута, расположенный перед пунктом валидации текущей транзакции.

Между остановочными пунктами рассчитывается евклидово расстояние по географическим координатам.

На основании вышеизложенного сформулирован алгоритм *определения маршрутных корреспонденций*.

Имеется упорядоченное по времени множество транзакций валидации электронного проездного билета за определенный период времени $R' \subset R$.

1. Выбирается текущая j -я транзакция $r_j(d_j, s_j, m_j, k_j, a_j, i_j, t_j^a, t_j^d)$. В начале расчета текущей является первая транзакция валидации проездного билета. В дальнейшем те-

кущая – это следующая транзакция за ранее обработанной.

Если все транзакции обработаны, расчет операций билета закончен. Осуществляется переход к формированию массива данных и обработке валидаций следующего билета. Расчет завершается после обработки всех электронных билетов.

Если текущая транзакция выбрана, переход к п. 2.

2. *Текущая транзакция проездного билета в начале поездки*. Из упорядоченного по времени множества транзакций электронного билета выбирается следующая $j+1$ -я транзакция. При ее отсутствии переход к п. 3.

Проверяются условия (5). Если не выполняется – переход к п. 3.

Иначе остановочный пункт текущей транзакции $r_j(i, t^d)$ является началом j -й корреспонденции $p_j(i^b, t^b)$, остановочный пункт i_j^+ является пунктом окончания j -й корреспонденции. Время окончания j -й корреспонденции t_j^e определяется из траекторий движения транспортных средств по маршрутной сети, полученных по результатам обработки данных спутниковой навигации (1). Для этого во множестве пунктов множества W определяется элемент (кортеж) $w_x(a, m, k, i, t^a, t^d)$, соответствующий пункту i_j^+ окончания j -й корреспонденции.

Длина корреспонденции l_j рассчитывается как сумма длин перегонов между пунктами начала i_j^b и окончания корреспонденции i_j^e маршрута m_j и направления k_j .

Переход к п. 1.

3. Текущая транзакция проездного билета в конце поездки. Из упорядоченного по времени множества транзакций электронного билета выбирается предыдущая к текущей, т.е. $j-1$ -я транзакция. При ее отсутствии поездки пассажира по j -й транзакции остается неопределенной, переход к п. 1.

Проверяются условия (6). Если не выполняется – поездка по j -й транзакции остается неопределенной, переход к п. 1.

Иначе остановочный пункт текущей транзакции $r_j(i, t^a)$ является завершением j -й корреспонденции $p_j(i^e, t^e)$, пункт i_j^- является пунктом начала j -й корреспонденции. Время начала j -й корреспонденции t_j^b определяется из траекторий движения транспортных средств по маршрутной сети (1).

Длина поездки L_j рассчитывается как сумма длин перегонов между пунктами начала i_j^b и окончания поездки i_j^e , маршрута поездки m_j и направления k_j .

Переход к п. 1.

Схема алгоритма дана на рисунке 3.

Расчет сетевых корреспонденций осуществляется на основании полученного множества маршрутных межостановочных корреспонденций, которые для каждого электронного билета упорядочиваются по времени $\{p_1, p_2, \dots, p_j, p_{j+1}, \dots\}$. Проверяя возможность объединения последовательных корреспонденций по условиям пересадочности (рисунок 4), получаем множество сетевых корреспонденций H , каждый элемент которого представляет собой одну или несколько связанных маршрутных корреспонденций. Две маршрутные корреспонденции объединяются в сетевую при выполнении следующих условий пересадочности:

а) пункт завершения текущей маршрутной корреспонденции (i_j^e) находится в пределах пешеходной доступности (L_p) от пункта начала следующей корреспонденции (i_{j+1}^b):

$$l(i_j^e, i_{j+1}^b) < L_p; \quad (7)$$

б) интервал времени между завершением текущей корреспонденции (t_j^e) и началом следующей (t_{j+1}^b) не превышает время пересадки (T_p):

$$(t_{j+1}^b - t_j^e) < T_p. \quad (8)$$

Время пересадки устанавливается исходя из необходимых в некоторых случаях затрат времени на пешеходное перемещение между остановочными пунктами и времени ожидания следующего маршрута, которое зависит от интервала движения.

В некоторых случаях критерии пересадочности (7) и (8) неприменимы [27], т.к. в последовательных поездках в пунктах пересадки пассажир за короткое время, не превышающее период пересадки, выполняет действия, являющиеся целью поездки, например расклейка объявлений. Такие поездки не могут быть отнесены к одной сетевой корреспонденции: во многих случаях пункты начала и завершения такой корреспонденции оказываются в пешеходной доступности, сетевая корреспонденция как бы исчезает. Рассматриваемые поездки будем называть корреспонденциями коммивояжера. Цепочку маршрутных поездок коммивояжера не следует считать одной корреспонденцией, т.к. в этом случае поездки выпадают из транспортного спроса.

В работе [27] предлагаются следующие критерии для выявления поездок коммивояжера:

- две последовательные корреспонденции совершаются по одному и тому же маршруту;
- длина составной поездки более чем в два раза превышает евклидово расстояние между начальным и конечным пунктом.

Проведенный анализ поездок коммивояжера показал, что данные критерии неэффективны. Во многих случаях составная корреспонденция пассажира не может быть отнесена к поездке коммивояжера, даже если ее длина существенно (более двух раз) превышает евклидово расстояние между начальным и конечным пунктом. Следует также учесть случаи последовательных поездок по разным маршрутам на одном и том же участке сети, которые формально не соответствуют приведенному выше критерию, но имеют признаки корреспонденции коммивояжера.

В настоящей работе предложены следующие критерии для выявления поездок коммивояжера. Сетевая пассажирская корреспонденция относится к поездкам коммивояжера и подлежит разделению при выполнении хотя бы одного из следующих условий:

- начальный и конечный пункты сетевой корреспонденции расположены в пределах пешеходной доступности;
- длина сетевой поездки больше, чем в 2 раза превышает кратчайшее расстояние по маршрутной сети между начальным и конечным пунктом (данное значение коэффициента установлено на основании анализа поездок с пересадками по маршрутной сети г. Красноярск);
- маршрутные корреспонденции выполнены по одному и тому же участку сети в разных направлениях.

Транспортный спрос представляется в виде матриц межостановочных маршрутных или сетевых пассажирских корреспонденций⁴, которые формируются как некая усредненная модель потребности населения в передвижениях по транспортной сети

$$Q = \|T_{ij}\|; i, j = 1, \dots, n, \quad (9)$$

где $T_{i,j}$ – количество передвижений пассажиров, совершаемых за интересующий период времени между пунктами i, j .

Рассмотрим порядок определения матрицы *маршрутных корреспонденций* по результатам обработки транзакций валидации электронных билетов. Расчет количества поездок между пунктами ij осуществляется

$$T_{ij} = \sum_m (p_{mij} \varphi_{mi} + p'_{mij} \varphi_{mj}) / \alpha_m^r, \quad (10)$$

где T_{ij} – расчетное количество поездок между пунктами i, j ;

p_{mij}, p'_{mij} – количество распознанных поездок между пунктами i, j по m -му маршруту, для которых пункт валидации является началом или завершением корреспонденции соответственно;

$\varphi_{mi}, \varphi_{mj}$ – коэффициент балансировки операций валидации на i -м или j -м остановочном пункте m -го маршрута ($\varphi_{mi} \geq 1; \varphi_{mj} \geq 1$);

α_m^r – коэффициент валидации электронных билетов m -го маршрута ($\alpha_m^r \leq 1$).

$$\alpha_m^r = R_m / Q_m, \quad (11)$$

где R_m, Q_m – количество пассажиров, перевезенных по электронным билетам и общее количество пассажиров m -го маршрута соответственно.

Коэффициент балансировки рассчитывается

$$\varphi_{ms} = \frac{z_{ms}^0 + z_{ms} + z'_{ms}}{z_{ms} + z'_{ms}}, \quad (12)$$

где $z_{ms}^0, z_{ms}, z'_{ms}$ – количество нераспознанных корреспонденций с операцией валидации на s -м остановочном пункте, количество интерпретированных транзакций с s -м пунктом операции валидации в начале или конце поездки соответственно.

Посредством коэффициентов балансировки компенсируются нераспознанные валидации, которые возникают, например, если пассажир одну или несколько поездок совершает посредством транспорта, в котором не применяются электронные проездные билеты (такси, личный автомобиль и др.). В результате разрывается цепочка поездок по электронным билетам.

Использование транзакций валидации электронных билетов позволяет получить параметры пассажирских потоков за любой период времени. Можно, например, сформировать средневзвешенную матрицу корреспонденций за рабочий день месяца. Для этого из множества поездок P , полученного в результате обработки валидаций электронных билетов, формируется выборка (подмножество) корреспонденций $P^* \subset P$, осуществленных в рабочие дни рассматриваемого месяца. Средневзвешенная матрица маршрутных пассажирских корреспонденций рассчитывается

$$T_{ij} = \sum_m \frac{(\# P_{mij} \varphi_{mi} + \# P'_{mij} \varphi_{mj})}{\alpha_m^r d_m}, \quad (13)$$

где d_m – количество дней обслуживания m -го маршрута;

$\# P_{mij}$ – мощность множества пассажирских корреспонденций $P_{mij} \subset P^*$ k -го маршрута между пунктами ij , в котором i – пункт валидации проездного билета;

$\# P'_{mij}$ – мощность множества пассажирских корреспонденций $P_{mij} \subset P^*$ m -го маршрута между пунктами ij , в котором j – пункт валидации проездного билета.

Рассмотрим порядок расчета матрицы *сетевых пассажирских корреспонденций*. Имеется множество маршрутных корреспонденций P , множество сетевых корреспонденций H . Для каждой маршрутной корреспонденции определен коэффициент корректировки, посредством которого учитывается удельный вес валидации электронных билетов и количество нераспознанных корреспонденций. Коэффициент корректировки k корреспонденции между пунктами i и j по маршруту m рассчитывается как

$$k_x = \begin{cases} \varphi_{mi} / \alpha_m^r, & \text{если } i \text{ пункт валидации;} \\ \varphi_{mj} / \alpha_m^r, & \text{если } j \text{ пункт валидации.} \end{cases} \quad (14)$$

⁴ The Online TDM Encyclopedia. <https://www.vtpi.org/tdm/index.php>

Требуется определить коэффициент корректировки сетевых корреспонденций, полученных в результате обработки операций валидации электронных проездных билетов. Данный коэффициент рассчитывается

$$k_j = (k_x + k_{x+1} + \dots) / \# \{p_x, p_{x+1} \dots\}, \quad (15)$$

где k_x – коэффициент корректировки x маршрутной корреспонденции, которая входит в j -ю сетевую пассажирскую корреспонденцию;

$\# \{p_x, p_{x+1} \dots\}$ – количество маршрутных корреспонденций, из которых состоит сетевая пассажирская корреспонденция (мощность множества $\{p_x, p_{x+1} \dots\}$).

Таким образом, матрица сетевых корреспонденций определяется

$$T'_{zs} = \sum_{j \in Q} k_j, \quad (16)$$

если zs – пункты начала и завершения j -й сетевой корреспонденции;

Q – множество интерпретированных сетевых корреспонденций.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Алгоритм расчета пассажирских корреспонденций реализован в компьютерной программе. Формирование пассажирских корреспонденций из транзакций валидации электронных билетов предполагает обработку существенного объема данных: десятков миллионов

строк таблицы операций валидаций и сотни миллионов строк таблицы навигационных данных. Для такого массива информации целесообразно использовать инструмент реляционной алгебры посредством современных СУБД, например MS SQL Server, применение которого обеспечивает эффективную реализацию предложенного алгоритма.

Апробация эффективности разработанной методики осуществлена по данным за октябрь 2016 г. и апрель 2019 г., предоставленным Муниципальным казенным учреждением (МКУ) «Красноярскгортранс», осуществляющим диспетчерское управление пассажирским транспортом г. Красноярска. Для обработки МКУ «Красноярскгортранс» предоставлены в СУБД MS SQL Server следующие реляционные отношения (таблицы базы данных):

- операций валидации электронных проездных билетов;
- навигационных данных позиционирования транспортных средств;
- модель маршрутной сети.

Информация о количестве валидаций электронных проездных билетов, использованных в исследованиях, дана в таблице 1. На пассажирском транспорте г. Красноярска по электронным проездным билетам производится порядка 6 млн поездок в месяц, что составляет от 30% до 40% пассажиров. Основной объем перевозок (93–94%) осуществляется автобусом, удельный вес электрического транспорта (трамвай, троллейбус) составляет порядка 7%.

Таблица 1
Распределение валидаций электронных проездных билетов по дням недели

Table 1
Distribution of e-ticket validations by week days

День недели	Октябрь 2016 г.				Апрель 2019 г.			
	Кол-во	Дней	За день	Уд. вес, %	Кол-во	Дней	За день	Уд. вес, %
1	1131597	5	226319	15,8	1172388	5	234478	15,7
2	935860	4	233965	16,4	1247521	5	249504	16,7
3	939653	4	234913	16,4	991477	4	247869	16,6
4	932214	4	233054	16,3	983885	4	245971	16,4
5	933877	4	233469	16,3	963565	4	240891	16,1
6	759452	5	151890	10,6	619856	4	154964	10,4
7	574414	5	114883	8,0	486788	4	121697	8,1
ИТОГО			1428494	100,0			1495375	100,0

На рисунке 5 дано распределение количества перевезенных пассажиров по часам буднего дня, определенное из валидаций электронных билетов (2016, 2019 гг.) и обследований пассажирских потоков (2006, 2011 гг.) общественного транспорта г. Красноярска. Из рисунка видно, что поездки пассажиров по электронным билетам повторяют динамику пассажирских потоков по часам суток, полученную из сплошных обследований 2006, 2012 гг. Некоторые имеющиеся расхождения объясняются изменениями в структуре транспортного спроса, произошедшие с 2006 г. и 2012 г. Динамика количества валидаций электронных билетов по данным мая 2019 г. аналогична апрелю 2016 г.

Как упоминалось выше, расчет пассажирских корреспонденций состоит из следующих этапов:

- определение фактической траектории движения транспортных средств по маршрутной сети;
- расчет маршрутных и сетевых пассажирских корреспонденций.

Обработка данных за месяц на персональном компьютере составляет порядка 250 ч процесса определения фактической траектории и 200 ч – формирования маршрутных и сетевых пассажирских корреспонденций. Фрагмент списка упорядоченных по времени маршрутных корреспонденций электронного билета приведен на рисунке 6.

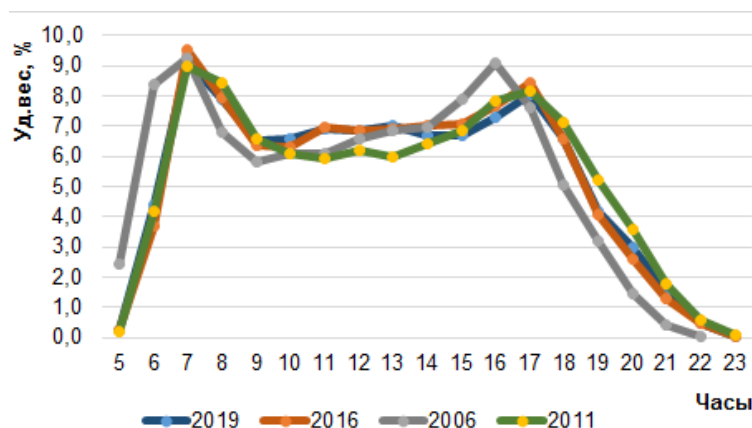


Рисунок 5 – Распределение количества перевезенных пассажиров в будний день: валидации электронных билетов 2016, 2019 гг.; обследований пассажирских потоков 2006, 2011 гг. (г. Красноярск)

Figure 5 – Ridership distribution on a weekday: by validation of electronic tickets in 2016, 2019; by surveys of passenger flows in 2006, 2011 (Krasnoyarsk city)

Корреспонденции											
Id	NbRt	Dir	Id нач. ост.	Наименование	Время	Id транз.	Id кон. ост.	Наименование	Время	Id транз.	Длина, км
13119561	26	В	604	БСМП	08:03 31.03.19	13119561	985	Железнодорожная бол	08:32 31.03.19	13119612	8,708601
13119612	26	В	985	Железнодорожная	14:26 31.03.19	13119612					
13119613	26	В	602	ул. Крупской	07:37 01.04.19	13119613	980	ул. Ломоносова	08:05 01.04.19	13119569	6,711759
13119569	14	А	979	ул. Ломоносова	16:21 01.04.19	13119569	1001	ул. Корнеева	16:31 01.04.19	13119609	3,670141
13119609	49	А	1001	ул. Корнеева	17:05 01.04.19	13119609	637	БСМП (ул. Курчатова)	17:13 01.04.19	13119570	2,787544
13119570	26	В	604	БСМП	07:22 02.04.19	13119570	985	Железнодорожная бол	07:50 02.04.19	13119610	8,708601
13119610	26	А	985	Железнодорожная	12:57 02.04.19	13119610	603	БСМП	13:30 02.04.19	13119583	9,074359
13119583	26	В	604	БСМП	07:57 03.04.19	13119583	985	Железнодорожная бол	08:29 03.04.19	13119560	8,708601
13119560	26	А	985	Железнодорожная	12:53 03.04.19	13119560	603	БСМП	13:22 03.04.19	13119571	9,074359
13119571	26	В	604	БСМП	15:28 03.04.19	13119571	980	ул. Ломоносова	15:56 03.04.19	13119608	7,332676
13119608	26	А	979	ул. Ломоносова	17:18 03.04.19	13119608	603	БСМП	17:51 03.04.19	13119559	7,812416
13119559	26	В	604	БСМП	07:39 04.04.19	13119559	985	Железнодорожная бол	08:10 04.04.19	13119584	8,708601

Рисунок 6 – Список сформированных маршрутных корреспонденций (фрагмент)

Figure 6 – List of generated routing correspondence (fragment)

Из рисунка видно, что некоторые транзакции остаются неопределенными: для них не указывается пункт назначения пассажира.

Разработанный алгоритм позволяет интерпретировать порядка 65% операций. К концу расчетного периода имеется тенденция снижения удельного веса распознанных валидаций, что объясняется отсутствием в базе данных операций последующих поездок, которые были осуществлены в следующий период. Снижение удельного веса интерпретированных поездок проявляется за пять дней до конца периода: некоторые пассажиры выполняют поездки с перерывом в несколько дней.

Для получения корректных пассажирских корреспонденций следует использовать результаты, находящиеся в периоде один-два дня после начальной даты и не менее пяти дней до конечной даты обрабатываемых исходных данных. В настоящей статье при анализе пассажирских потоков используется период со 2 по 25 число месяца (МКУ «Красноярскгортранс» предоставлены данные за календарный месяц).

Репрезентативность результатов. Из валидаций электронных проездных билетов получаем множество маршрутных и сетевых пассажирских корреспонденций, которые являются выборкой из генеральной совокупности поездок пассажиров. Необходимо определить соответствие выборочной совокупности поездок, полученных по данным системы учета операций валидации электронных билетов, генеральному множеству пассажирских корреспонденций. Необходимо доказать, что основные параметры выборочной совокупности (из валидаций электронных билетов) соответствуют генеральной совокупности с достаточной точностью.

Подвижность населения обуславливается социальным составом населения и целевым характером передвижений. Существует вероятность того, что структура пассажиров, оплачивающих поездки электронными билетами, отличается от пассажиров генеральной совокупности. Например, можно ожидать, что электронными билетами в меньшей степени пользуется приезжее население.

Оценка репрезентативности выборки поездок по электронным билетам осуществляется путем сравнения ее с результатами выборочного автоматизированного учета пассажиров, произведенного в периоды, за которые осуществлена обработка валидаций проездных билетов. Данные автоматизированного учета получены от МКУ «Красноярскгортранс». Вы-

борочное обследование пассажиропотоков осуществлено с использованием специального оборудования, смонтированного в транспортных средствах.

Объем выборочного автоматизированного учета составил более 281 тыс. пассажиров за апрель 2019 г. и 336 тыс. пассажиров за октябрь 2016 г. Было обследовано 6938 рейсов в апреле 2019 г. и 6094 рейса в октябре 2016 г. Всего обследовано 11 маршрутов из 68 постоянных маршрутов общественного транспорта г. Красноярска, т.е. 16% постоянных маршрутов.

Таким образом, имеется две выборки маршрутных пассажирских корреспонденций: из валидаций электронных билетов (выборка 1) и полученная путем обследования (выборка 2). Сравним распределение по длине маршрута количество входящих и выходящих пассажиров данных выборок.

Маршрут разделен на k непересекающихся интервалов. Для каждого интервала рассчитывается количество вошедших и вышедших пассажиров выборки 1 и 2. Таким образом формируются две независимые несвязанные выборки. Для их сравнения воспользуемся критерием Стьюдента (t -критерием), который позволяет найти вероятность того, что оба средних значения в выборках относятся к одной и той же совокупности.

На рисунке 7 в качестве примера даны гистограммы распределения числа вошедших пассажиров одного из маршрутов. Гистограмма позволяет выдвинуть гипотезу о том, что две рассматриваемые выборки относятся к одной и той же совокупности.

Статистика критерия для случая несвязанных, независимых выборок равна

$$t_e = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sigma_{x-y}}, \quad (17)$$

где $\bar{x}$, $\bar{y}$ – средние арифметические в экспериментальной и контрольной группах;

σ_{x-y} – стандартная ошибка разности средних арифметических, которая рассчитывается по формуле [25]:

$$\sigma_{x-y} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 + \sum (y_i - \bar{y})^2}{n_1 + n_2 - 1} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}. \quad (18)$$

Далее необходимо сравнить t_e с теоретическим значением t -распределения Стьюдента t_k при числе степеней свободы $n_1 + n_2 - 2$. Гипотеза о равенстве выборок принимается, если $t_e < t_k$.

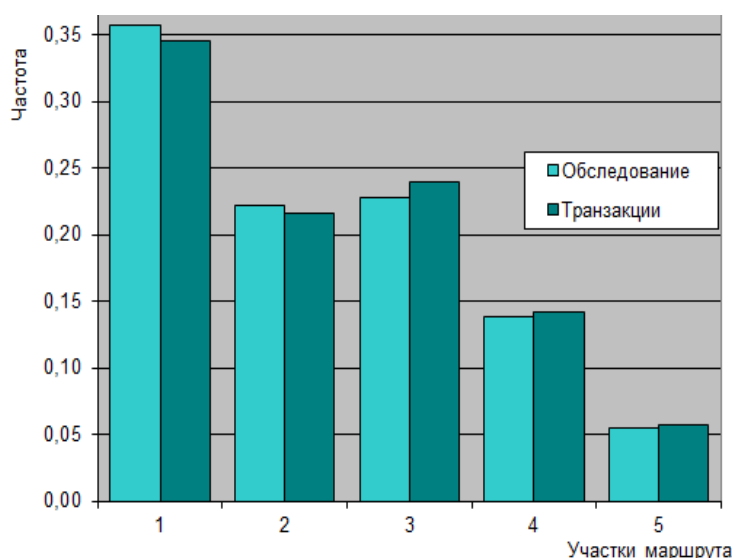


Рисунок 7 – Гистограмма распределения числа вошедших пассажиров по длине маршрута №61 (обратное направление)
Figure 7 – Distribution of passengers alighting along the length of route No. 61 (reverse direction)

Результаты расчета t -критерия сравниваемых выборок приведены в таблице 2. При степени свободы, равной 8, теоретические значения критерия Стьюдента составляют 1,860 ($P \leq 0,05$); 2,896 ($P \leq 0,01$); 4,501 ($P \leq 0,001$). Наибольшее значение статистики (см. табли-

цу 2) составляет 2,923 для прямого направления 49-го маршрута по вышедшим пассажирам (октябрь 2016 г.) и 2,038 для обратного направления 31-го маршрута по вышедшим пассажирам. Большинство результатов расчета не превышает критическое значение 1,860.

Таблица 2
Результаты расчета статистики критерия Стьюдента сравниваемых выборок

Table 2
Results of calculating the values of Student's test for the compared samples

Маршрут	Направление*	Вошло пассажиров	Вышло пассажиров	Маршрут	Направление*	Вошло пассажиров	Вышло пассажиров
Октябрь 2016 г.				Апрель 2019 г.			
Автобус				Автобус			
49	A	1,661	2,923	26	A	0,264	1,755
49	B	1,566	0,375	26	B	0,495	0,881
52	A	1,822	1,637	31	A	1,62	1,169
52	B	1,693	1,637	31	B	0,987	2,038
55	A	0,618	0,326	37	A	0,314	1,384
55	B	0,469	0,672	37	B	0,426	0,736
61	A	0,188	0,164	52	A	0,85	0,533
61	B	0,188	0,217	52	B	1,307	0,355
Троллейбус				Троллейбус			
5т	A	1,249	0,817	7т	A	0,63	0,186
5т	B	0,698	1,248	7т	B	0,684	0,173
15т	A	2,320	0,597				
15т	B	1,936	1,184				

Примечание. * A – прямое направление; B – обратное направление

Таблица 3
Технико-эксплуатационные показатели маршрутов пассажирского транспорта
г. Красноярска в среднем за будний день апреля 2019 г. (фрагмент)

Table 3
Technical and operational indicators of transit routes in Krasnoyarsk in average for a weekday in April 2019
(fragment)

Маршрут	Q_k	P_k	l_q	Z_m	Q_p	q_n	l_m	γ_d	K_{sm}
10	5918	35252	6,0	121	49,1	90	22,8	0,14	3,8
11	5451	22602	4,1	177	30,8	90	10,3	0,14	2,5
12	8425	65963	7,8	140	60,4	90	28,9	0,18	3,7
13т	5084	15084	3,0	113	45,1	90	8,5	0,18	2,9
14	1511	8100	5,4	32	47,7	45	16,3	0,35	3,0

ИТОГО	710049	4342741	6,1					0,27	

На основании изложенного можно сделать вывод, что выборки, полученные из операций валидации электронных билетов и по результатам натурного обследования пассажирских потоков, одинаковые в статистическом смысле. Транзакции операций валидаций репрезентативны генеральной совокупности пассажирских корреспонденций, т.е. они могут применяться для оценки характеристик генеральной совокупности в пределах допустимых погрешностей.

Расчет технико-эксплуатационных показателей транспортной системы. Рассмотрим полученные результаты обработки транзакций валидации электронных билетов в сравнении с ранее проведенными обследованиями пассажирских потоков.

Из операций с электронными билетами средняя дальность поездок пассажиров составляет 6,1 км и 6,7 км по результатам натурного обследования пассажирских потоков. Разница в 10% между средней дальностью поездки пассажира в 2006 и 2019 гг. объясняется изменением системы маршрутов и спроса общественного транспорта. Динамика дальности поездок пассажиров (рисунок 8), полученная при обработке операций валидации электронных билетов за апрель 2019 г., соответствует обследованию пассажирских потоков 2006 г., что свидетельствует о стабильном характере пассажирских потоков и близости результатов обработки валидаций электронных билетов

фактическим параметрам транспортного спроса.

В таблице 3 даны результаты расчета технико-эксплуатационных показателей маршрутов в среднем за будний день месяца (выборка за период с 02.04.2019 по 24.04.2019). Определены следующие показатели:

- объем перевозок по k -му маршруту

$$Q_k = \sum_i \sum_j (p_{kij} \varphi_{ki} + p'_{kij} \varphi_{kj}) / \alpha_k^r, \quad (19)$$

пассажирооборот k -го маршрута

$$P_k = \sum_i \sum_j (p_{kij} \varphi_{ki} + p'_{kij} \varphi_{kj}) l_{ij} / \alpha_k^r, \quad (20)$$

где l_{ij} – длина ij -й корреспонденции;
 $l_q = P / Q$ – средняя дальность поездки пассажира⁵;

Z_m – количество рейсов по маршруту (из отчетных данных МКУ «Красноярсгортранс»);

$Q_p = Q / Z_m$ – количество пассажиров за рейс;

q_n – вместимость подвижного состава, обслуживающего маршрут (из отчетных данных МКУ «Красноярсгортранс»);

l_m – средняя длина маршрута (из отчетных данных МКУ «Красноярсгортранс»);

$\gamma_d = P / (Z_m l_m q_n)$ – коэффициент динамического использования вместимости¹;

$K_{sm} = l_m / l_q [16]$ – коэффициент сменности пассажиров¹.

⁵ Ефремов И. С. Теория городских пассажирских перевозок: учеб. пособие для вузов / И.С. Ефремов, В.М. Кобозев, Юдин В. А. – Москва: Высш. школа, 1980. 535 с.

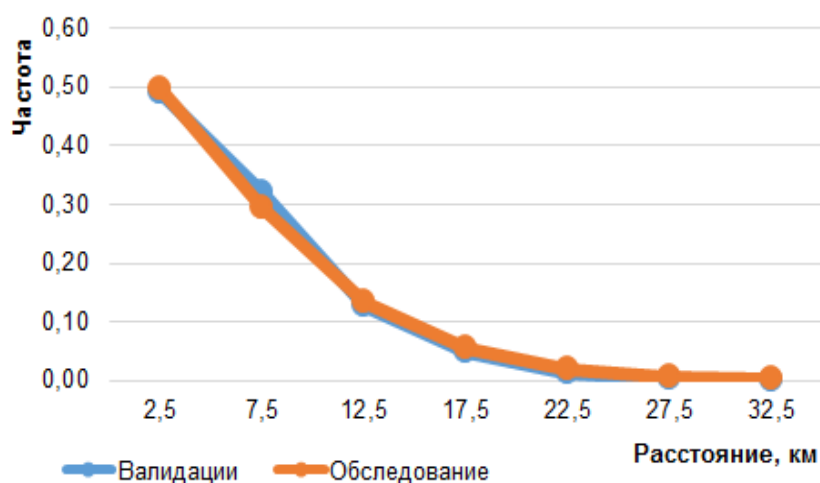


Рисунок 8 – Динамика среднего расстояния поездки пассажира

Figure 8 – Dynamics of the average distance traveled by a passenger

Коэффициент динамического использования вместимости за будний день составил 0,27. Полученные результаты соответствуют отчетным данным перевозчиков и ранее проведенным обследованиям пассажирских потоков.

Для целей планирования важным параметром является динамика пассажиропотока по участкам маршрутов. Рассчитаем мощность пассажирских потоков для каждого перегона. Количество пассажиров, перевезенных через перегон ρ маршрута k , определяется следующим образом:

$$Q_{kp} = \sum_{\rho_i < \rho} \sum_{\rho_j > \rho} (p_{kij} \phi_{ki} + p'_{kij} \phi_{kj}), \quad (21)$$

где ρ – номер остановочного пункта по порядку в k -м маршруте в прямом или обратном направлении;

ρ_i, ρ_j – номер начального, конечного остановочного пункта по порядку маршрутной пассажирской корреспонденции kij .

На рисунке 9 в качестве примера приведена эпюра пассажирских потоков по маршруту №10 за рабочий день.

Как упоминалось выше, при определении сетевых пассажирских корреспонденций требуется выделить поездки коммивояжера. Пример корреспонденции коммивояжера дан на рисунке 10. При значительной длине корреспонденции, состоящей из девяти поездок с пересадками, начальный и конечный пункты расположены в пределах пешеходной доступности. Таким образом, несмотря на удовлетворение фактических критериев пересадоч-

ности, рассматриваемую суммарную поездку пассажира нельзя считать сетевой корреспонденцией. Ее следует разделить на звенья и каждое звено рассматривать как отдельную корреспонденцию.

В таблице 4 приведена структура пассажирских корреспонденций общественного транспорта г. Красноярск за апрель 2019 г. В таблице показано распределение поездок коммивояжера, определенных в соответствии с предложенными критериями. По маршрутной сети г. Красноярск 91,5% поездок выполняется без пересадок (состоят из одного звена), 8% поездок выполнены с одной пересадкой, а остальные 0,5% поездок с двумя и более пересадками. При обработке валидаций проездных билетов наибольшее число звеньев в поездках пассажира равно 8 (7 пересадок), в апреле 2019 г. выявлено 2 таких корреспонденции.

По критерию пешеходной доступности выявлено около 14% корреспонденций с пересадками (состоящих из двух и более звеньев), которые относятся к поездкам коммивояжера. У данных корреспонденций начальный и конечный пункты расположены в пределах пешеходной доступности, в то время как общая длина корреспонденции составляет несколько километров (или десятков километров).

К корреспонденциям коммивояжера из общего числа поездок с пересадками отнесено более 40% по критерию перемещения по одному и тому же участку сети и более 30% по соотношению фактической длины корреспонденции и возможной по маршрутной сети.

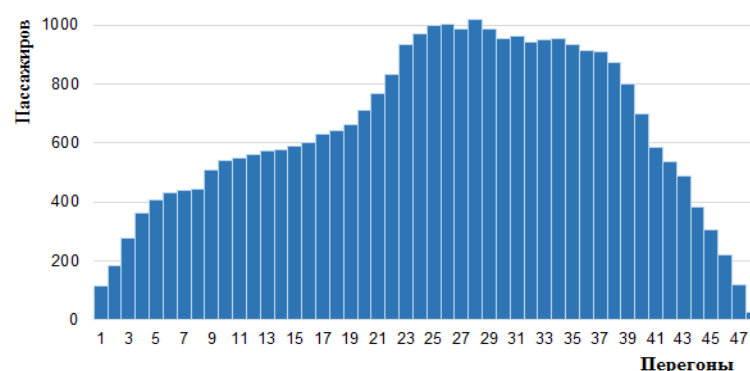


Рисунок 9 – Эпюра пассажирских потоков по маршруту №10 в среднем за рабочий день

Figure 9 – Diagram of passenger flows on route No. 10 on average per working day

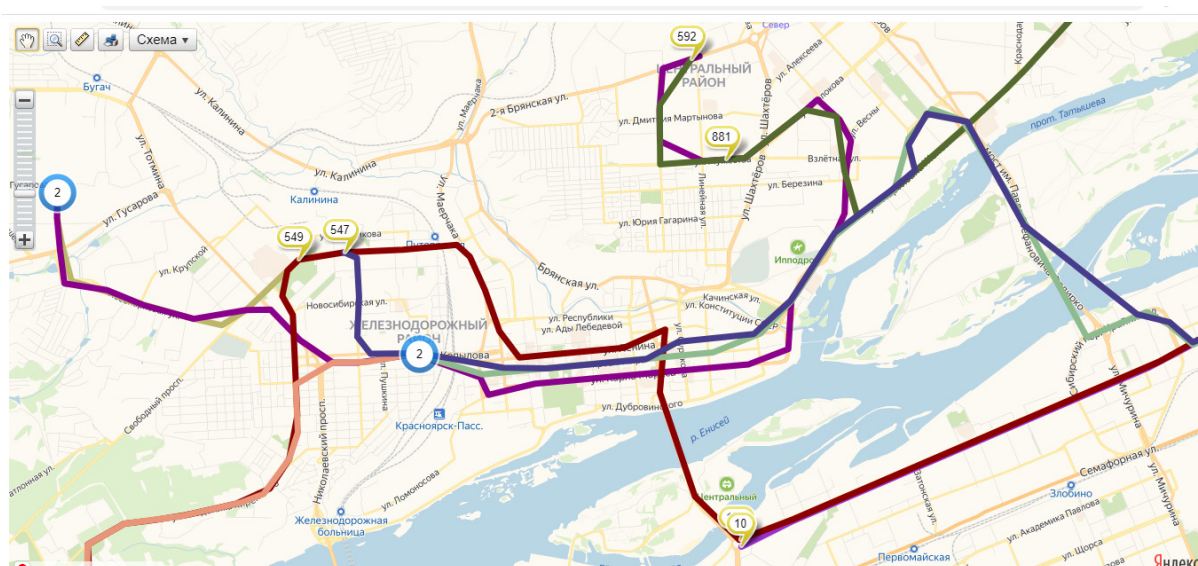


Рисунок 10 – Схема пассажирской корреспонденции коммивояжера: начальный пункт 549 и конечный – 547 находятся на расстоянии пешеходной доступности⁶

Figure 10 – Scheme of short activities trip: start at point 549 and end 547, which are within walk access link

В соответствии с таблицей 4 на маршрутной сети г. Красноярска в настоящее время к поездкам с пересадками относится 8,5% пассажирских корреспонденций. Из них около половины (44,8) – это корреспонденции коммивояжера, т.е. поездки, выполняемые с определенными целями в пунктах пересадок. Таким образом, удельный вес поездок с пересадками за вычетом поездок коммивояжера составляет 4,7%, причем в сетевых корреспонденциях наблюдается не более одной пересадки. Все по-

ездки с большим числом пересадок в результате анализа отнесены к корреспонденциям коммивояжера.

Из таблицы 4 видно, что суммарный удельный вес по критериям корреспонденций коммивояжера превышает удельный вес таких поездок. Это объясняется тем, что некоторые поездки коммивояжера удовлетворяют более чем одному показателю, например, критерию пешеходной доступности и совпадению участков сети разных звеньев корреспонденции.

⁶ Получено с использованием API Яндекс.Карт

Таблица 4
Структура корреспонденций коммивояжера, определенных по предложенным критериям

Table 4
Short activities trips structure identified by proposed criteria

Поездки			Критерии поездок коммивояжера							
Звеньев	ВСЕГО		Пешеходная доступность		Совпадения участка сети		Фактическая и сетевая длина		ИТОГО	
	Количество	Уд. вес, %	Количество	Уд. вес, %	Количество	Уд. вес, %	Количество	Уд. вес, %	Количество	Уд. вес, %
1	2154165	91,5								
2	189363	8,0	25557	13,5	71897	38,0	54487	28,8	79716	42,1
3	10226	0,4	1669	16,3	8203	80,2	5715	55,9	8577	83,9
4	1689	0,1	615	36,4	1642	97,2	1446	85,6	1689	100,0
5	146	0,0	54	37,0	146	100,0	135	92,5	146	100,0
6	27	0,0	4	14,8	27	100,0	26	96,3	27	100,0
7	5	0,0	1	20,0	5	100,0	5	100,0	5	100,0
8	2	0,0			2	100,0	2	100,0	2	100,0
*	201458	8,5	27900	13,8	81922	40,7	61816	30,7	90162	44,8
**	2355623	100								

Примечание. * поездок с пересадками; ** поездок всего.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Перспективным источником данных о спросе на общественный транспорт является массив операций валидации **электронных проездных билетов, посредством которого** обеспечивается определение пассажирских корреспонденций без применения дорогостоящих процедур анкетирования пассажиров и натурного обследования пассажирских потоков.

В настоящей статье представлен метод определения (восстановления) корреспонденций пассажиров общественным транспортом посредством интеллектуального анализа операций валидации электронных проездных билетов (electronic travel tickets): **смарт-карты (smart card)**, транспортной **карты**, магнитной карты, мобильного телефона или других электронных устройств (electronic gadget), реквизиты которых при выполнении валидации фиксируются в автоматизированной системе управления перевозками.

2. Проведенная апробация разработанной методики подтверждает эффективность данного подхода для определения спроса на городской общественный транспорт и объективной оценки технико-эксплуатационных по-

казателей функционирования транспортной системы.

Полученные технико-эксплуатационные показатели функционирования транспортной системы подтверждаются отчетными данными перевозчиков и ранее проведенными обследованиями пассажирских потоков.

3. Оценка репрезентативности поездок по электронным билетам, выполненная по разработанной методике с использованием выборочного автоматизированного учета пассажиров, подтверждает статистическое соответствие выборочной совокупности маршрутных и сетевых пассажирских корреспонденций, полученных по данным валидаций электронных проездных билетов, генеральному множеству поездок общественным транспортом в пределах допустимых погрешностей.

Параметры транспортного спроса, полученные из операций валидации электронных проездных билетов, могут применяться для оценки характеристик генеральной совокупности пассажирских корреспонденций в пределах допустимых погрешностей.

4. Направлением дальнейших исследований является интеграция имеющегося программного обеспечения в систему учета

оплаты проезда и диспетчерского управления движением транспорта для обеспечения промышленной технологии непрерывного мониторинга пассажирских потоков общественного городского транспорта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Штоцкая А.А. Оценка транспортной подвижности населения на основе дезагрегированных моделей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. 21 (5). С. 199–207.
2. Семёнов В.В., Ермаков А.В. Исторический анализ моделирования транспортных процессов и транспортной инфраструктуры // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2015. № 3. 36 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-3>
3. Ortuzar J. D., Willumsen L. G. Modelling transport. John Wiley & Sons, 2011. 30 p.
4. Lee D. Requiem for large-scale models. Journal of the American Institute of Planners, Vol 39, No 3, May, 1973. p. 63-78
5. Atkins S. Transportation planning models: What the papers say. Traffic Engineering and Control, Vol 27, No 9, September, 1986.
6. Fadeev A.I., Alhusseini S., Belova E.N. Monitoring Public Transport Demand Using Data from Automated Fare Collection System. Advances in Engineering Research, volume 158: Proceedings of the International Conference "Aviamechanical engineering and transport". 2018. p. 5-12
7. Fadeev A., Alhusseini S. Using Automated Fare Collection System Data To Determine Transport Demand. Advances in Engineering Research, volume 188. International Conference on Aviamechanical Engineering and Transport (AviaENT 2019). Pp. 1-9
8. Fadeev A., Alhusseini S. Determining The Public Transport Demand by Validation Data Of the Electronic Tickets. MIST: Aerospace 2019 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 734 (2020) 012148 IOP Publishing.
9. Fadeev A.I., Alhusseini S. Passenger trips analysis determined by processing validation data of the electronic tickets in public transport. "IOP Conference Series: Materials Science and Engineering".
10. Zheng Y, Capra L, Wolfson O, and Yang H, Urban computing: Concepts, methodologies, and applications. ACM Trans. Intell. Syst. Technol., vol. 5, no. 3. pp. 1-55, Sep. 2014.
11. Chen M. Shiwen Mao, Yin Zhang, Victor C.M. Leung. Big Data. Related Technologies. Challenges, and Future Prospects, Springer, 2014. 100 p.
12. Barry J.J., Newhouser R., Rahbee A., Sayeda S. Origin and destination estimation in New York City with automated fare system data. Transportation Research, Record 1817, 2002. pp.183-187.
13. Zhao J., Rahbee A., Wilson N. Estimating a rail passenger trip origin-destination matrix using automatic data collection systems. Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol. 22, 2007. pp.376-387.
14. Trépanier M., Tranchant N., Chapleau R. Individual trip destination estimation in a transit smart card automated fare collection system. Journal of Intelligent Transportation Systems, vol. 11, 2007. pp.1-14.
15. Devillaine F., Munizaga M.A., M. Trépanier, Detection activities of public transport users by analyzing smart card data. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 2276, 2012. pp.48-55.
16. Munizaga M., Palma C. Estimation of a disaggregate multimodal public transport OD matrix from passive smartcard data from Santiago, Chile. Transportation Research Part C, Vol. 24, 2012. pp.9-18.
17. Bagchi M., White P. What role for smart-card data from bus systems?. Munic. Eng., vol. 157, 2004. pp.39-46.
18. Nassir N. Khani A., Lee S.G., Noh H., Hickman M. Transit stop-level origin-destination estimation through use of transit schedule and automated data collection system. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 2263, 2011. pp.140-150.
19. Cui A. Bus passenger origin-destination matrix estimation using automated data collection systems master's dissertation. Massachusetts Institute of Technology, 2006.
20. Wang W., John P., Nigel H.M., Bus passenger origin-destination estimation and travel behavior using automated data collection systems in London. Journal of Public Transportation, Vol. 14, No.4, 2011.
21. Alsger A. Mesbah M., Ferreira L., Safi H. Use of smart card fare data to estimate public transport origin-destination matrix. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 2535, 2015. pp.88-96.
22. Barry J.J., Freimer R., Slavin H.L. Use of entry-only automatic fare collection data to estimate linked transit trips in New York City. Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board, vol. 2112, 2009. pp.53-61.
23. Mahrsi K.E. Côme E., Oukhellou L., Verleysen M. Clustering smart card data for urban mobility analysis. IEEE Transactions on intelligent transportation systems, vol. 18, NO. 3, March 2017.
24. Jinhua Zhao J, Rahbee A. Estimating a Rail Passenger Trip Origin-Destination Matrix Using Automatic Data Collection Systems. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 22 (2007). pp 376-387.
25. Nunes, A.A., Dias, T.G., Cunha, J.F., 2016. Passenger journey destination estimation from automated fare collection system data using spatial validation. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 17. pp 133-142. DOI:10.1109/TITS.2015.2464335.
26. Joana Horaa, Teresa Galvão Diasa, Ana Camanhóa, Thiago Sobral. Estimation of Origin-Destination matrices under Automatic Fare Collection: the case study of Porto transportation system. Transportation Research Procedia 27 (2017). pp. 664-671.
27. Munizaga M. Devillaine F., Navarrete C., Silva D. Validating travel behavior estimated from smartcard data. Transportation Research Part C Emerging Technologies. July 2014. pp. 1-18.

REFERENCES

1. Shtockaja A.A. Mihajlov A.Ju. Ocenka transportnoj podvizhnosti naselenija na osnove dezagregirovannyh mo-delej [Assessment of transport mobility of the population based on disaggregated models] *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. 2017; 2.(5): 199-207. (In Russian)
2. Semjonov V.V., Ermakov A.V. Istoricheskij analiz modelirovanija transportnyh processov i transportnoj infrastruktury [Historical analysis of modeling transport processes and transport infrastructure] *Preprinty IPM im. M.V.Keldysha*. 2015; 3(36). URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-3>. (In Russian)
3. Ortuzar J. D., Willumsen L. G. Modelling transport. *John Wiley & Sons*, 2011.
4. Lee D. Requiem for large-scale models. *Journal of the American Institute of Planners*, Vol 39, No 3, May, 1973.
5. Atkins S. Transportation planning models: What the papers say. *Traffic Engineering and Control*, Vol 27, No 9, September, 1986.
6. Fadeev A.I. Alhousseini S, Belova E.N. Monitoring Public Transport Demand Using Data from Automated Fare Collection System. *Advances in Engineering Research*, volume 158: Proceedings of the International Conference "Aviamechanical engineering and transport". 2018; 5: 12.
7. Fadeev A, Alhousseini S. Using Automated Fare Collection System Data To Determine Transport Demand. *Advances in Engineering Research*, volume 188. International Conference on Aviamechanical Engineering and Transport (AviaENT 2019): 1-9.
8. Fadeev A, Alhousseini S. Determining The Public Transport Demand by Validation Data Of the Electronic Tickets. *MIST: Aerospace 2019 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 734 (2020) 012148* IOP Publishing.
9. Fadeev A.I, Alhousseini S. Passenger trips analysis determined by processing validation data of the electronic tickets in public transport. "IOP Conference Series: Materials Science and Engineering".
10. Zheng Y, Capra L, Wolfson O, and Yang H, Urban computing: Concepts, methodologies, and applications. *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.*, 2014; 3(5): 1-55.
11. Chen M. Shiwen Mao, Yin Zhang, Victor C.M. Leung. *Big Data. Related Technologies. Challenges, and Future Prospects*, Spinger, 2014: 100.
12. Barry J.J. Newhouser R., Rahbee A., Sayeda S. Origin and destination estimation in New York City with automated fare system data. *Transportation Research, Record* 1817, 2002:183-187.
13. Zhao J., Rahbee A., Wilson N. Estimating a rail passenger trip origin- destination matrix using automatic data collection systems. *Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 22, 2007: 376-387.
14. Trépanier M., Tranchant N., Chapleau R. Individual trip destination estimation in a transit smart card automated fare collection system. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2007; 7: 1-14.
15. Devillaine F., Munizaga M.A., M. Trépanier, Detection activities of public transport users by analyzing smart card data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2012; 2276: 48-55.
16. Munizaga M., Palma C. Estimation of a disaggregate multimodal public transport OD matrix from passive smartcard data from Santiago, Chile. *Transportation Research Part C*. 2012; 24: 9-18.
17. Bagchi M., White P. What role for smart-card data from bus systems?. *Munic. Eng.* 2004; 157: 39-46.
18. Nassir N. Khani A., Lee S.G., Noh H., Hickman M. Transit stop-level origin–destination estimation through use of transit schedule and automated data collection system. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2011; 2263: 140-150.
19. Cui A. Bus passenger origin–destination matrix estimation using automated data collection systems master's dissertation. *Massachusetts Institute of Technology*, 2006.
20. Wang W., John P., Nigel H.M., Bus passenger origin–destination estimation and travel behavior using automated data collection systems in London. *Journal of Public Transportation*. 2011; 14(4).
21. Alsger A. Mesbah M., Ferreira L., Safi H. Use of smart card fare data to estimate public transport origin–destination matrix. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2015; 2535: 88-96.
22. Barry J.J., Freimer R., Slavin H.L. Use of entry-only automatic fare collection data to estimate linked transit trips in New York City. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*. 2009; 2112: 53-61.
23. Mahrsi K.E. Côme E., Oukhellou L., Verleysen M. Clustering smart card data for urban mobility analysis. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*. March 2017; 3(18).
24. Jinhua Zhao J, Rahbee A. Estimating a Rail Passenger Trip Origin-Destination Matrix Using Automatic Data Collection Systems. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 22 (2007): 376-387
25. Nunes, A.A., Dias, T.G., Cunha, J.F., 2016. Passenger journey destination estimation from automated fare collection system data using spatial validation. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 17: 133-142. DOI:10.1109/TITS.2015.2464335.
26. Joana Horaa, Teresa Galvão Diasa, Ana Camanhóa, Thiago Sobral. Estimation of Origin-Destination matrices under Automatic Fare Collection: the case study of Porto transportation system. *Transportation Research Procedia*. 2017; (27): 664-671.
27. Munizaga M. Devillaine F., Navarrete C., Silva D. Validating travel behavior estimated from smartcard data. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*. July 2014: 1-18.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Фадеев А.И. Разработка методики расчета транспортного спроса из валидаций электронных проездных билетов, разработка программного обеспечения, оценка репрезентативности выборочной совокупности поездок по генераль-

ному множеству пассажирских корреспонденций, анализ полученных данных.

Алхуссейни С. Анализ состояния вопроса, обзор литературных источников. Участие в подготовке исходных данных и расчетов.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Aleksandr I. Fadeev, the development of a methodology for calculating the throughput capacity of stop points in urban passenger transport, the development of an algorithm for simulating a stop point as QS, the analysis of the obtained calculations.

Sami Alhusseini, an analyzed status of the problem, literary sources review, participation in preparation and analysis input data for calculations.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фадеев Александр Иванович – канд. техн. наук, доц. кафедры транспорта Сибирского федерального университета, Scopus ID: 57208356151, (660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д. 26, e-mail: fai@ak1967.ru).

Алхуссейни Сами – аспирант кафедры транспорта Сибирского федерального университета «СФУ», ORCID: orcid.org/0000-0003-3028-0675, Scopus ID: 57212171306, Web of Science ID: AAC-6792-2020, (660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д. 26, e-mail: eng.sami20143@gmail.com).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr I. Fadeev – Cand. of Sci., Associate Professor of the Transport department at Siberian Federal University, Scopus ID: 57208356151, (660074, Krasnoyarsk city, Akademika Kirenskogost., 26. E-mail: e-mail: fai@ak1967.ru).

Sami Alhusseini – Postgraduate student of the Transport department at Siberian Federal University, ORCID: 0000-0003-3028-0675, Scopus ID: 57212171306, Web of Science ID: AAC-6792-2020, (660074, Krasnoyarsk city, Akademika Kirenskogost., 26. E-mail: eng.sami20143@gmail.com).

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПИСАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА НА ДУБЛИРУЮЩИХ УЧАСТКАХ

С.А. Аземша, И.Н. Кравченя

Белорусский государственный университет транспорта,
г. Гомель, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из показателей качественной работы городского пассажирского транспорта является регулярность движения маршрутных транспортных средств, которая напрямую зависит от грамотно составленного расписания. Актуальной является задача оптимизации расписания движения городского пассажирского транспорта с учетом повышения качества обслуживания пассажиров. Цель данной работы – разработка методики выравнивания интервалов времени между следующими друг за другом транспортными средствами разных маршрутов на дублирующих участках и оценка эффективности ее применения.

Материалы и методы. Предложена методика оптимизации расписания, включающая в себя следующие этапы: анализ сети общественного транспорта, выделение дублирующих участков и определение их характеристик, расчет оптимальных временных интервалов между прибытиями маршрутных транспортных средств и выравнивание этих интервалов на дублирующих участках, анализ качества скорректированного расписания движения маршрутных транспортных средств и расчет эффекта. Реализована имитационная модель городского пассажирского транспорта в системе имитационного моделирования GPSS World, которая позволяет провести тестирование методики оптимизации расписания движения маршрутных транспортных средств.

Выводы. Методика корректировки расписания общественного транспорта позволяет увеличить равномерность движения следующих друг за другом транспортных средств разных маршрутов на дублирующих участках, скорректировать интервалы движения для каждого маршрута, сократить нагрузку на остановочные пункты, уменьшив время простоя и длину очередей из маршрутных транспортных средств к остановочным пунктам, а также сократить время ожидания маршрутного транспортного средства теми пассажирами, перевозка которых возможна транспортными средствами нескольких маршрутов.

Применение. Приведенная методика апробирована на существующей транспортной сети г. Гомеля.

Ценность. Полученные результаты оптимизации могут быть использованы перевозчиками и операторами перевозок для повышения качества предоставляемых услуг.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: городской пассажирский транспорт, методика оптимизации расписания, маршрутное транспортное средство, дублирующий участок, интервал движения.

Благодарности. Выражаем благодарность руководителям транспортных предприятий, осуществляющих перевозки пассажиров в г. Гомеле, а также рецензентам данной статьи.

Поступила 10.12.20, принята к публикации 26.02.21.

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: Аземша С.А., Кравченя И.Н. Оценка эффективности оптимизации расписания движения городского пассажирского транспорта на дублирующих участках / С.А. Аземша, И.Н. Кравченя. – DOI <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-72-85> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 1(77). – С. 72–85.

© Аземша С.А., Кравченя И.Н., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-72-85>

EFFICIENCY ASSESSMENT OF OPTIMIZING THE SCHEDULE OF URBAN PASSENGER TRANSPORT ON DUPLICATE SECTIONS

Sergei A. Azemsha, Irina N. Kravchenia
Belarusian State University of Transport
Gomel, the Republic of Belarus

ANNOTATION

Introduction. One of the quality indicators of urban passenger transport services is regularity of route vehicles, which directly depends on a well-designed schedule. An urgent task is to optimize urban passenger transport schedule in response to the improvement in passenger service quality. The purpose of this work is to develop alignment technique of time intervals between consecutive vehicles of different routes on duplicate sections and efficiency assessment of its application.

Materials and methods. Optimization technique includes some steps: analysis of public transport network, determining a lot of duplicate sections and their characteristics, calculation the optimal time intervals among arrivals of route vehicles and alignment this intervals among consecutive route vehicles on duplicate sections, analysis of the quality of adjusted schedule of route vehicles and calculating the effect. The simulation model of urban passenger transport within simulation modelling system GPSS World is realized. It allows testing optimization technique of route vehicle scheduling.

Conclusions. Adjusting technique of urban passenger transport schedule allows to increase movement steadiness of consecutive vehicles of different routes on duplicate sections, adjust traffic intervals for each route, shorten the traffic load on stations, reducing idle time and queue lengths of route vehicles in front of transport stops and also minimize waiting time for route vehicle by those passengers, who can be transported along several routes.

Application. The described technique was tasted in the existing transport network of Gomel.

Value. The obtained optimization results can be used by carriers and transport operators to improve the quality of services provided.

KEYWORDS: urban passenger transport, scheduling technique, route vehicles, duplicate sections, traffic interval.

Submitted 10.12.20, revised 26.02.21.

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: Azemsha S.A., Kravchenia I.N. Efficiency assessment of optimizing the schedule of urban passenger transport on duplicate sections. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (1):72-84. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-72-85>

©Azemsha S.A., Kravchenia I.N., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Современный городской пассажирский транспорт, от качественной и стабильной работы которого зависят многие аспекты городской жизнедеятельности, является важнейшей системой, обеспечивающей экономическое развитие городов, формирование комфортных условий проживания населения. Доступность и качество работы городского пассажирского транспорта во многом определяют реальный уровень жизни населения, социальный климат, а снижение его привлекательности приводит к использованию пассажирами личных автомобилей, что оказывает негативное влияние на экологическую обстановку городов [1].

При составлении расписания городского пассажирского транспорта необходимо учитывать, чтобы расписание было максимально рациональным и обеспечивало качественное обслуживание населения (т. е. создавало пассажирам лучшие условия пользования маршрутными транспортными средствами и проезд с минимальной затратой времени), движение маршрутных транспортных средств в соответствии с пассажиропотоками на маршрутах, регулярность движения, координацию движения маршрутных транспортных средств с движением других видов пассажирского транспорта.

Вопросы оптимизации расписания городского пассажирского транспорта отражены во многих научных трудах [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22]. В соответствии с различными особенностями разработанные подходы можно разделить на следующие группы: интерактивная графическая визуализация и оптимизация, методы математического программирования, эвристический и метаэвристический подходы. Методы интерактивной графической оптимизации были предложены несколькими исследователями. В работах [2, 3] дана методология корректировки расписания общественного транспорта в режиме реального времени, основанная на пространственно-временных графических методах с использованием многокритериального анализа для сокращения времени в пути и уменьшения активного потребления энергии. Новый инструмент визуализации BusVis для планирования поездок на общественном

транспорте, объединяющий методы компоновки графиков и позволяющий визуально сравнивать время в пути и направления движения, описан в работе [4].

Второй подход, широко встречающийся в литературе, использует методы математического программирования. В работе [5] авторы разработали двухцелевую модель целочисленного программирования, учитывающую интересы операторов общественного транспорта при оптимизации и синхронизации расписания, а также распределение спроса пользователей. В работе [6] предложена математическая модель для реализации перевозочного процесса различных видов пассажирского транспорта в точке их притяжения. В качестве основного условия функционирования рассматривается соблюдение условия ритмичности подвижного состава на остановочно-пересадочных пунктах. В работе [7] сформулирована двухуровневая модель математического программирования, в которой проектирование расписания и выбор маршрутов одновременно определяются с помощью двух стратегий: адаптивных и неадаптивных маршрутов. В работе [8] для планирования общественного транспорта предложены подходы смешанного целочисленного линейного программирования.

В третьей группе используются эвристические и метаэвристические подходы: генетический алгоритм, имитационный отжиг, оптимизация муравьиной колонии. В работе [9] для интегрированного планирования расписания разработана многопродуктовая потоковая модель, а также предложен метаэвристический подход к решению этой задачи. В работе [10] представлен генетически обоснованный алгоритм синхронизации линий общественного транспорта в пересадочном узле. Описанный подход основан на моделировании спроса на изменение линий общественного транспорта с помощью генетического алгоритма. Для формирования расписания городского пассажирского транспорта, обеспечивающего максимальную удовлетворенность пассажиров и пассажироперевозчиков одновременно, в работах¹ [11, 12] авторы предложили использование муравьиного алгоритма.

¹ Горохова Е. С., Кочегурова Е. А. Формирование расписания пассажирского транспорта с помощью муравьиного алгоритма // Молодежь и современные информационные технологии : сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 9–13 ноября 2015, Томск : ТПУ, 2016. Т. 1. С. 122–123.

Для повышения качества обслуживания пассажиров ряд авторов^{2, 3} [19, 20, 21, 22] при разработке расписания городского пассажирского транспорта предлагают учитывать совместные участки движения транспортных средств разных маршрутов. Если на отдельном участке транспортной сети работает несколько маршрутов, то для исключения образования очередей на остановочных пунктах необходимо согласовывать графики движения транспортных средств различных маршрутов по совместным (дублирующим) участкам их движения путем корректировки времени начала движения по каждому из них. Таким образом, дублирующий участок – совместимый участок движения транспортных средств различных маршрутов. Наличие дублирующих участков маршрутов может сопровождаться образованием очередей транспорта на остановочных пунктах, а также неравномерностью интервалов движения и наполняемости транспортных средств, что приводит к увеличению времени ожидания пассажирами транспорта и негативно отражается на комфортности поездки. Законодательство Республики Беларусь в сфере транспортной деятельности⁴ (ст. 21) указывает на то, что расписание движения транспортных средств по маршруту должно быть соотнесено с расписанием движения транспортных средств на дублирующих маршрутах, а также с расписанием движения пассажирских транспортных средств других видов транспорта. В тоже время никаких методических рекомендаций, проясняющих механизмы такого соотнесения, нет. Таким образом, задача повышения качества обслуживания пассажиров и эффективности работы городского пассажирского транспорта за счет выравнивания расписания разных маршрутов на дублирующих участках является актуальной.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предлагаемая методика оптимизации расписания городского общественного транспорта путем выравнивания интервалов вре-

мени между следующими друг за другом маршрутными транспортными средствами разных маршрутов на дублирующих участках включает следующие этапы.

На первом этапе проводится анализ городской сети и определяются: множество маршрутов общественного транспорта $M=\{M_1, M_2, \dots, M_{Nm}\}$; множество остановочных пунктов $S=\{S_1, S_2, \dots, S_{Ns}\}$; частота движения маршрутных транспортных средств разных маршрутов $N_M=\{N_{M1}, N_{M2}, \dots, N_{Mm}\}$; множество временных интервалов прибытия/отправления маршрутных транспортных средств различных маршрутов на каждый остановочный пункт (в соответствии с существующим расписанием) $ST=\{ST_1, ST_2, \dots, ST_{Nst}\}$.

Для множества маршрутов определяются: множество дублирующих участков $D=\{D_1, D_2, \dots, D_{Nd}\}$, протяженность дублирующих участков $LD=\{LD_1, LD_2, \dots, LD_{Nd}\}$, частота движения маршрутных транспортных средств разных маршрутов на дублирующих участках $N_D=\{N_{D1}, N_{D2}, \dots, N_{Dd}\}$, множество временных интервалов прибытия / отправления маршрутных транспортных средств различных маршрутов на каждый остановочный пункт дублирующего участка $SDT=\{SDT_1, SDT_2, \dots, SDT_{Nsd}\}$; коэффициенты социальной значимости дублирующих участков $KD=\{KD_1, KD_2, \dots, KD_{Nd}\}$ в зависимости от протяженности участка, на котором дублируются маршруты, количества маршрутов на дублирующих участках, социальной значимости обслуживаемого района: железнодорожные и автовокзалы, объекты притяжения, крупные предприятия, учебные учреждения и пр.

Определяется множество плановых периодов T оптимизации расписания, например каждый час; час пик; межпиковые периоды. Таким образом, каждый остановочный пункт S_j в плановый период T будет характеризоваться вектором $(S_j, M_j, N_{Mij}, ST_{ijk})$. Каждый дублирующий участок D_j в плановый период T будет характеризоваться вектором $(D_j, KD_j, LD_j, N_{Dij}, SDT_{ij})$.

² Усов С. П. Повышение эффективности работы городского транспорта путем корректирования расписаний дублирующих маршрутов / Обрезкова В.Е., Липенкова О.А., Липенков А.В. // Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. 15 марта 2016, Пенза: ПГУАС. 2016. С. 382-390.

³ Лебідь І. Методика оптимізації розкладу руху міського громадського транспорту на різних маршрутах за ділянками, що дублюються // Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019: матеріали І Міжнар. наук.-техн. конф. 13 – 15 травня 2019 р. Вінниця: ВНТУ. 2019. С. 176-177.

⁴ Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 22 ноября 2014 г. № 1088 «Об утверждении правил перевозок пассажиров городским электрическим транспортом и правил перевозок пассажиров метрополитеном».

Второй этап заключается в выборе дублирующего участка для оптимизации расписания и определении его характеристик. Дублирующие участки $D=\{D_1, D_2, \dots, D_{Nd}\}$ ранжируются в порядке убывания (невозрастания) количества остановочных пунктов и маршрутов на дублирующем участке. Для оптимизации выбирается наиболее значимый дублирующий участок D_r с множеством маршрутов $MD=\{MD_1, MD_2, \dots, MD_{Nmd}\}$. Маршруты выбранного дублирующего участка D_r ранжируются в порядке возрастания (неубывания) количества маршрутных транспортных средств.

Для выбранных маршрутов назначается базовый остановочный пункт SB_r . При выборе базового остановочного пункта следует принимать во внимание протяженность участка, на котором дублируются маршруты, частоту движения маршрутных транспортных средств разных маршрутов на таких участках, социальную значимость обслуживаемого района.

Оптимальный интервал времени между прибытиями на базовый остановочный пункт маршрутных транспортных средств всех маршрутов I_{MDk}^* и маршрутов r -го дублирующего участка I_{Dr} определяется по формулам:

$$I_{MDk}^* = \frac{T}{N_{Mk}}, \quad (1)$$

$$I_{Dr}^* = \frac{T}{\sum_{i=1}^n N_{Dri}}, \quad (2)$$

где T – период времени планирования, N_{Mk} – количество рейсов, выполняемых на k -м маршруте в период планирования T , N_{Dri} – количество рейсов, выполняемых на маршрутах r -го дублирующего участка; n – число маршрутов r -го дублирующего участка.

На третьем этапе для базового остановочного пункта SB_r по дублирующему участку D_r для исходного расписания в период планирования T формируется двумерная булева матрица назначений, в которой отражается назначение j -го маршрута на i -й временной интервал (таблица 1): $x_{ij} = 1$, если на i -й временной интервал назначен j -й маршрут, $x_{ij} = 0$ в противном случае, $x_{ij} = 1^*$ – обязательное назначение, которое определяет фиксированное время прибытия маршрутного транспортного средства на базовый остановочный пункт.

Для исходного расписания в период планирования T определяются характеристики матрицы назначений дублирующего участка D_r (см. таблицу 1):

– коэффициент загрузки остановочного пункта маршрутными транспортными средствами дублирующего участка, равный количеству транспортных средств, прибывающих на остановочный пункт:

$$K_{Di} = \sum_{j=1}^k x_{ij}, \quad (3)$$

– $|I_D^* - I_i|$ – величина отклонения интервалов между следующими друг за другом маршрутными транспортными средствами от оптимальной величины дублирующего участка,

Таблица 1 – Матрица назначений дублирующего участка D_r

Table 1 – Assignment matrix for the duplicate section D_r

Время	MD_1	MD_2	...	MD_k	K_D	$ I_D^* - I_i $	T_w	$ I_{MD1}^* - I_i $	...	$ I_{MDk}^* - I_i $
t_1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1k}	K_{D1}	$ I_D^* - I_1 $	T_{w1}	$ I_{MD1}^* - I_1 $	...	$ I_{MDk}^* - I_1 $
t_2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2k}	K_{D2}	$ I_D^* - I_2 $	T_{w2}	$ I_{MD2}^* - I_2 $	...	$ I_{MDk}^* - I_2 $
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
t_i	x_{i1}	x_{i2}	...	x_{ik}	K_{Di}	$ I_D^* - I_i $	T_{wi}	$ I_{MD1}^* - I_i $	...	$ I_{MDk}^* - I_i $
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
t_n	x_{n1}	x_{n2}	...	x_{nk}	K_{Dn}	$ I_D^* - I_n $	T_{wn}	$ I_{MD1}^* - I_n $	...	$ I_{MDk}^* - I_n $
Сумма	$\sum_{i=1}^n x_{i1}$	$\sum_{i=1}^n x_{i2}$	...	$\sum_{i=1}^n x_{ik}$	$\sum_{i=1}^n K_{Di}$	$\sum_{i=1}^n I_D^* - I_i $	$\sum_{i=1}^n T_{wi}$	$\sum_{i=1}^n I_{MD1}^* - I_i $	...	$\sum_{i=1}^n I_{MDk}^* - I_i $

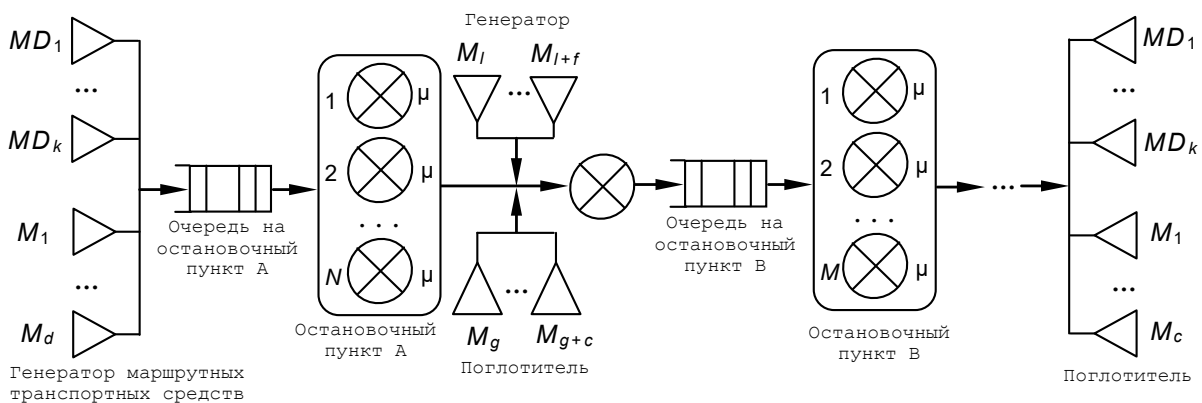


Рисунок – Концептуальная модель дублирующего участка

Figure – Conceptual model of a duplicate section

– $|I_{MDk}^* - I_i|$ – величина отклонения интервалов между следующими друг за другом маршрутными транспортными средствами от оптимальной величины k -го маршрута,

– $T_{wi} = I_i \lambda_i$ – время ожидания пассажирами транспортных средств, где λ_i – интенсивность прихода пассажиров, использующих транспортные средства дублирующего участка.

На четвертом этапе для исходного расписания в плановый период T определяется значение целевой функции $D_r^0(I)$ для дублирующего участка D_r :

$$D_r^0(I) = \sum_{i=1}^{N_D} |I_{Dr}^* - I_i^0| + \sum_{i=1}^{N_{M1}} |I_{MD1}^* - I_i^0| + \dots + \sum_{i=1}^{N_{Mk}} |I_{MDk}^* - I_i^0| \rightarrow \min. \quad (4)$$

Значение целевой функции $D_r^0(I)$ определяется как минимизация средней величины отклонения интервалов между следующими друг за другом маршрутными транспортными средствами от оптимальной величины для планового периода T .

Пятый этап заключается в выравнивании интервалов времени между следующими друг за другом маршрутными транспортными средствами на дублирующем участке. Для рассматриваемого дублирующего участка D_r выбирается маршрут MD_i с минимальным количеством транспортных средств. Для выбранного маршрута MD_i в базовом остановочном пункте SB_r производится выравнивание расписания движения маршрутных транспортных средств путем корректировки времени прибытия t_i . При

этом должны учитываться следующие ограничения: расписание выравненных маршрутов MD_{i-1} на дублирующем участке; оптимальный интервал времени I_{MDi}^* между прибытиями на остановочный пункт транспортных средств маршрута MD_i ; обязательные назначения для маршрута MD_i ; коэффициент загрузки остановочного пункта K_{Di} , величина которого для дублирующего участка должна быть равна 1; возможность отправки транспортного средства с конечного пункта для выравненных маршрутов (сравнение времени прибытия и отправления транспортного средства с конечного остановочного пункта; проверка соблюдения режима труда и отдыха водителей).

Шестой этап состоит в определении характеристик матрицы назначений (см. таблицу 1) и значения целевой функции $D_r^*(I)$ дублирующего участка D_r для планового периода T после оптимизации:

$$D_r^*(I) = \sum_{i=1}^{N_D} |I_{Dr}^* - I_i| + \sum_{i=1}^{N_{M1}} |I_{MD1}^* - I_i| + \dots + \sum_{i=1}^{N_{Mk}} |I_{MDk}^* - I_i| \rightarrow \min. \quad (5)$$

Исходя из минимальной величины $D_r^*(I)$ и ограничений, производится перебор матриц назначений и выбирается оптимальное расписание прибытия маршрутных транспортных средств рассматриваемого дублирующего участка D_r на базовый остановочный пункт SB_r . Далее производится расчет времени движения через остальные остановочные пункты маршрута относительно базового пункта и переход к следующему дублирующему участку.

Таблица 2 – Параметры дублирующих участков

Table 2 – Parameters of duplicate sections

Дублирующие участки	Маршруты	Количество остановочных пунктов	Сумма кол-ва маршрутов и остановочных пунктов	Длина дублирующего участка (км)
D_1 – «Институт «Гомельпроект» – Улица Огоренко»	№ 17, 18, 34	13	$3 + 13 = 16$	7,5
D_2 – «Вокзал – Первая школа»	№ 35, 55, 58	12	$3 + 12 = 15$	8,47
D_3 – «Вокзал – Горэлектротранспорт»	№ 10, 19, 43	10	$3 + 10 = 13$	4,94
D_4 – «Вокзал – кинотеатр «Октябрь»	№ 20, 21, 40, 52	8	$4 + 8 = 12$	4,47
D_5 – «Медгородок – Технический университет им П.О. Сухого»	№ 16, 17, 26, 33	8	$4 + 8 = 12$	3,39
D_6 – «Вокзал – Дворец культуры «Гомсельмаш»	№ 6, 8, 8А, 9	7	$4 + 7 = 11$	3,93

Для апробации методики оптимизации расписания движения маршрутных транспортных средств по дублирующим участкам на следующем этапе разработана имитационная модель дублирующих участков. Математическая модель движения маршрутных транспортных средств всех видов по дублирующим участкам представлена в виде системы массового обслуживания и реализована в системе имитационного моделирования GPSS World⁵. Концептуальная модель дублирующего участка приведена на рисунке.

В результате проведения имитационного эксперимента на разработанной имитационной модели будут получены коэффициенты загрузки остановочных пунктов при движении маршрутных транспортных средств всех видов по дублирующим участкам и длины очередей на остановочных пунктах.

На последнем этапе производится оценка эффективности оптимизации расписания по времени ожидания пассажирами прибытия маршрутных транспортных средств и равномерности их движения на дублирующих участках, занятости остановочного пункта транспортными средствами, а также эффективность оптимизации расписания движения общественного транспорта на дублирующих участках в целом.

Из матриц назначений для каждого планового периода T по дублирующим участкам определяются:

– количество периодов времени, для которых на остановочный пункт прибывают два и

более транспортных средств дублирующего участка ($K_D \geq 2$);

– время ожидания пассажирами транспортных средств маршрутов дублирующего участка T_w ;

– величины отклонения интервалов между следующими друг за другом маршрутными транспортными средствами от оптимальной величины для дублирующих участков до оптимизации $D_r^0(I)$ и после оптимизации $D_r^*(I)$.

Эффективность оптимизации расписания движения общественного транспорта на дублирующих участках

$$F_r^* = D_r^0(I) - D_r^*(I). \quad (6)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Приведенная методика оптимизации расписания общественного транспорта на дублирующих участках апробирована на существующей транспортной сети г. Гомеля. Город Гомель, с населением около 530 000 чел., является административным центром и вторым по численности населения городом Беларуси. В настоящее время в г. Гомеле перевозка пассажиров осуществляется по 83 регулярным автобусным маршрутам. Было выявлено 6 протяженных дублирующих участков, на которых предусмотрено движение автобусов трех и более маршрутов (таблица 2).

⁵ GPSS World Reference Manual. Minuteman Software, 4 ed. Holly Springs. NC. U.S.A. 2001.

Дублирующие участки были ранжированы в порядке убывания суммы остановочных пунктов и количества маршрутов.

Первый дублирующий участок D_1 «Институт «Гомельпроект» – Улица Огоренко» является общим для маршрутов № 17, 18 и 34 на протяжении 13 остановочных пунктов, его длина 7,5 км. Данный совместный отрезок пути – один из важнейших в г. Гомеле, так как проходит через наиболее загруженные транспортным потоком улицы в Центральном районе города (Советская и Интернациональная), в их пределах на остановочных пунктах формируется большое количество ожидающих пассажиров, также часто возникают задержки общественного транспорта по причине вынужденной остановки для ожидания возможности подъезда к остановочному пункту из-за одновременного прихода нескольких маршрутных транспортных средств различных маршрутов. В качестве примера рассмотрим оптимизацию расписания движения на дублирующем участке D_1 «Институт «Гомельпроект» – Улица Огоренко» в час пик для промежутка времени с 7 до 8 ч. Рассчитаем основные характеристики для промежутка времени с 7 до 8 ч по остановочному пункту «Институт «Гомельпроект»»:

– оптимальный интервал времени между прибытиями на остановочный пункт маршрутных транспортных средств дублирующего участка

$$I_{D1}^* = \frac{60}{8+4+6} = 3,33 \text{ мин};$$

– оптимальный интервал времени между прибытиями на остановочный пункт транспортных средств маршрутов № 17, 18 и 34:

$$I_{17}^* = 7,5 \text{ мин}; I_{18}^* = 15 \text{ мин}; I_{34}^* = 10 \text{ мин}.$$

По рассчитанному оптимальному интервалу времени между прибытиями на остановочный пункт маршрутных транспортных средств первого дублирующего участка, который равен 3,33 мин, сдвигаем время прибытия автобусов № 17, 18 и 34 таким образом, чтобы разница между их оптимальным и реальным значением была минимальной.

Матрицы назначений для первого дублирующего участка «Институт «Гомельпроект» – Улица Огоренко» в пиковый период времени с 7 до 8 ч представлены в таблицах 3, 4.

Таблица 3 – Матрица назначений для дублирующего участка D_1 при существующем расписании

Table 3 – Assignment matrix for D_1 duplicate section under the existing schedule

Время прибытия	Дублирующий участок D_1 «Институт «Гомельпроект» – Улица Огоренко»								
	№17	№18	№34	K_{D1}	$ I_{D1}^* - I_i $	T_w	$ I_{17}^* - I_i $	$ I_{18}^* - I_i $	$ I_{34}^* - I_i $
7:00	0	0	1	1	–	–			1
7:04	1	0	0	1	0,67	50	0		
7:09	0	1	0	1	1,67	75		2	
7:11	1	0	0	1	1,33	15	0		
7:12	0	0	1	1	2,33	5			2
7:18	1	0	0	1	2,67	105	0		
7:22	0	1	0	1	0,67	50		2	
7:24	0	0	1	1	1,33	15			2
7:25	1	0	0	1	2,33	5	0		
7:35	1	0	0	1	6,67	275	3		
7:36	0	1	1	2	2,33	5		1	2
7:42	1	0	0	1	2,67	105	0		
7:47	0	0	1	1	1,67	75			1
7:49	1	1	0	2	1,33	15	0	2	
7:56	1	0	0	1	3,67	140	0		
7:59	0	0	1	1	0,33	30			2
Сумма	8	4	6	18	31,67	965	3	7	10

Таблица 4 – Матрица назначений для дублирующего участка D_1 при оптимизированном расписании

Table 4 – Assignment matrix for D_1 duplicate section under the optimized schedule

Время прибытия	Дублирующий участок D_1 «Институт «Гомельпроект» – Улица Огоренко»								
	№17	№18	№34	K_{D1}	$ I_{D1}^* - I_i $	T_w	$ I_{17}^* - I_i $	$ I_{18}^* - I_i $	$ I_{34}^* - I_i $
7:00	0	0	1	1	–	–			1
7:03	1	0	0	1	0,33	30	0		
7:07	0	1	0	1	0,67	50		2	
7:10	1	0	0	1	0,33	30	0		
7:13	0	0	1	1	0,33	30			3
7:17	1	0	0	1	0,67	50	0		
7:20	0	1	0	1	0,33	30		2	
7:23	0	0	1	1	0,33	30			0
7:25	1	0	0	1	1,33	15	1		
7:31	1	0	0	1	2,67	105	1		
7:33	0	0	1	1	1,33	15			0
7:36	0	1	0	1	0,33	30		1	
7:39	1	0	0	1	0,33	30	1		
7:43	0	0	1	1	0,67	50			0
7:46	1	0	0	1	0,33	30	0		
7:49	0	1	0	1	0,33	30		2	
7:53	1	0	0	1	0,67	50	0		
7:56	0	0	1	1	0,33	30			3
Сумма	8	4	6	18	11,31	635	3	7	7

В результате оптимизации расписания для пикового периода времени с 7 до 8 ч на первом дублирующем участке суммарная величина отклонения интервалов между следующими друг за другом автобусами от оптимальной величины снизилась с 32 до 11 мин. Суммарное время ожидания пассажирами транспортных средств сократилось на 30%.

Для оценки занятости остановочного пункта «Институт «Гомельпроект»» маршрутными транспортными средствами используются два критерия:

– коэффициент загрузки остановочного пункта транспортными средствами дублирующих участков K_{D1} , рассчитанный по формуле (3),

– общий коэффициент загрузки остановочного пункта K_o , равный сумме коэффициентов загрузки остановочного пункта всеми видами транспортных средств :

$$K_o = K_A + K_T = (K_{D1} + K_{D2} + K_{D4} + K_{ND}) + K_T,$$

где K_A – коэффициент загрузки остановочного

пункта автобусами дублирующих участков K_{D1} и автобусами, не включенными в дублирующие участки K_{ND} ,

K_T – коэффициент загрузки остановочного пункта троллейбусами.

В таблице 5 приведены результаты загрузки остановочного пункта «Институт «Гомельпроект»» маршрутными транспортными средствами до и после оптимизации для пикового периода времени с 7 до 8 ч.

Помимо коэффициентов загрузки рассчитывается длина очереди L_q из транспортных средств на остановочном пункте. Для расчета данного показателя длина автобуса принята равной 18 м, троллейбуса – 12,3 м. В таблицу 5 внесены только те периоды времени, когда на остановочном пункте «Институт «Гомельпроект»», длина которого составляет 40 м, наблюдается очередь, то есть одновременно находится более двух автобусов, трёх троллейбусов или одного автобуса и одного троллейбуса. В таблице 5 длина очереди приведена в двух единицах измерения – в метрах и в количестве транспортных средств.

Таблица 5 – Загрузка остановочного пункта «Институт «Гомельпроект»»

Table 5 – Gomelproyekt Institute transport stop load factor

Время	До оптимизации									После оптимизации								
	K_{D1}	K_{D2}	K_{D4}	K_{ND}	K_A	K_T	K_O	L_Q		K_{D1}	K_{D2}	K_{D4}	K_{ND}	K_A	K_T	K_O	L_Q	
								М	ТС								М	ТС
7:00	1	1	0	0	2	1	3	48	1	1	0	0	0	1	1	2	0	0
7:09	1	0	0	1	2	0	2	36	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0
7:12	1	0	0	0	1	2	3	43	1	0	0	0	0	0	2	2	0	0
7:18	1	0	0	2	3	2	5	79	3	0	0	0	0	0	2	2	0	0
7:23	0	1	1	0	2	0	2	36	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
7:31	0	0	0	2	2	0	2	36	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
7:35	1	0	0	0	1	2	3	42	1	0	0	0	0	0	2	2	0	0
7:36	2	0	1	1	4	0	4	72	3	1	0	0	0	1	0	1	0	0
7:42	1	0	0	1	2	0	2	36	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0
7:43	0	0	1	1	2	1	3	48	1	1	0	0	0	1	1	2	0	0
7:46	0	0	0	0	0	2	2	0	0	1	0	0	0	1	2	3	43	1
7:49	2	0	0	0	2	0	2	36	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
7:56	1	0	1	0	2	0	2	36	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
Сумма	11	2	4	8	25	10	33	548	16	8	0	0	2	10	10	20	43	1

После оптимизации, при условии прибытия автобусов и троллейбусов по расписанию, очередь из одного транспортного средства будет наблюдаться только в 7:46, когда одновременно прибывает автобус №17 и два троллейбуса.

Проведена оптимизация расписания движения автобусов на шести дублирующих

участках в час пик для промежутка времени с 7 до 8 ч и для межпикового периода времени с 11 до 12 ч. Оценка эффективности скорректированного расписания по шести дублирующим участкам представлена в таблицах 6, 7.

Таблица 6 – Результаты оптимизации расписания для пикового периода времени

Table 6 – Optimization result of the schedule for the rush hours

ДУ	До оптимизации				После оптимизации				$F_r^*(I)$
	$K_d \geq 2$	$ I_D^* - I_i $	$ I_{MD}^* - I_i $	$D_r^0(I)$	$K_d \geq 2$	$ I_D^* - I_i $	$ I_{MD}^* - I_i $	$D_r^*(I)$	
D_1	2	32	20	52	0	11	17	28	24
D_2	1	24	34	58	0	9	28	37	21
D_3	0	34	38	72	0	9	33	42	30
D_4	1	39	32	71	0	4	29	33	38
D_5	2	31	44	75	0	13	45	58	17
D_6	1	15	27	42	0	2	23	25	17
Сумма	7	175	195	370	0	48	175	223	147

Таблица 7 – Результаты оптимизации расписания для межпикового периода времени

Table 7 – Optimization result of the schedule for the period between rush hours

ДУ	До оптимизации				После оптимизации				$F_r^*(I)$
	$K_d \geq 2$	$ I_D^* - I_i $	$ I_{MD}^* - I_i $	$D_r^0(I)$	$K_d \geq 2$	$ I_D^* - I_i $	$ I_{MD}^* - I_i $	$D_r^*(I)$	
D_1	1	33	35	68	0	15	32	47	21
D_2	0	24	34	58	0	6	18	24	34
D_3	1	35	23	58	0	3	20	23	35
D_4	1	26	32	58	0	9	17	26	32
D_5	1	28	34	62	0	9	25	34	28
D_6	1	20	31	51	0	5	28	33	18
Сумма	5	166	189	355	0	47	140	187	168

Величина эффективности оптимизации расписания движения автобусов по шести дублирующим участкам равна 168 мин – для межпикового периода времени, 147 мин – для пикового периода времени.

Количество периодов времени, для которых на остановочный пункт прибывают два и более автобусов ($K_d \geq 2$) дублирующих участков, до оптимизации составляло 7 (для пикового периода) и 5 (для межпикового периода). В результате оптимизации коэффициент загрузки остановочного пункта автобусами дублирующих участков сокращен до $K_d = 1$.

Таким образом, по результатам проведенной оптимизации:

- Скорректированы интервалы движения для каждого маршрута в отдельности по дублирующим участкам. Величина отклонения интервалов между следующими друг за другом автобусами от оптимальной величины уменьшилась в среднем на 26% для межпикового периода времени и на 10% – для пикового.

- Сокращены коэффициенты загрузки остановочных пунктов автобусами дублирующих участков.

- Увеличена равномерность движения следующих друг за другом автобусов разных маршрутов на дублирующих участках. Величина отклонения интервалов между следующими друг за другом маршрутными транспортными средствами от оптимальной величины уменьшилась в среднем на 40% для межпикового периода времени и на 36 % – для пикового.

- В итоге суммарная величина отклонения интервалов между следующими друг за другом автобусами от оптимальной величины по шести дублирующим участкам уменьшилась в среднем на 47% для межпикового периода времени и на 40% – для пикового.

- Сократилось время ожидания маршрутных транспортных средств теми пассажирами, перевозка которых возможна несколькими вариантами маршрутов. При этом время ожидания пассажирами транспортных средств сократилось на 27% для межпикового периода времени, и на 28% – для пикового.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При оптимизации существующего расписания пассажирского транспорта особое внимание уделялось улучшению таких показателей, как время ожидания пассажирами прибытия транспортных средств на остановочный пункт и коэффициент загрузки транспортом остановочного пункта.

Первый параметр влияет на уровень удовлетворенности от поездки пассажиров. Выравнивание интервалов времени между прибытиями следующих друг за другом транспортных средств разных маршрутов на дублирующих участках способствует равномерному наполнению транспортных средств, в результате чего увеличивается уровень комфорта для пассажиров.

Уменьшение же коэффициента загрузки транспортом остановочного пункта позволяет исключить образование очередей из маршрутных транспортных средств при посадке/высад-

ке пассажиров. В результате этого снижаются задержки транспорта, также по причине отсутствия вынужденных простоев маршрутных транспортных средств перед остановочным пунктом (для ожидания возможности подъезда к нему) и последующих разгонов, уменьшаются экономические (дополнительные расходы топлива) и экологические (от выбросов загрязняющих веществ в атмосферу) потери.

Предложенная методика оптимизации расписания общественного транспорта позволяет:

- скорректировать интервалы движения для каждого маршрута;
- увеличить равномерность движения следующих друг за другом транспортных средств разных маршрутов на дублирующих участках;
- уменьшить нагрузку на остановочные пункты;
- сократить время ожидания маршрутного транспортного средства теми пассажирами, перевозка которых возможна несколькими вариантами маршрутов;
- увеличить равномерность наполняемости маршрутных транспортных средств;
- скоординировать движение маршрутных транспортных средств с движением других видов пассажирского транспорта;
- сократить время простоя и длины очередей из маршрутных транспортных средств на подъездах к остановочным пунктам для посадки и высадки пассажиров, что позволит уменьшить расход топлива и выбросы загрязняющих веществ в атмосферу.

Проведенные экспериментальные исследования показали возможность применения разработанной методики на практике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Azemsha S.A. Parameters of automobilization in the Republic of Belarus and their impact on greenhouse gas emissions // *Ecologica*. Beograd. 2019. Vol. 94: 217-223.
2. Cao Zh., Ceder A., Zhang S. Real-time schedule adjustments for autonomous public transport vehicles // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2019. Vol. 109: 60-78. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.10.004>.
3. Cao Zh., Ceder A. Autonomous shuttle bus service timetabling and vehicle scheduling using skip-stop tactic // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019. Vol. 102: 370-395. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.03.018>.
4. Krause J., Spicker M., Wörteler L., Schäfer M., Zhang L. Interactive Visualization for Real-time Public Transport Journey Planning // *Sigrad*. 2012: 95-98.
5. Liu T., Ceder A. Integrated public transport timetable synchronization and vehicle scheduling with demand assignment: A bi-objective bi-level model using deficit function approach // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2018. Vol. 117: 935-955. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.08.024>
6. Арсланов М.А., Минатуллаев Ш.М., Филиппов А.А. Математическая модель организации перевозок пассажиров в остановочно-пересадочных пунктах при многократном изменении пассажиропотоков // *Вестник СибАДИ*. 2018. № 15 (3). С. 362–371. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-3-362-371>
7. Wu W., Liu R., Jin W., Ma Ch. Stochastic bus schedule coordination considering demand assignment and rerouting of passengers // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019. Vol. 121: 275-303. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.01.010>
8. Yin J., Yang L., Tang T., Gao Z., Ran B. Dynamic passenger demand oriented metro train scheduling with energy-efficiency and waiting time minimization: Mixed-integer linear programming approaches // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017. Vol. 97: 182-213. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.01.001>.
9. Carosi S., Frangioni A., Galli L., Girardi L., Vallese G. A matheuristic for integrated timetabling and vehicle scheduling // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019. Vol. 127: 99-124. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.07.004>
10. Naumov V. Genetic-based algorithm of the public transport lines synchronization in a transfer node // *Transportation Research Procedia*. 2020. Vol. 47: 315-322. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.104>
11. Kochegurova E.A., Fadeev A.S., Piletskaya A.Y. Calculation of performance indicators for passenger transport based on telemetry information // *Engineering Technology, Engineering Education and Engineering Management*. 2015: 847-851.
12. Yurchenko M., Kochegurova E., Fadeev A., Piletskaya A. Calculation of performance indicators for passenger transport based on telemetry information // *Engineering Technology, Engineering Education and Engineering Management*. 2015: 847-851.
13. Subiono, Fahim K., Adzkiya D. Generalized public transportation scheduling using max-plus algebra // *Kybernetika*. 2018. Vol. 54. Issue 2: 243-267.
14. Yakimov M., Trofimenko Yu. Developing an urban public passenger transport route network with account for natural resource limitations // *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36: 801-809. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.078>.
15. Muller S.A., Leich G., Nagel K. The effect of unexpected disruptions and information times on public transport passengers: a simulation study // *Procedia Computer Science*. 2020. Vol. 170: 745-750. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.161>.
16. Leng N., Corman F. The role of information availability to passengers in public transport disruptions: An agent-based simulation approach // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2020. Vol. 133: 214-236. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.01.007>.

17. Leng N., Corman F. How the issue time of information affects passengers in public transport disruptions: an agent-based simulation approach // *Procedia Computer Science*. 2020. Vol. 170: 382-389.

18. Banerjee N., Morton A., Akartunali K. Passenger demand forecasting in scheduled transportation // *European Journal of Operational Research*. 2019. Vol. 286: 797-810. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.10.032>

19. Дудников О.М., Виноградов М.С., Золотухина И.М. Методика розробки розкладу руху автобусів різних маршрутів з урахуванням сумісної ділянки їх руху // *Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. Донецьк: ДонНТУ*. 2010. № 2(11). С. 21–31.

20. Волошин С.О., Виноградов М.С. Необхідність координації інтервалів руху автобусів на сумісних ділянках двох незалежних міських маршрутів // *Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. Донецьк: ДонНТУ*, 2008. № 1(6). С. 126–131.

21. Кажяев А.А. Имитационная модель загрузки остановочных пунктов городского маршрутного транспорта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-zagruzki-ostanovochnyh-punktov-gorodskogo-marshrutnogo-transporta>

22. Кравченя И.Н., Подколзин А.М. Оптимизация расписания городского общественного транспорта разных маршрутов на дублирующих участках // *Организация и безопасность дорожного движения. Тюмень: ТИУ*. 2019. Т.2. С. 54–61.

REFERENCES

1. Azemsha S.A. Parametry avtomobilizatsii v Respublike Belarus' i ih vliyanie na vybrosy parnikovykh gazov [Parameters of automobilization in the Republic of Belarus and their impact on greenhouse gas emissions]. *Ecologica. Beograd*. 2019; 94: 217-223. (In Russian)

2. Cao Zh., Ceder A., Zhang S. Real-time schedule adjustments for autonomous public transport vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2019; 109: 60-78. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.10.004>.

3. Cao Zh., Ceder A. Autonomous shuttle bus service timetabling and vehicle scheduling using skip-stop tactic. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2019; 102: 370-395. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.03.018>.

4. Krause J., Spicker M., Wörteler L., Schäfer M., Zhang L. Interactive Visualization for Real-time Public Transport Journey Planning. *Sigrad*. 2012: 95-98.

5. Liu T., Ceder A. Integrated public transport timetable synchronization and vehicle scheduling with demand assignment: A bi-objective bi-level model using deficit function approach. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2018; 117: 935-955. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.08.024>

6. Arslanov M.A., Minatullaev S.M., Filippov A.A. Matematicheskaya model' organizatsii peresadki passazhirov v ustanovochno-ostanovochnykh punktakh pri mnogokratnom izmenenii passazhiropotokov [Mathematical model of the organization of passengers' trans-

portation in stopping-trans-relocation points with a multiple change of passenger traffic] *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018; 15(3): 362-371. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-3-362-371>. (In Russian)

7. Wu W., Liu R., Jin W., Ma Ch. Stochastic bus schedule coordination considering demand assignment and rerouting of passengers. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019; 121: 275-303. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.01.010>

8. Yin J., Yang L., Tang T., Gao Z., Ran B. Dynamic passenger demand oriented metro train scheduling with energy-efficiency and waiting time minimization: Mixed-integer linear programming approaches. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017; 97: 182-213. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.01.001>.

9. Carosi S., Frangioni A., Galli L., Girardi L., Vallese G. A matheuristic for integrated timetabling and vehicle scheduling. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019; 127: 99-124. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.07.004>.

10. Naumov V. Genetic-based algorithm of the public transport lines synchronization in a transfer node. *Transportation Research Procedia*. 2020; 47: 315-322. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.104>.

11. Kochegurova E.A., Fadeev A.S., Piletskaya A.Y. Calculation of performance indicators for passenger transport based on telemetry information. *Engineering Technology, Engineering Education and Engineering Management*. 2015: 847-851.

12. Yurchenko M., Kochegurova E., Fadeev A., Piletskaya A. Calculation of performance indicators for passenger transport based on telemetry information. *Engineering Technology, Engineering Education and Engineering Management*. 2015: 847-851.

13. Subiono, Fahim K., Adzkiya D. Generalized public transportation scheduling using max-plus algebra. *Kybernetika*. 2018; 54(2): 243-267.

14. Yakimov M., Trofimenko Yu. Razvitie marshrutnoy seti gorodskogo obshchestvennogo passazhirskogo transporta s uchetom ogranichenij prirodnykh resursov [Developing an urban public passenger transport route network with account for natural resource limitations]. *Transportation Research Procedia*. 2018; 36: 801-809. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.078>.

15. Muller S.A., Leich G., Nagel K. The effect of unexpected disruptions and information times on public transport passengers: a simulation study. *Procedia Computer Science*. 2020; 170: 745-750. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.161>.

16. Leng N., Corman F. The role of information availability to passengers in public transport disruptions: An agent-based simulation approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2020; 133: 214-236. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.01.007>.

17. Leng N., Corman F. How the issue time of information affects passengers in public transport disruptions: an agent-based simulation approach. *Procedia Computer Science*. 2020; 170: 382-389.

18. Banerjee N., Morton A., Akartunali K. Passenger demand forecasting in scheduled transportation. *European Journal of Operational Research*. 2019; 286: 797-810. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.10.032>.

19. Dudnikov A.N., Vinogradov N.S., Zolotukhina I.M. Metodyka rozrobky rozkladu rukhu avtobusiv ri-znykh marshrutiv z urakhuvannyam sumisnoyi dilyanky yikh rukhu [The Scheduling Methods for Miscellaneous Bus Routes subject to Joint Areas of their Motion]. *Visti Avtomobil'no-dorozhn'oho instytutu*. 2010; 2(11): 21-31. (In Ukrainian)

20. Voloshin S.O., Vinogradov M.S. Neobkhidnist' koordynatsiyi intervaliv rukhu avtobusiv na sumisnykh dilyankakh dvokh nezaleznykh mis'kykh marshrutiv [The need to coordinate bus travel intervals on compatible sections of two independent urban routes] *Avtomobil'no-dorozhn'oho instytutu*. 2008; 1(6): 126-131. (In Ukrainian)

21. Kazhaev A.A. Imitatsionnaya model' zagruzki ostanovochnykh punktov gorodskogo marshrutnogo transporta [Simulation model of loading public transport stops]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-zagruzki-ostanovochnykh-punktov-gorodskogo-marshrutnogo-transporta>. (Accessed 10 June 2019). (In Russian)

22. Kravchenya I.N., Podkolzin A.M. Optimizatsiya raspisaniya gorodskogo obshchestvennogo transporta raznykh marshrutov na dubliruyushchikh uchastkakh [Optimization of public transport schedule of different routes on duplicating stretches]. *Organizatsiya i bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya*. 2019; 2: 54–61. (In Russian)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аземша Сергей Александрович – канд. техн. наук, доц., <https://orcid.org/0000-0002-9368-8910>, Белорусский государственный университет транспорта, заведующий кафедрой «Управление автомобильными перевозками и дорожным движением» (246022, Республика Беларусь, г. Гомель, ул. Кирова, д. 34, +375297316677, s-azemsha@yandex.ru).

Кравченко Ирина Николаевна – канд. техн. наук, доц., orcid.org/0000-0002-2670-639X, Белорусский государственный университет транспорта, доц. кафедры «Управление автомобильными перевозками и дорожным движением» (246022, Республика Беларусь, г. Гомель, ул. Кирова, д. 34, +375296207145, ira.kravchenya@gmail.com).

AUTHORS' AFFILIATION

Sergei A. Azemsha, Cand. of Sci, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-9368-8910>, Belarusian State University of Transport, Head of the Road Transport and Traffic Management Department,

246022, Republic of Belarus, Gomel, Kirov str., h. 34, +375297316677, s-azemsha@yandex.ru

Irina N. Kravchenia, Cand. of Sci., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-2670-639X, Belarusian State University of Transport, Associate Professor of the Road Transport and Traffic Management Department, 246022, Republic of Belarus, Gomel, Kirov str., h. 34, +375296207145, ira.kravchenya@gmail.com

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Аземша С.А. Выполнение аналитических исследований, постановка цели и задачи исследований, анализ и ознакомление с зарубежным и отечественным опытом. Выбор и обоснование научно-методических подходов к оптимизации расписания городского пассажирского транспорта на дублирующих участках маршрутов, а также способа оценки эффективности такой оптимизации. Анализ результатов полученных данных, обоснование выводов. Выявление актуальных вопросов и рекомендаций для дальнейшей проработки темы.

Кравченко И.Н. Разработка научно-методических подходов для оптимизации расписания городского пассажирского транспорта на дублирующих участках маршрутов и оценки эффективности такой оптимизации, а также получение конкретного алгоритма их реализации. Апробация полученного алгоритма на примере.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Sergei A. Azemsha, carrying out analytical studies, setting the goals and objectives of research, analysis and familiarization with foreign and domestic experience, selection and justification of scientific and methodological approaches to optimizing the timetable of urban passenger transport on duplicate sections of routes, as well as the method of evaluating the effectiveness of such optimization, analysis of the results of the data obtained, substantiation of the conclusions, identification of relevant issues and recommendations for further elaboration of the topic.

Irina N. Kravchenia, development of scientific and methodological approaches for optimizing the timetable of urban passenger transport on duplicate sections of routes and for evaluating the effectiveness of such optimization, as well as obtaining a concrete algorithm for their implementation, test the resulting algorithm with an example.

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОЧИСТКЕ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ УЛЬТРАЗВУКОМ

А.С. Кадыров, Б.К. Сарсембеков, А.Б. Кукешева
Карагандинский технический университет,
г. Караганда, Республика Казахстан

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассмотрен вопрос защиты окружающей среды от вредных компонентов отработавших газов автомобиля. С целью решения этой проблемы предложена разработка дополнительного устройства к выхлопной системе двигателя внутреннего сгорания на основе метода очистки ультразвуковой коагуляцией.

Материалы и методы. В связи с необходимостью создания экологически безопасной выхлопной системы автомобиля планируется провести эксперимент, определяющий скорость оседания частиц газа на ультразвуковом стенде. Правильная постановка эксперимента требует проведения предварительного теоретического анализа и уменьшения количества параметров, имеющих влияние на эксперимент. Во время проведения эксперимента число рассматриваемых параметров должно достаточно точно отражать основные процессы и их взаимодействия. Однако процесс ультразвуковой коагуляции зависит от большинства параметров, таких как скорость оседания частиц, давление ультразвуковой волны, амплитуда колебаний, частота колебаний ультразвука, радиус частиц, динамическая вязкость, ускорение силы тяжести и массы частиц, которые могут усложнить и увеличить время проведения экспериментальных работ. С целью уменьшения набора переменных был применен метод теории подобия и анализа размерностей. Данный метод позволяет сократить число опытов и сэкономить время, средства и другие ресурсы, затрачиваемые на эксперимент при большом количестве параметров.

Результаты. В результате было получено минимальное количество безразмерных критериев, позволяющих повысить эффективность обработки экспериментальных данных на ультразвуковом стенде.

Заключение. Таким образом, полученные безразмерные критерии позволяют составить план эксперимента по определению скорости оседания частиц отработавших газов автомобиля на ультразвуковом стенде и подтвердить применимость метода очистки ультразвуковой коагуляцией.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автомобильный транспорт, двигатель внутреннего сгорания, ультразвуковой стенд, метод ультразвуковой коагуляции, анализ размерностей, критерии подобия, план эксперимента.

Поступила 07.12.20, принята к публикации 26.02.21.

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: Кадыров А.С. Планирование эксперимента по очистке выхлопных газов ультразвуком / А.С. Кадыров, Б.К. Сарсембеков, А.Б. Кукешева. – DOI <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-86-95> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 1(77). – С. 86–95.



DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-86-95>

PLANNING AN EXPERIMENT FOR CLEANING EXHAUST GASES WITH ULTRASOUND

Adil S. Kadyrov, Bauyrzhan K. Sarsembekov, Alia B. Kukisheva

Karaganda Technical University,
Karaganda, Republic of Kazakhstan

ABSTRACT

Introduction. The article deals with the protection of the environment from harmful components of the exhaust gases of a motor vehicle. In order to solve this problem, it is proposed to develop an additional device to the exhaust system of an internal combustion engine, based on the ultrasonic coagulation cleaning method.

Materials and methods. Due to the need for an environmentally friendly vehicle exhaust system, an experiment is planned to determine the particle gas settling rate on the ultrasonic stand. The correct setting of the experiment requires a preliminary theoretical analysis and a reduction in the number of parameters influencing the experiment. At the time of the experiment, the number of parameters considered should reflect the main processes and their interactions fairly accurately. However, ultrasonic coagulation depends on most parameters, such as particle settling velocity, ultrasonic wave pressure, oscillation amplitude, ultrasonic frequency, particle radius, dynamic viscosity, gravity acceleration and particle mass, which can complicate and increase the time for experimentation. The method of similarity theory and dimensional analysis was used to reduce the set of variables. This method reduces the number of experiments and saves time, costs and other resources spent on the experiment with a large number of parameters.

Results. As a result, a minimum number of dimensional criteria were obtained to improve the efficiency of the ultrasonic screen processing of experimental data.

Conclusion. Thus, the dimensionless criteria obtained make it possible to draw up a plan for an experiment to determine the settling rate of car exhaust gas particles on an ultrasonic stand and confirm the applicability of the ultrasonic coagulation treatment method.

KEYWORDS: road transport, internal combustion engine, ultrasonic stand, ultrasonic coagulation method, dimensional analysis, similarity criteria, experimental plan.

Submitted 07.12.20, revised 26.02.21.

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: Kadyrov A.S., Sarsembekov B.K., Kukisheva A. B. Planning an experiment for cleaning exhaust gases with ultrasound. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (1):86-95. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-86-95>

© Kadyrov A.S., Sarsembekov B.K., Kukisheva A.B., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Развитие общества, научно-технический прогресс, неуклонный рост производства и потребления оказывают непосредственное влияние на разрушение природной среды нашей планеты. Автомобиль вносит свой значительный вклад в загрязнение окружающей среды, и в отличие от промышленных предприятий, концентрирующихся в определенной зоне, является передвижным источником загрязнения, чем рассеивает в атмосферу вредные компоненты выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания [1]. Согласно статистике, которая ведется по всему миру, автомобильный парк ежегодно выделяет 2 млрд т топлива и выбрасывает в атмосферу около 700 млн т вредных веществ, в том числе 420 млн т оксида углерода (CO), 170 млн т углеводородов (CH), 60 млн т оксида азота (NOX), 17 млн т сажи и 0,6 млн т свинца. Вследствие этого разрушается среда обитания, качество жизни человека и других популяций ¹.

В настоящее время актуальным вопросом является создание экологически безопасного автотранспортного средства посредством сокращения в нем объема вредных выбросов выхлопных газов. По этой причине многие научные исследования идут в направлении совершенствования системы выпуска отработавших газов двигателей внутреннего сгорания, в том числе рассматривается возможность разработки дополнительного устройства к глушителю, повышающее эффективность нейтрализации выхлопных газов [2]. Однако будущее устройство не сможет обеспечить полную экологическую безвредность отработавших газов, если не использовать в нем эффективный метод очистки. В связи с этим был проведен литературный анализ существующих методов очистки отработавших газов.

По результатам литературного анализа было установлено, что большинство рассмотренных методов предназначено для очистки крупных частиц газов и не могут полноценно очищать газы от вредных, мелких частиц [3]. Также многие методы могут применяться только на крупных установках, а размеры будущего

устройства должны быть компактными, так как оно должно быть беспрепятственно установлено в систему выпуска отработавших газов автомобиля [4]. Следовательно, сделан вывод о целесообразности применения метода ультразвуковой коагуляции в работе будущего устройства, так как этот метод позволяет повысить эффективность процесса коагуляции, направленный на увеличение массы и размеров частиц отработавшего газа. Кроме того, метод ультразвуковой коагуляции может использоваться как самостоятельное средство по очистке выхлопных газов автомобиля, так и в сочетании с другими методами очистки [5]. Прежде чем экспериментально подтвердить применение метода ультразвуковой коагуляции на дополнительном устройстве, необходимо изучить его физическую сущность. С этой целью был рассмотрен физический процесс коагуляции и влияние на него действующего ультразвука.

Ультразвук – это упругие волны высокой частоты. Ухо человека воспринимает распространяющиеся волны частотой до 16 кГц, а колебания более высокой частоты представляют собой ультразвук [6]. Ультразвуковой диапазон находится от 20 тыс. до нескольких миллиардов Гц. Ультразвуковая очистка воздействует на газ с помощью интенсивных ультразвуковых волн частотой от 10 до 40 кГц². Физическая сущность процесса ультразвуковой очистки газов основана на коагуляции твердых частиц отработавших газов с оседанием их в виде нагара на дно устройства³. Под коагуляцией понимают физико-химический процесс, описывающий слияние мелких твердых частиц газа друг с другом под действием сил притяжения путем создания коагуляционных структур. Процесс коагуляции частиц отработавших газов происходит до воздействия на него ультразвука ⁴.

В основном после того, как газ попал под действие ультразвука, можно наблюдать две стадии процесса коагуляции, происходящие в частицах. На первом этапе газ подвергается действию ультразвукового поля, от которого возрастает вибрация и частицы, столкнув-

¹ Марчук Г.И., Кондратьев К.Я. Приоритеты глобальной экологии. Москва, Наука, 1992. 264 с.

² Бабиков О.И. Ультразвук и его применение в промышленности. Москва, Государственное издательство физико-математической литературы, 1958. 260 с.

³ Радж Балдев, Раджендран В., Паланичами П. Применения ультразвука. Москва, Техносфера, 2006. 576 с.

⁴ Бергман Л., Григорьева В.С., Розенберг Л.Д. Ультразвук и его применение в науке и технике. Москва, Издательство иностранной литературы, 1957. 726 с.

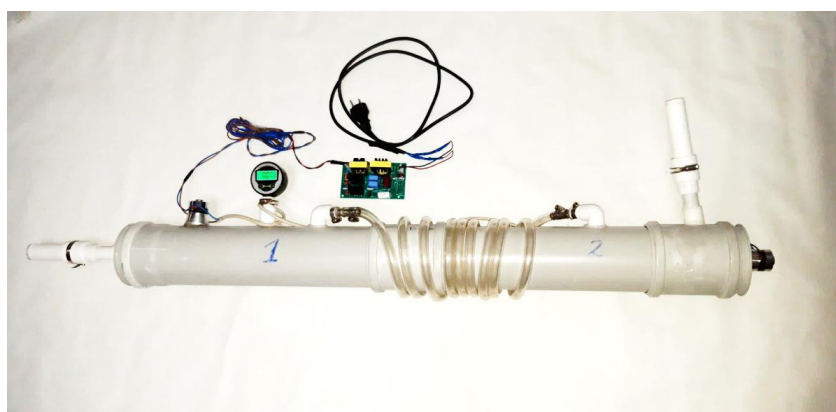


Рисунок 1 – Экспериментальный ультразвуковой стенд

Figure 1 – Experimental ultrasound stand

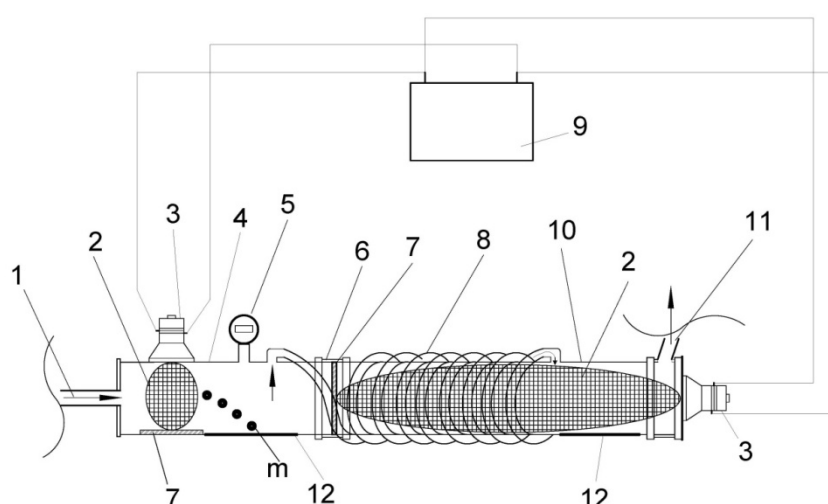


Рисунок 2 – Схема экспериментального ультразвукового стенда:
1 – входной патрубок; 2 – область воздействия ультразвуковых волн; 3 – ультразвуковой излучатель; 4 – секция №1;
5 – электронный манометр; 6 – муфта; 7 – отражатель; 8 – прозрачный шланг; 9 – ультразвуковой генератор;
10 – секция №2; 11 – выходной патрубок; 12 – место сбора сажи

Figure 2 – Scheme of the experimental ultrasound stand:
1 – inlet pipe; 2 – area of influence of ultrasonic waves; 3 – ultrasonic emitter; 4 – section No. 1; 5 – electronic pressure gauge;
6 – clutch; 7 – reflector; 8 – transparent hose; 9 – ultrasonic generator; 10 – section 2; 11 – outlet branch pipe;
12 – place of collection of soot

шись друг с другом, совершают хаотическое движение. В результате нескольких таких столкновений и под действием сил взаимного притяжения наблюдается процесс слипания частиц, после которого они увеличиваются в размерах. На втором этапе большие частицы продолжают совершать хаотичные движения, но при этом не следуют за ультразвуковыми

колебаниями, в то время как мелкие частицы следуют за ультразвуковыми колебаниями среды⁵. Поскольку амплитуды у каждой частицы в зависимости от их размеров могут быть разными, то процесс их взаимодействия друг с другом и последующее соединение продолжается. Каждому размеру частиц соответствует определенная частота колебания, при более

⁵ Майер В.В. Простые опыты с ультразвуком. Москва, Наука, 1978. 160 с.

высоких частотах амплитуда колебания уменьшается. После завершения действия ультразвукового поля процесс коагуляции в частицах не прекращается, однако его темп постепенно уменьшается. В конечном итоге частицы постепенно опускаются вниз и оседают на дне рассматриваемой среды [7]. Из этого можно сделать следующий вывод: между частицами существует свой собственный процесс коагуляции, но сам процесс проходит очень медленно, а ультразвуковое поле способствует к увеличению темпа коагуляции частиц [8].

Группа ученых Карагандинского технического университета разрабатывает стенд для определения параметров ультразвуковой коагуляции по очистке отработавшего газа автомобильного транспорта (рисунок 1, 2) [9, 10].

Экспериментальный ультразвуковой стенд (см. рисунок 2) состоит из двух секций 4 и 10 диаметром 110 мм, соединенных между собой прозрачным шлангом 8 диаметром 14 мм. В каждой из секций установлено ультразвуковое оборудование, состоящее из ультразвукового генератора 9, ультразвуковых излучателей 3 и отражателей ультразвуковых волн 7⁷.

Эффективность работы выше описанной конструкции стенда нуждается в экспериментальном подтверждении, которая может быть доказана с помощью определения скорости оседания частиц выхлопных газов на дне устройства [11, 12]. Перед проведением соответствующих экспериментальных работ необходимо заранее составить план эксперимента, согласно которому число параметров, описывающих процесс оседания частиц газа, должно быть минимальным и отражать основные их взаимодействия в наиболее удобной форме [13, 14].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Правильная постановка эксперимента требует проведения предварительного теоретического анализа и по возможности минимального выбора числа параметров. Однако скорость оседания частиц газа под воздействием ультразвуковой коагуляции зависит от значитель-

ного числа параметров (переменных), таких как давление ультразвуковой волны, амплитуда колебаний, частота колебаний ультразвука, динамическая вязкость, ускорение силы, масса и радиус частиц. Большое число параметров усложняет процесс проведения экспериментальных работ, увеличивает число опытов и продолжительность его проведения⁸. В следствии этого, с целью уменьшения набора переменных, необходимо использовать метод теории подобия и анализ размерностей, который широко применим в рассмотрении сложных процессов и в значительной степени может облегчить обработку экспериментов при большом количестве параметров, тем самым сократив число опытов, сэкономив время и средства на эксперимент⁹.

Для правильного применения метода теории подобия и анализа размерностей в эксперименте необходимо знать характер и число фундаментальных переменных. Под фундаментальными переменными понимается величина, которая влияет на эксперимент и изменяется независимо от других переменных [15]. Согласно этому были рассмотрены следующие переменные, имеющие влияние на процесс ультразвуковой коагуляции: скорость оседания частиц (V), давление ультразвуковой волны (P), амплитуда колебаний (A), частота колебаний ультразвука (f), радиус частиц (r), динамическая вязкость (μ), ускорение силы тяжести (g), масса частиц (m). В итоге мы получили восемь фундаментальных переменных, зависящих от скорости падения частиц, зависимость которых можно записать в следующем виде (1):

$$V = \bar{V}(P, A, f, r, \mu, g, m). \quad (1)$$

Затем, согласно теореме Букингема, полученное функциональное соотношение можно выразить через безразмерные комбинации. Теорема Букингема гласит: «Если какое-либо уравнение однородно относительно размерностей, то его можно преобразовать к соотношению, содержащему набор безразмерных

⁶ Кадыров А.С., Аскаров Б.Ш., Кабаев Д.Д., Ибатов М.К., Грузин В.В. Устройства для очистки выхлопных газов. Патент РК, № 26102, 2012.

⁷ Ибатов М.К., Кадыров А.С., Пак И.А., Аскаров Б.Ш., Кабаев Д.Д. Устройство для изоляции отработавших газов. Патент РК, №26623, 2012.

⁸ Клепиков Н.П., Соколов С.Н. Анализ и планирование экспериментов методом подобия, Москва, Наука, 1964. 181 с.

⁹ Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. Москва, Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1977. 440 с.

Таблица 1
Перечень формул размерностей для основных величин переменных

Table 1
List of dimensional formulas for basic variables

№	Название переменной	Обозначение	Единица измерения	Формула размерности
1	Скорость оседания частиц	V	м/с	$L\theta^{-1}$
2	Давление ультразвуковой волны	P	Па=Н/м ²	$M L^{-1} \theta^{-2}$
3	Амплитуда колебаний	A	м	L
4	Частота колебаний ультразвука	f	с ⁻¹	θ^{-1}
5	Радиус частиц	r	м	L
6	Динамическая вязкость	μ	Пас	$ML^{-1} \theta^{-1}$
7	Ускорение силы тяжести	g	м/с ²	$L\theta^{-2}$
8	Масса частиц	m	кг	M

комбинаций величин»¹⁰. Для этого выразим размерность переменных по отношению к трем основным единицам: длины L , массы M и времени θ . Для основных величин формулы размерностей были приведены в таблице 1.

Допустим теперь, что между этими величинами существует следующее соотношение (2):

$$(P^a, A^b, f^c, r^d, \mu^e, g^k, m^n) = V. \quad (2)$$

Поставим формулы размерности, взятые из таблицы 1, на место символов размерности (3):

$$\varphi[(ML^{-1}\theta^{-2})^a, L^b, (\theta^{-1})^c, L^d, (ML^{-1}\theta^{-1})^e, (L\theta^{-2})^k, M^n] = L\theta^{-1} \quad (3)$$

Чтобы данное уравнение было однородным относительно равномерностей, должны выполняться следующие соотношения между показателями степени (4), (5), (6):

$$\text{для } L: 1 = -a + b + d - e + k; \quad (4)$$

$$\text{для } M: 0 = a + e + n; \quad (5)$$

$$\text{для } \theta: -1 = -2a - c - e - 2k. \quad (6)$$

Имеем три уравнения с семью неизвестными. Упростим их, преобразовав следующим образом: $a = -e - n$, $b = 1 - n - d - k$, $c = 1 + e + 2n - 2k$. Подставляя эти соотношения для показателей степени в формулу (2), получим формулу (7):

$$\varphi(P^{(-e-n)}, A^{(1-n-d-k)}, f^{(1+e+2n-2k)}, r^d, \mu^e, g^k, m^n) = V \quad (7)$$

Объединяя члены с одинаковыми показателями степени, легко составить безразмерные комбинации (8):

$$\varphi\left[\left(\frac{f\mu}{P}\right)^e, \left(\frac{f^2m}{PA}\right)^n, \left(\frac{r}{A}\right)^d, \left(\frac{g}{Af^2}\right)^k\right] = \frac{V}{Af} \quad (8)$$

Восемь первоначальных переменных задачи дают пять безразмерных комбинаций. Полученное число критериев подтверждается так называемой «пи-теоремой». Согласно теореме: «если существует однозначное соотношение между n физическими величинами, для описания которых используется k основных единиц, то соответствует соотношение между $(n-k)$ безразмерными комбинациями, составленными из этих величин»¹¹. В нашем случае были рассмотрены восемь физических величин, выбраны три основные единицы и согласно этому получены пять безразмерных

¹⁰ Шенк Х. Теория научного эксперимента. Москва, Мир, 1972. 381 с.

¹¹ Кадыров А.С., Кадырова И.А. Основы научных исследований. Караганда, Изд-во КарГТУ, 2015. 269 с.

Таблица 2
План эксперимента матрицы 2³

Table 2
Matrix experiment plan 2³

Номера опытов	x ₁	x ₂	x ₃	У
1	-1	-1	+1	y ₁
2	-1	+1	-1	y ₂
3	+1	-1	-1	y ₃
4	+1	+1	+1	y ₄
5	-1	-1	-1	y ₅
6	-1	+1	+1	y ₆
7	+1	-1	+1	y ₇
8	+1	+1	-1	y ₈

комбинаций. Применяя метод теории подобия и анализ размерностей, мы от обычных физических величин перешли к величинам комплексного типа, таким образом мы легко продвинулись в решении задачи.

В итоге фундаментальные переменные были сокращены и преобразованы в три критерия подобия (9), (10), (11):

$$\frac{\mu A}{f m} = k_1; \quad (9)$$

$$\frac{r P}{f^2 m} = k_2; \quad (10)$$

$$\frac{P g}{f^4 m} = k_3. \quad (11)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Критерий k_1 характеризует зависимость коагуляции от вязкости и амплитуды частотной характеристики от ультразвукового генератора. Критерий k_2 учитывает давление с выхлопной трубы, размер частицы и их массу, а критерий k_3 силу, действующую на частицу, ее массу и частоту движения.

Полученные критерии подобия позволяют составить план эксперимента. Для упрощения процесса обработки данных, полученных из опытов эксперимента, подбирается интервал изменения критериев в соответствии с масштабом от +1 (верхний уровень) до -1 (нижний

уровень). Поскольку критерии рассматриваются между двумя уровнями, план эксперимента имеет восемь опытов и соответствует многофакторному плану эксперимента 2³. В связи с этим матрица плана эксперимента имеет следующий вид (таблица 2):

Геометрическая интерпретация этого плана имеет кубическую форму. Для построения графического изображения плана необходимо определить средние, максимальные, минимальные величины критериев, соответствующих координатам куба.

Координатами центра куба является среднее значение критериев подобия (12), (13), (14):

$$\frac{\mu_{cp} A_{cp}}{f_{cp} m_{cp}} = k_{1cp}; \quad (12)$$

$$\frac{r_{cp} P_{cp}}{f_{cp}^2 m_{cp}} = k_{2cp}; \quad (13)$$

$$\frac{P_{cp} g}{f_{cp}^4 m_{cp}} = k_{3cp}. \quad (14)$$

Находим минимальное и максимальное значение безразмерных величин (15), (16), (17), (18), (19), (20):

$$\frac{\mu_{min} A_{min}}{f_{max} m_{max}} = k_{1min}; \quad (15)$$

$$\frac{r_{\min} P_{\min}}{f_{\max}^2 m_{\max}} = k_{2\min}; \quad (16)$$

$$\frac{P_{\min} g}{f_{\max}^4 m_{\max}} = k_{3\min}; \quad (17)$$

$$\frac{\mu_{\max} A_{\max}}{f_{\min} m_{\min}} = k_{1\max}; \quad (18)$$

$$\frac{r_{\max} P_{\max}}{f_{\min}^2 m_{\min}} = k_{2\max}; \quad (19)$$

$$\frac{P_{\max} g}{f_{\min}^4 m_{\min}} = k_{3\max}. \quad (20)$$

По этим данным строим координаты вершин куба (21), (22), (23), (24), (25), (26), (27), (28):

$$(k_{1\max}, k_{2\min}, k_{3\min}); \quad (21)$$

$$(k_{1\min}, k_{2\min}, k_{3\min}); \quad (22)$$

$$(k_{1\min}, k_{2\max}, k_{3\min}); \quad (23)$$

$$(k_{1\max}, k_{2\max}, k_{3\min}); \quad (24)$$

$$(k_{1\max}, k_{2\min}, k_{3\max}); \quad (25)$$

$$(k_{1\min}, k_{2\min}, k_{3\max}); \quad (26)$$

$$(k_{1\min}, k_{2\max}, k_{3\max}); \quad (27)$$

$$(k_{1\max}, k_{2\max}, k_{3\max}). \quad (28)$$

Геометрической интерпретацией полного факторного эксперимента 2^3 служит куб, координатами вершин которого задают условия опытов (рисунок 3).

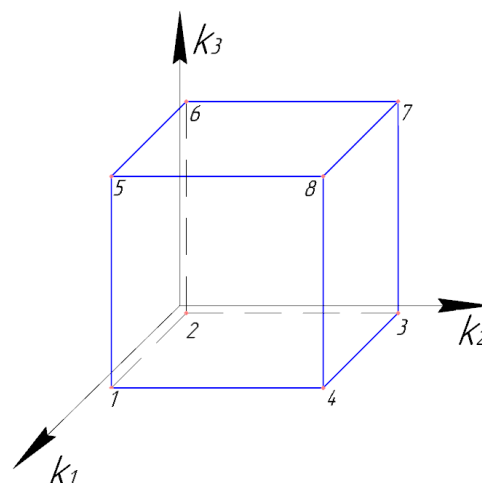


Рисунок 3 – Геометрическая интерпретация полного факторного эксперимента 2^3

Figure 3 – Geometric interpretation of a full factorial experiment 2^3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные будут определять зависимости, скорости коагуляции от критериев k_1, k_2, k_3 и позволят составить уравнение регрессии, необходимое для практических расчетов.

Таким образом, с целью сокращения транспортных выбросов и очистки выхлопных газов автомобиля при минимальных затратах и максимальной эффективности необходимо применение метода ультразвуковой очистки отработавших газов. Согласно проведенному исследованию можно сделать заключение, что ультразвуковое воздействие позволяет усилить явление коагуляции частиц выхлопных газов и способствует их оседанию внутри корпуса ультразвукового стенда в виде нагара.

Благодаря применению метода теории подобия и анализа размерностей были получены три критерия подобия, которые дают нам следующие преимущества:

- во-первых, сократилось число переменных, влияющих на эксперимент;
- во-вторых, на эксперимент будут влиять не отдельные факторы величин, а весь его комплекс в качестве трех критериев подобия, то есть более ясно будут выступать внутренние связи величин;
- в-третьих, на основе полученных критериев подобия было установлено проведение восьми опытов, выбран план многофакторного эксперимента 2^3 и разработана методика экспериментального исследования.

Полученный план эксперимента позволяет определить эффективность применения метода ультразвуковой коагуляции на разработанном стенде и определить скорость оседания частиц отработавших газов автомобиля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shamim T. Effect of engine exhaust gas modulation on the cold start emissions *International Journal of Automotive Technology*, 2011, vol. 12 no. 4, pp. 475-487.

2. Kheirbek I., Haney J., Douglas S., Ito K., Matte T. The contribution of motor vehicle emissions to ambient fine particulate matter public health impacts in New York City: A health burden assessment *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 2016, vol. 15, no 1, p.89.

3. Вольнов А.С., Третьяк Л.Н., Герасимов Е.М. Новые подходы к очистке отработавших газов двигателей внутреннего сгорания // ВЕСТНИК ОГУ. 2014. №10 (171). С.36–43.

4. Ложкин В.Н., Шульгин В.В., Максимов М.А. О моделировании систем очистки выхлопных газов ДВС с использованием нейтрализаторов фазового преобразования и тепловых аккумуляторов // Журнал «Технико-технологические проблемы сервиса». 2011. №2(16). С.16–22.

5. Ibatov M.K., Aliev S.B., Balabayev O.T., Askarov B.Sh. Main results of experimental studies of open-pit mines diesel locomotive internal combustion [HYPERLINK "https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85072051856&origin=reflist"](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85072051856&origin=reflist) engine isolation, *Ugol*, 2019, no. 7, pp. 28-30.

6. Gallego-Juárez J.A., Graff K.F. Power [HYPERLINK "https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84940519069&origin=reflist"](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84940519069&origin=reflist) Ultrasonics [HYPERLINK "https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84940519069&origin=reflist"](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84940519069&origin=reflist): Applications of High-Intensity Ultrasound. Cambridge, Woodhead [HYPERLINK "https://pureportal.coventry.ac.uk/en/publications/power-ultrasonics-for-food-processing-2"](https://pureportal.coventry.ac.uk/en/publications/power-ultrasonics-for-food-processing-2) Publishing, 2015. pp. 1-1142.

7. Антонникова А.А., Коровина Н.В., Кудряшова О.Б. Ультразвуковое осаждение мелкодисперсного аэрозоля // Известия Томского политехнического университета. 2014. №2. С. 57–62.

8. Кукешева А.Б. Экспериментальное исследование коагуляции выхлопных газов под действием ультразвука. Республиканская студенческая научная конференция. «Вклад молодежной науки в реализацию Стратегии «Казахстан – 2050». 2019. №1. С. 980–981.

9. Ибатов М.К., Пак И.А. Устройство очистки выхлопных газов. Сагиновские чтения «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации». 2019. №11. С. 335–336.

10. Кадыров А.С., Пак И.А., Сарсембеков Б.К. Исследование ультразвуковой очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания. XV Международная научно-практическая конференция «Перспективные вопросы мировой науки». 2019. №13. С. 76–80.

11. Кадыров А.С., Балабаев О.Т., Аскарлов Б.Ш., Жашкеев Е.К., Аскарова А.Б. Разработка устройства для изоляции отработавших газов двигателя подземной самоходной машины. Труды Университета. 2020. №1. С. 113–116.

12. Ибатов М.К., Кадыров А.С., Пак И.А., Кадырова И.А., Аскарлов Б.Ш. Результаты экспериментальных исследований работы емкостного оборудования ультразвуковой очистки отработавших газов автотранспорта // Уголь. 2020. № 2. С. 73–78.

13. Кадыров А.С., Суюмбаев Ш.М., Сарсембеков Б.К. Экспериментальное исследование ультразвукового автомобильного глушителя. Сагиновские чтения. «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации». 2020. №12. С. 605–607.

14. Пак И.А., Ибатов М.К., Баурова Н.И. Устройство ультразвуковой очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания транспортной техники. Сагиновские чтения. «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации». 2020. №12. С. 634–636.

REFERENCES

1. Shamim T. Effect of engine exhaust gas modulation on the cold start emissions *International Journal of Automotive Technology*, 2011; 12(4): 475-487.

2. Kheirbek I., Haney J., Douglas S., Ito K., Matte T. The contribution of motor vehicle emissions to ambient fine particulate matter public health impacts in New York City: A health burden assessment *Environmental Health. A Global Access Science Source*, 2016; 15(1): 89.

3. Vol'nov A.S., Tre't'yak L.N., Gerasimov E.M. Novye podhody k ochistke otrabotavshih gazov dvigatelej vnutrennego sgoraniya [New approaches to cleaning the exhaust gases of internal combustion engines]. *Vestnik OGU*, 2014; 10 (171): 36-43. (In Russian)

4. Lozhkin V.N., Shul'gin V.V., Maksimov M.A. O modelirovani sistem ochistki vykhlopnih gazov DVS s ispol'zovaniem nejtralizatorov fazovogo preobrazovaniya i teplovyh akkumulyatorov [On modeling exhaust gas cleaning systems for ICE using phase transformation neutralizers and heat accumulators]. *Zhurnal «Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa»*, 2011; 2(16): 16-22. (In Russian)

5. Ibatov M.K., Aliev S.B., Balabayev O.T., Askarov B.Sh. Main results of experimental studies of open-pit mines diesel locomotive internal combustion engine isolation, *Ugol*, 2019; 7: 28-30.

6. Gallego-Juárez J.A., Graff K.F. Power [HYPERLINK "https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84940519069&origin=reflist"](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84940519069&origin=reflist) Ultrasonics [HYPERLINK "https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84940519069&origin=reflist"](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84940519069&origin=reflist): Applications of High-Intensity Ultrasound. Cambridge, Woodhead [HYPERLINK "https://pureportal.coventry.ac.uk/en/publications/power-ultrasonics-for-food-processing-2"](https://pureportal.coventry.ac.uk/en/publications/power-ultrasonics-for-food-processing-2) Publishing, 2015: 1-1142.

7. Antonnikova A.A., Kopovina N.V., Kudpyashova O.B. Ul'trazvukovoe ocazhdenie melkodicpercn-

go aepozolya [Ultrasonic deposition of fine aerosol]. *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta*, 2014; 2: 57-62. (In Russian)

8. Kukeshova A.B. Eksperimentalnoye issledovaniye koagulyatsii vykhlopnykh gazov pod deystviyem ultrazvuka [Experimental study of coagulation of exhaust gases under the influence of ultrasound] *«Vklad molodezhnoy nauki v realizatsiyu Strategii «Kazakhstan - 2050»*, 2019; 1: 980-981. (In Russian)

9. Ibatov M.K., Pak I.A. "Uchtojstvo ochistki vykhlopnykh gazov" [Exhaust gas cleaning device]. *Saginovskie chteniya «Integratsiya nauki, obpazovaniya i proizvodstva – osnovaya realizatsiya Plana natsii»* 2019; 11: 335-336. (In Russian)

10. Kadyrov A.S., Pak I.A., Sarsembekov B.K. «Issledovanie ul'trazvukovoy ochistki otrabotavshih gazov dvigatelei vnutrennego sgoraniya» [Study of ultrasonic cleaning of exhaust gases from internal combustion engines] *XV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Perspektivnye voprosy tipovoy nauki»*, 2019; 13: 76-80. (In Russian)

11. Kadyrov A.S., Balabaev O.T., Askarov B.Sh., Zhashkeev E.K., Askarova A.B. Razrabotka ustroystva dlya izolyatsii otrabotavshih gazov dvigatelya podzemnoy samohodnoy mashiny [Development of a device for isolating the exhaust gases of an underground self-propelled machine]. *Trudy Universiteta*, 2020; 1: 113-116. (In Russian)

12. Ibatov M.K., Kadyrov A.S., Pak I.A., Kadyrova I.A., Askarov B.Sh. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy raboty emkostnogo oborudovaniya ul'trazvukovoy ochistki otrabotavshih gazov avtotransporta [Results of experimental studies of the operation of capacitive equipment for ultrasonic cleaning of exhaust gases from vehicles]. *Ugol'*, 2020; 2: 73-78. (In Russian)

13. Kadyrov A.S., Suyunbaev Sh.M., Sarsembekov B.K. Eksperimental'noye issledovanie ul'trazvukovogo avtomobil'nogo glushitelya [Experimental study of an ultrasonic automobile muffler]. *Saginovskie chteniya. «Integratsiya nauki, obrazovaniya i proizvodstva – osnovaya realizatsiya Plana natsii»*, 2020; 12, pp. 605-607. (In Russian)

14. Pak I.A., Ibatov M.K., Baurova N.I. Ustroystva ul'trazvukovoy ochistki otrabotavshih gazov dvigatelei vnutrennego sgoraniya transportnoy tekhniki. [Devices for ultrasonic cleaning of exhaust gases from internal combustion engines of transport equipment]. *Saginovskie chteniya. «Integratsiya nauki, obrazovaniya i proizvodstva – osnovaya realizatsiya Plana natsii»*, 2020; 12: 634-636. (In Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Кадыров А.С. Руководство по исследованию процесса коагуляции под действием ультразвука в экспериментальном стенде для очистки отработавших газов автомобиля. Применение теории подобия в экспериментальном исследовании.

Сарсембеков Б.К. Разработка ультразвукового стенда.

Кукешева А.Б. Составление плана эксперимента по определению скорости оседания частиц

на экспериментальном ультразвуковом стенде с помощью метода теории подобия и анализа размерностей.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Adil S. Kadyrov, a guideline on the research of the process of coagulation under the action of ultrasound in an experimental stand for cleaning the exhaust gases of a car, an application of the theory of similarity in experimental research.

Bauyrzhan K.Sarsembekov, the development of an ultrasonic stand.

Alia B.Kukeshova – planning of an experiment to determine the rate of particle subsidence on an experimental hive platform using the method of similarity and dimensional analysis.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кадыров Адиль Сураатович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Транспортная техника и логистические системы» Карагандинский технический университет (100027, Республика Казахстан, г. Караганда, пр. Нурсултана Назарбаева, 56), +7-701-915-09-11, e-mail: ludmila77025@mail.ru, ORCID id – 0000-0001-7071-2300

Сарсембеков Бауыржан Кобланович – магистр техн. наук, докторант кафедры «Транспортная техника и логистические системы», Карагандинский технический университет (100027, Республика Казахстан, г. Караганда, пр. Нурсултана Назарбаева, 56), +7-747-439-05-87, e-mail: baurask@mail.ru, ORCID id - 0000-0002-4815-1823

Кукешева Алия Бакибаевна – магистр техн. наук, ассистент кафедры «Транспортная техника и логистические системы» Карагандинский технический университет (100027, Республика Казахстан, г. Караганда, пр. Нурсултана Назарбаева, 56), +7-702-370-69-08, e-mail: alisska_vip@bk.ru, ORCID id - 0000-0002-3063-5870

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Adil S. Kadyrov, Dr. of Sci., Professor of the Transport equipment and logistics Department, Karagandar Technical University (100027, the Republic of Kazakhstan, Karaganda, N.Nozarbaev Prospekt, 56), +7-701-915-09-11, e-mail: ludmila77025@mail.ru, ORCID id – 0000-0001-7071-2300

Bauyrzhan K.Sarsembekov, Master of Sci., doctoral student of the Transport equipment and logistics Department, (100027, the Republic of Kazakhstan, Karaganda, N.Nozarbaev Prospekt, 56), +7-747-439-05-87, e-mail: baurask@mail.ru, ORCID id - 0000-0002-4815-1823

Alia B.Kukeshova, Master of Sci., Associated professor of the Transport equipment and logistics Department, Karagandar Technical University (100027, the Republic of Kazakhstan, Karaganda, N.Nozarbaev Prospekt, 56), +7-702-370-69-08, e-mail: alisska_vip@bk.ru, ORCID id - 0000-0002-3063-5870

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ ДО 2024 ГОДА В ОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Э.А. Сафронов, К.Э. Сафронов*
ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
г. Омск, Россия
*transistem@rambler.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из важных проблем в РФ является повышение безопасности дорожного движения (БДД). Это связано с огромным ущербом, который наносит аварийность народному хозяйству. РФ отстает от передовых стран Европейского союза в сфере БДД по ключевым показателям в 3,5 раза. Для ликвидации отставания в январе 2018 г. у нас была принята «Стратегия безопасности дорожного движения в Российской Федерации на 2018–2024 гг.» (Стратегия). Целью Стратегии является стремление к нулевой смертности в дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) к 2030 г., а к 2024 г. – снижение социального риска до 4 погибших на 100 тыс. жителей.

Материалы и методы. Разработки базируются на новой теории, созданной в СибАДИ – это цикличность динамики ДТП в масштабе страны, подчиненной уровню экономики. В период кризисов происходит снижение числа ДТП, на это влияет ряд факторов, основной из них – снижение общего пробега автотранспорта. В такие периоды часто путают эффективность мероприятий по снижению ДТП с истинной причиной, что приводит к снижению финансирования и свертыванию работ по повышению БДД, чего делать не следует. При восстановлении экономики уровень ДТП восстанавливается и даже начинает расти из-за потери квалификации простаивающих в кризис водителей.

Результаты. Сложился два различных подхода к реализации поставленной цели. На уровне федерации действует программный подход, в то же время в регионах используется проектный метод в рамках национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» (БКАД). Подобный проект принят в Омской области. Особенностью реализации проекта БДД в Омской области является привлечение науки. Исследования проводятся на кафедре «Организация и безопасность движения», внедряются в учебный процесс и реализуются в Федеральном учебном центре по повышению квалификации работников, занимающихся подготовкой водителей, созданном в СибАДИ.

Обсуждение и заключение. Научный подход гарантирует выявление и качественное решение основных проблем проекта БДД. Это относится к рекомендациям по стабилизации финансирования проекта, обоснованию развития общественного транспорта, использованию новых технологий, совершенствованию нормативной и законодательной базы во всех сферах градостроительства и инфраструктуры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: безопасность дорожного движения (БДД), дорожно-транспортные происшествия (ДТП), Стратегия БДД, программный метод, метод управления проектами.

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы выражают благодарность руководству СибАДИ и рецензентам статьи.

Поступила 27.10.20, принята к публикации 26.02.21.

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: Сафронов Э.А. Особенности реализации проекта безопасности дорожного движения до 2024 года в Омской области / Э.А. Сафронов, К.Э. Сафронов. – DOI <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-96-104> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 1(77). – С. 96-104.

© Сафронов Э.А., Сафронов К.Э., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-96-104>

FEATURES OF ROAD SAFETY PROJECT IMPLEMENTATION UNTIL 2024 IN OMSK REGION

Eduard A. Safronov, Kirill E. Safronov*

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

* transistem@rambler.ru

ABSTRACT

Introduction. One of the important problems in the Russian Federation is road safety improvement (RS). This is due to the enormous damage that accidents inflict on the national economy. The Russian Federation lags behind the leading countries of the European Union in the field of road safety in terms of key indicators by 3.5 times. To close the gap, in January 2018, we adopted the 'Strategy for road safety in the Russian Federation for 2018 – 2024' (Strategy). The goal of the Strategy is to strive for zero mortality in road traffic accidents (RTA) by 2030, and in 2024 to reduce the social risk to 4 deaths per 100 thousand inhabitants.

Materials and methods. The developments are based on a new theory developed at SibADI - this is the cyclical dynamics of road accidents on a national scale, subordinate to the level of the economy. During crisis, there is a decrease in the number of accidents; this is influenced by a number of factors, the main one is a decrease in the total mileage of vehicles. During such periods, the effectiveness of measures to reduce road accidents is often confused with the real cause, which leads to a decrease in funding and the curtailment of work to improve road safety, which should not be done. When the economy recovers, the level of road accidents recovers and even begins to grow due to the loss of qualifications of drivers who are idle during the crisis.

Results. There are two different approaches to achieving this goal. At the federal level, there is a programmatic approach, while in the regions the project method is used within the framework of the 'Safe and High-Quality Highways' national project (BKAD). A similar project was adopted in the Omsk region. A feature of the road safety project implementation in the Omsk region is the involvement of science. Research is carried out at the Organization and Traffic Safety Department and is introduced into the educational process and implemented at the Federal Training Center for advanced training of workers involved in the training of drivers, created in SibADI.

Discussion and conclusion. The scientific approach guarantees the identification and quality solution of the main problems of the road safety project. This applies to recommendations for stabilizing project financing, justifying the development of public transport, using new technologies, improving the regulatory and legislative framework in all areas of urban planning and infrastructure.

KEYWORDS: road safety (RS), road traffic accidents (RTA), RS strategy, program method, project management method.

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors express their gratitude to SibADI and the reviewers of the article.

Submitted 27.10.20, revised 26.02.21.

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: 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. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-96-104>

© Safronov E.A., Safronov K.E., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных проблем в РФ является повышение безопасности дорожного движения (БДД). Это связано с огромным ущербом, который наносит аварийность народному хозяйству. Он проявляется в материальном ущербе, травматизме и смертности [1, 2]. Усугубляет ситуацию потеря самого экономически активного и репродуктивного слоя населения, который пользуется автомобилями. Автомобиль – средство повышенной опасности, от аварии не застрахован никто, но президентом в Стратегии¹ поставлены задачи по снижению последствия аварийности, вплоть до полного сокращения смертельных случаев. Такие примеры существуют. Они связаны с планированием, проектированием и строительством такой транспортной инфраструктуры, которая предупреждает, предотвращает и снижает последствия аварий.

Следует отметить, что одновременно с упомянутой Стратегией по предложению РФ в апреле 2018 г. в Организации Объединенных Наций (ООН) была принята резолюция по повышению БДД во всем мире². Это налагает особую ответственность на инициатора по поводу выполнения Стратегии в РФ.

В вопросах безопасности дорожного движения по г. Омску основные показатели за период 2016–2018 гг. имеют отрицательную динамику³. В г. Омске отмечается снижение количества ДТП, раненых погибших в ДТП и тяжести последствий в ДТП. Основные показатели безопасности дорожного движения на территории г. Омска представлены в таблице 1 [3].

Эти показатели отражают не только эффективность мероприятий по предотвращению ДТП, но и результат снижения использования транспорта из-за экономического кризиса, начавшегося в 2014 г. [4]. Результаты нало-

Таблица 1
Показатели безопасности дорожного движения на территории г. Омска

Table 1
Traffic safety indicators on the territory of Omsk

Показатель	Год	В абсолютных единицах	К 2016 г., %
Количество ДТП, ед.	2016	2320	100
	2017	2257	97
	2018	1636	71
Количество погибших, чел.	2016	56	100
	2017	71	127
	2018	53	95
Количество раненых, чел.	2016	2924	100
	2017	2789	95
	2018	2093	72
Тяжесть последствий	2016	1,9	100
	2017	2,5	132
	2018	2,5	132

¹ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 8 января 2018 г. № 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: 07.07.2020).

² Глобальный план осуществления Десятилетия действий по обеспечению безопасности дорожного движения 2011–2020 гг. / Организация Объединенных Наций и безопасность движения. URL: <http://www.un.org/ru/roadsafety/documents.shtml>. Повышение безопасности дорожного движения во всем мире / Резолюция, принятая Генеральной Ассамблеей 12 апреля 2018 года No 72/271. URL: <https://undocs.org/ru/A/RES/72/271>. Global status report on road safety. World Health Organization. http://www.who.int/violence_injury_prevention/publications/ru

³ Статистика ДТП в России / 1GAI. URL: <http://www.1gai.ru>

женных ограничений на передвижения вследствие пандемии, вызванные коронавирусом в 2020 г., будут еще более заметными. Поэтому целесообразность таких решений, как строительство многоуровневых развязок, новых дорог и тротуаров, обеспечение нормативных требований и научных исследований по БДД не вызывает сомнений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поставленных целей предполагается достичь, выполнив ряд задач, среди которых развитие принципов автоматизации управления дорожным движением, внедрение интеллектуальной транспортной системы (ИТС). Основной объем аварийности происходит на индивидуальном транспорте. В этой связи особое значение приобретает поддержка общественного транспорта [5, 6]. В США объем субсидий составляет 57–89% от тарифа, в странах ЕС – 25–50% [7, 9, 10, 11].

Эстония стала первой европейской страной, которая ввела бесплатный проезд на общественном транспорте на значительной части территории страны⁴. В 11 из 15 уездов с 1 июля 2018 г. пассажиры могут бесплатно пользоваться муниципальными автобусами.

Первой страной мира с полностью бесплатным общественным транспортом (автобусы, трамваи и поезда) стал с 29 февраля 2020 г. Люксембург.

При использовании бесплатного общественного транспорта снижаются издержки по продаже и изготовлению билетов, талонов и проездных. Отсутствует необходимость контроля проезда в транспорте пассажиров, что позволяет отказаться от использования турникетов и валидаторов в метро или в наземных средствах транспорта, а также от работы билетных инспекторов и их часто дорогостоящей экипировки (спецодежда, устройства проверки и выдачи билетов, нагрудные видеорегистраторы), что также повышает экономическую выгоду бесплатного проезда для транспортных компаний.

Кроме того, при работе системы бесплатного общественного транспорта в крупных городах повышается привлекательность пользования таким транспортом горожанами и туристами, а значит и отказ некоторых из них от использования личного автотранспорта для поездок на работу, учёбу и т. д. Сокращение

же числа личных автомобилей на улицах города может привести к некоторому уменьшению загруженности дорог и снижению вероятности возникновения дорожных пробок и аварий.

Спустя два года после принятия Стратегии, в 2020 г., появилась первая реакция МВД РФ по этой проблеме. Это предложение МВД («Ведомости» от 20.07.2020 г.) пересмотреть целевой норматив смертности в ДТП в сторону ослабления. В министерстве считают, что достичь этого практически невозможно, а целевой норматив нужно изменить до показателя 8,4 смерти на 100 тыс. чел. Сомнения экспертов основаны на том, что в мировой практике не было такого резкого снижения смертности за семь лет. Окончательные решения по нормативам будут принимать проектный комитет нацпроекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» и президиум Совета при президенте по стратегическому развитию и нацпроектам.

В этой связи хотелось бы отметить следующее. Решение о ее невыполнимости не базируется на серьезном анализе всех вариантов, специалисты СибАДИ уверены, что при упорной работе по научно-обоснованному сценарию эта проблема будет решена [12, 13].

В ходе исследований была установлена цикличность динамики ДТП в масштабах страны и их последствий. Получена устойчивая зависимость числа погибших на дорогах от состояния экономики, а именно: начало каждого кризиса сопровождается уменьшением количества и тяжести ДТП. Это связано с падением покупательской способности населения, снижением экономической активности, суммарного пробега и частоты использования автомобилей. В период восстановления экономики показатели аварийности постепенно восстанавливаются, и тем они выше, чем выше рост экономики. Эти тенденции устойчивы и наблюдаются в период последних кризисов 1998, 2008 и 2014 гг. В связи с этим для реализации Стратегии безопасности дорожного движения на 2018–2024 гг. необходимо учитывать полученные результаты.

В периоды кризисов особое значение для снижения ДТП имеет развитие общественного транспорта и грузовой логистики [14, 15].

Второй подход (проектный) связан с реализацией нацпроекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» на основе

⁴ Бесплатный общественный транспорт // Википедия – свободная энциклопедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 23.10.2020).

научных достижений. Существует методика исследования по системе ВАДС (водитель-автомобиль-дорога-среда) [16]. В набор мероприятий входит повышение безопасности всех элементов транспортной инфраструктуры, в первую очередь в очагах аварийности. Результаты исследований могут быть использованы в целях профилактики ДТП, для планирования сил и средств реагирования на ДТП со стороны экстренных служб, перспективной основой по развитию интеллектуальной транспортной системы управления безопасностью станут методы нечеткой логики и алгоритмы нейронных сетей. Влияние выявленных неблагопри-

ятных факторов можно минимизировать с помощью оповещения водителей о повышенном риске возникновения ДТП, а также принятии комплекса иных мер [17].

Региональный проект программы БДД Омской области на 2019–2024 гг. базируется на показателях Стратегии (таблица 2). Определено финансирование проекта в рамках национального проекта БКАД до 2024 г. в объеме 3 384,5 млрд руб. (таблица 3).

Особо следует отметить привлечение науки к реализации проекта. Речь идет о СибАДИ, его участии в проекте определено в 13 разделах из общего количества 46 (таблица 4).

Таблица 2
Цель и показатели регионального проекта БДД

Table 2
Objective and indicators of the regional road safety project

Снижение смертности в результате ДТП в 3,5 раза по сравнению с 2017 г. – до уровня, не превышающего четырех человек на 1000 тыс. населения к 2024 г.								
Наименование показателя	Базовое значение		Период, год					
	Значение	Дата	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Уровень социального риска (количество погибших)	11	31.12.17	10	9,24	8,27	7,1	5,42	3,14

Таблица 3
Финансовое обеспечение реализации проекта БДД в Омской области

Table 3
Financial support for the implementation of the road safety project in the Omsk region

Источник финансирования	Год реализации						Всего
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
Бюджетные источники (млн руб.), в том числе:	666,22	540,42	625,53	632,33	460,0	460,0	3 384,5
- иные межбюджетные трансферты	3,9	0	0	0	0	0	3,9
- консолидированный бюджет Омской области	662,32	540,42	625,53	632,33	460,0	460,0	3 380,6

Таблица 4
План мероприятий с участием СибАДИ по реализации регионального проекта БДД

Table 4
Action plan with the participation of SibADI for the regional road safety project implementation

Наименование результата, мероприятия, контрольной точки	Срок реализации		Ожидаемый результат
	начало	окончание	
Обеспечено функционирование учебного центра ФГБОУ ВО «СибАДИ» с укомплектованием его необходимым оборудованием и методическими материалами для дополнительного обучения участников дорожного движения различных групп населения навыкам безопасного поведения на дороге и безаварийной езды	1 января 2019 г.	31 декабря 2024 г.	Показатель: обеспечено функционирование учебного центра к определенному сроку

Продолжение таблицы 4

Наименование результата, мероприятия, контрольной точки	Срок реализации		Ожидаемый результат
	начало	окончание	
На базе учебного центра ФГБОУ ВО «СибАДИ» проведены курсы обучения участников дорожного движения (различных групп населения) навыкам безопасного поведения на дороге и безаварийной езды	1 января 2019 г.	31 декабря 2024 г.	Показатель: проведено дополнительное обучение не менее 12 учебных групп в течение года
Разработаны практические тренинги для работников страховых организаций по теме «Реконструкция дорожно-транспортных происшествий»	1 января 2020 г.	31 декабря 2020 г.	Консультирования заинтересованных лиц по вопросам реконструкции механизма ДТП, повышение технической грамотности специалистов
Проведены брифинги (круглых столов) по вопросам безопасности дорожного движения с их трансляцией в СМИ и сети Интернет	1 января 2019 г.	31 декабря 2024 г.	Ежегодный отчет (показатель: проведено не менее 4 брифингов (пресс-конференций) в течение года)
Обеспечено повышение квалификации педагогов общеобразовательных организаций в сфере профилактики дорожно-транспортного травматизма; повышение квалификации педагогических работников по обучению водителей транспортных средств на базе Федерального учебного центра по повышению квалификации работников, занимающихся подготовкой водителей ФГБОУ ВО «СибАДИ»	1 января 2020 г.	31 декабря 2024 г.	Информационно-аналитический отчет
Повышение квалификации педагогов общеобразовательных организаций в сфере профилактики дорожно-транспортного травматизма; повышение квалификации педагогических работников по обучению водителей транспортных средств на базе Федерального учебного центра по повышению квалификации работников, занимающихся подготовкой водителей ФГБОУ ВО «СибАДИ»	1 января 2020 г.	31 декабря 2024 г.	Информационно-аналитический отчет
Повысили квалификацию педагогов общеобразовательных организаций в сфере профилактики дорожно-транспортного травматизма и педагогические работники по обучению водителей транспортных средств, не менее 100 чел.	-	31 декабря 2024 г.	Информационно-аналитический отчет
Создана региональная детско-юношеская автомобильная школа (ДЮАШ)	1 января 2019 г.	31 декабря 2021 г.	Профилактика детского дорожно-транспортного травматизма, организация досуга школьников, агитация к занятиям спортом
Организовано обучение школьников основам безопасного поведения по программе «Юный инспектор»	1 января 2019 г.	31 декабря 2020 г.	Профилактика детского дорожно-транспортного травматизма
Разработаны методические рекомендации по обучению школьников безопасному участию в дорожном движении для проведения практических занятий в СОШ	1 января 2019 г.	31 декабря 2020 г.	Методические пособия по организации работы с детьми и подростками (на основе метапредметного подхода)
Проведено социальное мероприятия по повышению транспортной культуры среди населения «Безопасность дорожного движения»	1 января 2020 г.	31 декабря 2020 г.	Проведение агитационных мероприятий по повышению транспортной культуры среди населения
Создание на базе лаборатории «Цифровые системы безопасности дорожного движения» ФГБОУ ВО «СибАДИ» полигона цифровых систем БДД	1 января 2020 г.	31 декабря 2020 г.	Действующий полигон для тестирования и отладки цифровых систем БДД, адаптированных к условиям Омского региона
Решение задач снижения мест концентрации ДТП с применением проектных решений лаборатории «Цифровые системы безопасности дорожного движения» ФГБОУ ВО «СибАДИ»	1 января 2020 г.	31 декабря 2024 г.	Предпроектные решения по внедрению цифровых систем БДД на местах концентрации ДТП

Участие СибАДИ обусловлено открытием в 2018 г. Федерального учебного центра по повышению квалификации работников, занимающихся подготовкой водителей, наличием научной школы и выпускающей кафедры «Организация и безопасность движения». Планируется изучение возможности применения новых форм контроля отдельных фаз движения транспортных средств и причин аварий с пешеходами [18, 19, 20]. Интересен опыт польских специалистов по использованию методов нечеткой логики для улучшения работы светофоров и стимулирования велосипедного движения [21, 22].

Опыт стран, положивших начало деятельности на пути к нулевой аварийности, таких как Нидерланды и Швеция (отличаются одним из наименьших рисков гибели в ДТП), показывает, что каждая страна проходит свой путь, определяемый культурными, временными и местными условиями, однако такой путь должен начинаться с понимания того, что ДТП объясняется недостатками работы системы обеспечения БДД [23]. Российские исследователи также считают, что в настоящее время имеется потенциал для большего снижения аварийности [24, 25].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Причиной невыполнения прошлых программ повышения БДД явилась чрезмерная централизация работ и недостаточное финансирование. Особенно это касается отсутствия финансирования научно-исследовательских работ на местах в регионах. Опыт СибАДИ в данных исследованиях показал, что научные рекомендации способны вдвое сократить травматизм и смертность на дорогах только за счет организационных мероприятий.

В данной ситуации необходимо учесть наш прошлый опыт и сделать выводы. Проектный подход через национальные проекты может дать положительный результат при выполнении ряда условий по финансированию и организации работ.

Ряд городов уже выполнил задачи Стратегии на 2024 г. – это Москва, Санкт-Петербург, Новосибирск, Сургут. Показатель социального риска в них – 4 погибших на 100 тыс. жителей.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной вопрос реализации проекта БДД – четкое финансирование и контроль исполнения научно-обоснованных мероприятий. К сожалению, такие исследования не финансируются целевым образом. Система грантов не позволяет провинциальным вузам конкурировать по количеству докторов наук или публи-

кациям в зарубежных изданиях. Но научный потенциал целесообразнее использовать на местах приложения знаний, что позволит учитывать местные особенности.

Для этого расходы на реализацию программ БДД целесообразно отнести к социально-защищенным статьям бюджета, а научные исследования сделать целевым госзаказом для профильных вузов.

Большое значение для повышения БДД имеет развитие общественного транспорта в городах и регионах. Особенно это касается реформирования недостроенных метрополитенов, где омертвляется огромный социальный, экономический и транспортный потенциал. Положения Стратегии должны найти отражения во всех планах развития градостроительства и инфраструктуры, а также в нормативной и законодательной базе отрасли.

Считаем целесообразным провести широкое обсуждение этой проблемы. Хочется напомнить, что в борьбе с пандемией наша страна достигла наилучших результатов в мире, а в сфере БДД мы уже не стремимся к этому. Хотя и здесь речь идет о сохранении жизни людей, а потери намного больше. Странно, что эта мысль не приходит в голову противникам Стратегии БДД. В последнем указе президента основной целью государства провозглашается сохранение жизни населения. Когда мы хотим, то спокойно обходим всех в мире.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тохиров Т.И. Роль автомобильного транспорта в формировании экономического пространства [Электронный ресурс] // LI International Scientific Review of the Problems and Prospects of Modern Science and Education. – 2018. – Режим доступа: <https://scientific-conference.com/images/PDF/2018/53/rol-avtomobilnogo-1.pdf> (дата обращения: 02.01.2020).
2. Кузнецов В.Н. Анализ корреляционных связей между уровнем автомобилизации и экономическим развитием регионов // Modern Science. 2019. № 5–3. С. 262–265.
3. Печатнова Е.В. Взаимосвязь показателей автомобилизации и аварийности на примере регионов Сибирского федерального округа // Инновационный транспорт. 2019. № 1 (31). С. 54–57.
4. Печатнова Е.В. Дорожно-транспортная аварийность как социально-экономическая проблема // Форум молодых ученых. 2018. № 11–2 (27). С. 385–389.
5. Miloš Poliak et. al. Financing Public Transport Services From Public Funds // Transport Problems. 2017. Volume 12. Issue 4. P 61–72.
6. Evan, L. Traffic Safety. Bloomfield Hills: Science Serving Society. 2004.
7. Gitelman, V. & Vis, M. & Weijermars, W. & Hakkert, S. Development of Road Safety Performance Indicators for the European Countries // Advances

in *Social Sciences Research Journal*. 2014. Vol. 1. No. 4. P. 138-158.

8. Poliak, M. Relation of reasonable profit and risk in mass passenger transport in Slovakia // *Journal of Economics*. 2013. Vol. 61. No. 2. P. 206–220.

9. Tscharaktschiew, S. & Hirte, G. Should subsidies to urban passenger transport be increased? A spatial CGE analysis for a German metropolitan area // *Transportation Research A: Policy Practice*. 2012. Vol. 46. No. 2. P. 285-309.

10. Parry, I.W.H. & Small, K. A. Should urban transit subsidies be reduced? // *American Economic Review*. 2009. Vol. 99. No. 3. P. 700–724.

11. Печатнова Е.В. Анализ особенностей успешных зарубежных стратегий по повышению безопасности дорожного движения // *Вестник Прикамского социального института*. 2019. № 3 (84). С. 57–61.

12. Сафронов Э.А., Сафронов К. Э., Семенова Е. С. Влияние экономики на уровень безопасности дорожного движения // *Автомобильный транспорт*. 2017. № 11. С. 32-37.

13. Сафронов Э.А., Сафронов К. Э., Семенова Е.С. Методы повышения результативности «Стратегии безопасности дорожного движения в Российской Федерации на 2018–2024 годы» // *Автомобильный транспорт*. 2018. № 5. С. 34–39.

14. Pourbaix J. Towards a smart future for cities'. Journeys. URL: http://itaacademy.gov.sg/doc/J12%20May07Jerome_Towards%20a%20Smart%20Future%20for%20Cities.pdf.

15. Transport Outlook: Meeting the Needs of 9 Billion People / Organization for Economic Development // *International Transport Forum*. Paris. URL: <http://www.internationaltransportforum.org/Pub/pdf/11Outlook.pdf>.

16. Новиков И.А. Управление и организация дорожного движения при оценке единичного элемента системы ВАДС / И.А. Новиков, А.Е. Боровской, А.Г. Шевцова // В сборнике: Информационные технологии и инновации на транспорте. Материалы Международной научно-практической конференции. 2015. С. 231–238.

17. Капский Д.В., Рябчинский А. И. Совершенствование метода прогнозирования аварийности по конфликтным ситуациям // *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. 2016. № 2 (45). С. 94–103.

18. Jezierska-Krupa, K. et. al. Advanced Driver Safety Support Systems For The Urban Type Vehicle // *Transport problems*. 2015. Volume 10. Issue 4. P. 137-148.

19. Jenn-Rong Lin et.al. A hub location inventory model for bicycle sharing system design: Formulation and solution. *Comp. & Industrial // Engineering Intelligent Manufacturing Systems*. 2013. Vol. 65. No. 1: 77-86.

20. National Highway Traffic Safety Administration. Traffic Safety Facts 2013. Data – Pedestrians / Washington, DC: US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration. 2015. URL: <http://www.nrd.nhtsa.dot.gov/Pubs/812124.pdf>.

21. Makarova, I. et. al. On the Crosswalks with the use of Fuzzy Logic // *Transport Problems*. 2018. Volume 13. Issue 1.

22. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development / Resolution adopted by

the General Assembly on 25 September 2015. URL: http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E.

23. Koryagin M.E., Medvedev V.I., Strykov P.G. Development of safe routes for children in urban environment // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Current Problems and Solutions*. 2018. C. 012029.

24. Печатнова Е.В., Сафронов К. Э. Оценка влияния количества осадков на аварийность на дорогах вне населенных пунктов // *Вестник СибАДИ*. 2020. Том 17, № 4. 2020. С. 512–522. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-512-522>.

25. Pechatnova E. V., Sergeeva Ja. S. Assessment of Influence of Meteorological Parameters on the Risk of Accidents on Roads Outside Settlements // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2019; 272. 022175. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/2/022175>.

REFERENCES

1. Tohirov T.I. Rol' avtomobil'nogo transporta v formirovanii jekonomicheskogo prostranstva [The role of road transport in the formation of the economic area] [Elektronnyj resurs] // *LI International Scientific Review of the Problems and Prospects of Modern Science and Education*. – 2018. – URL: <https://scientific-conference.com/images/PDF/2018/53/rol-avtomobilnogo-1.pdf> (data obrashhenija 02.01.2020). (In Russian)

2. Kuznecov, V.N. Analiz korrelyacionnyh svyazey mezhdu urovnem avtomobilizacii i jekonomicheskim razviti-em regionov [Analysis of correlations between the level of motorization and the economic development of regions] // *Modern Science*. – 2019; 5-3: 262-265. (In Russian)

3. Pechatnova, E.V. Vzaimosvjaz' Pokazatelej avtomobilizacii i avarijnosti na primere regionov Sibirskogo federal'nogo okruga [The relationship between the indicators of motorization and accident rate on the example of the regions of the Siberian Federal District] // *Innovacionnyj transport*. – 2019; 1 (31): 54-57. (In Russian)

4. Pechatnova, E.V. Dorozhno-transportnaja avarijnost' kak social'no-jekonomicheskaja problema [Road traffic accidents as a socio-economic problem] // *Forum molodyh uchenyh*. 2018;11-2 (27): 385-389. (In Russian)

5. Miloš Poliak et. al. Financing Public Transport Services From Public Funds // *Transport Problems*. 2017. 12. 4: 61-72.

6. Evan, L. Traffic Safety. Bloomfield Hills: *Science Serving Society*. 2004.

7. Gitelman, V. & Vis, M. & Weijermars, W. & Hakert, S. Development of Road Safety Performance Indicators for the European Countries // *Advances in Social Sciences Research Journal*. 2014; 1. 4:138-158.

8. Poliak, M. Relation of reasonable profit and risk in mass passenger transport in Slovakia // *Journal of Economics*. 2013. 61. 2: 206-220.

9. Tscharaktschiew, S. & Hirte, G. Should subsidies to urban passenger transport be increased? A spatial CGE analysis for a German metropolitan area // *Transportation Research A: Policy Practice*. 2012; 46. 2: 285-309.

10. Parry, I.W.H. & Small, K. A. Should urban transit subsidies be reduced? // *American Economic Review*. 2009; 99. 3: 700-724.

11. Pechatnova, E.V. Analiz osobennostej uspešnyh zarubezhnyh strategij po povyšeniю bezopasnosti dorozhnogo dvizhenija [Analysis of the features of successful foreign strategies to improve road safety] // *Bulletin of prikamsky social institute*. 2019; 3 (84): 57-61. (In Russian)

12. Safronov, Je.A. Vlijanie jekonomiki na uroven' bezopasnosti dorozhnogo dvizhenija [The impact of the economy on road safety] // *Avtomobil'nyj transport*. 2017. № 11: 32-37. (In Russian)

13. Safronov, Je.A. Metody povyšeniya rezul'tativnosti "Strategii bezopasnosti dorozhnogo dvizhenija v Ros-sijskoj Federacii na 2018–2024 gody" [Methods for improving the effectiveness of the 'Road Safety Strategy in the Russian Federation for 2018-2024'] // *Avtomobil'nyj transport*. 2018; 5: 34-39. (In Russian)

14. Pourbaix J. Towards a smart future for cities'. *Journeys*. URL: http://itaacademy.gov.sg/doc/J12%20Mayp07Jerome_Towards%20a%20Smart%20Future%20for%20Cities.pdf.

15. Transport Outlook: Meeting the Needs of 9 Billion People / Organization for Economic Development // International Transport Forum. Paris. URL: <http://www.internationaltransportforum.org/Pub/pdf/11Outlook.pdf>.

16. Novikov, I.A. Upravlenie i organizacija dorozhnogo dvizhenija pri ocenke edinichnogo jelementa sistemy "VADS" [Traffic management and organization in the evaluation of a single element of the VADS system] // *V sbornike: Informacionnye tehnologii i innovacii na transporte. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii*. 2015: 231-238. (In Russian)

17. Kapskij, D.V. Sovershenstvovanie metoda prognozirovaniya avarijnosti po konfliktnym situacijam [Improving the method of predicting accidents in conflict situations] // *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta (MADI)*; 2016. 2 (45): 94-103. (In Russian)

18. Jezierska-Krupa, K. et. al. Advanced Driver Safety Support Systems For The Urban Type Vehicle // *Transport problems*. 2015. 10. 4: 137-148.

19. Jenn-Rong Lin et.al. A hub location inventory model for bicycle sharing system design: Formulation and solution. *Comp. & Industrial Engineering Intelligent Manufacturing Systems*. 2013. Vol. 65. No. 1. P. 77-86.

20. National Highway Traffic Safety Administration. Traffic Safety Facts 2013. Data – Pedestrians / Washington, DC: US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration. 2015. URL: <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/Pubs/812124.pdf>.

21. Makarova, I. et. al. On the Crosswalks with the use of Fuzzy Logic // *Transport Problems*. 2018. Volume 13. Issue 1.

22. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development / Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. URL: http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E.

23. Koryagin M.E., Medvedev V.I., Strykov P.G. Development of safe routes for children in urban environment // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Current Problems and Solutions*. 2018. S. 012029.

24. Pechatnova, E.V. Ocenka vlijanija količestva osadkov na avarijnost' na dorogah vne naselennyh punktov [Assessment of the impact of precipitation on accidents on roads outside of localities] / E.V. Pechatnova, K.Je. Safronov // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17, 2020: 512-522. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-512-522>. (In Russian)

25. Pechatnova E. V., Sergeeva Ja. S. Assessment of Influence of Meteorological Parameters on the Risk of Accidents on Roads Outside Settlements // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2019. 272. 022175. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/2/022175>.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Сафронов Э.А. Вклад в общую работу составил 75%, что является $\frac{3}{4}$ доли при разработке следующих разделов научной статьи: аннотации, введения, материалов и методов, результатов, обсуждения и заключения.

Сафронов К.Э. Вклад в общую работу составил 25%, что является $\frac{1}{4}$ доли при разработке следующих разделов научной статьи: аннотации, введения, результатов, обсуждения и заключения, редактирование статьи.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Eduard A. Safronov, the contribution to the overall work was 75%, which is $\frac{3}{4}$ share in the development of the following sections of a scientific article: abstracts, introduction, materials and methods, results, discussion and conclusion.

Kirill E. Safronov, the contribution to the overall work was 25%, which is $\frac{1}{4}$ of the share in the development of the following sections of a scientific article: abstracts, introduction, results, discussions and conclusions, editing the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сафронов Эдуард Алексеевич – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Организация и безопасность движения» ФГБОУ ВО СибАДИ. ORCID 0000-0002-7807-3897 (644080, Россия, г. Омск, пр. Мира, 5, sibadi1@rambler.ru).

Сафронов Кирилл Эдуардович – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Эксплуатация и ремонт автомобилей» ФГБОУ ВО СибАДИ. ORCID 0000-0003-3849-6761 (644080, Россия, г. Омск, пр. Мира, 5, transistem@rambler.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Eduard A. Safronov (Omsk, Russia) – Dr. of Sci., Professor, Professor of the Organization and Road Traffic Safety Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), ORCID 0000-0002-7807-3897 (644080, Russia, Omsk, 5 Mira Avenue, sibadi1@rambler.ru).

Kirill E. Safronov (Omsk, Russia) – Dr. of Sci., Associated Professor, Professor of the Automobile Transport Operation and Maintenance Department, Siberian State Automobile and Road University (SibADI), ORCID 0000-0003-3849-6761 (644080, Russia, Omsk, 5 Mira Avenue, transistem@rambler.ru).

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗНОСА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЩЁТКИ НА ЕЁ УПРУГУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ, НА ТРЕБУЕМОЕ УСИЛИЕ ПРИЖАТИЯ И НА ДАВЛЕНИЕ НА ВЫХОДЕ ГИДРОПНЕВМОАККУМУЛЯТОРА УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ ЩЕТОЧНОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА

С.И. Цехош*, Б.В. Журавский, П.И. Цехош

ФГБОУ ВО «СибАДИ»,

г. Омск, Россия,

* tsehosh.lyubov@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена актуальной проблеме повышения качества очистки дорожного покрытия и повышению ресурса щеточного рабочего оборудования. Повышение качества очистки и ресурса щеточного рабочего оборудования позволит уменьшить затраты на работу коммунальной машины. В процессе работы ворс цилиндрической щётки изнашивается, при этом изменяются его упругие характеристики, что отражается на требуемом усилии прижатия для поддержания наиболее выгодного значения ширины пятна контакта из условия обеспечения высокого качества очистки и минимальной интенсивности износа ворса.

Материалы и методы. Представлены результаты исследований взаимодействия ворса цилиндрической щётки с очищаемой поверхностью при различных степенях износа ворса щётки. Результаты исследований даны в аналитическом и графическом видах. Расчёты осуществлялись при помощи программного продукта Microsoft Excel и программной среды математических вычислений Mathcad.

Результаты. В работе приведена зависимость степени износа ворса щеточного рабочего оборудования от фактического радиуса цилиндрической щётки. Показана в виде графика зависимость ширины пятна контакта от деформации цилиндрической щётки при различных степенях износа. Рассмотрено влияние степени износа на упругую характеристику щеточного рабочего оборудования. Приведены зависимости среднего коэффициента жесткости от степени износа ворса цилиндрической щётки, а также требуемого усилия прижатия от степени износа при разных величинах ширины пятна контакта цилиндрической щётки. Получена зависимость давления в гидropневмоаккумуляторе устройства управления положением щеточного рабочего органа от фактической свободной длины прутка ворса цилиндрической щётки.

Обсуждение и заключение. Результаты выполненной работы позволят учитывать влияние степени износа ворса цилиндрической щётки на её упругие характеристики при имитационном моделировании работы коммунальной машины, оснащенной устройством управления положением щеточного рабочего органа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цилиндрическая щётка, ширина пятна контакта, износ ворса, сила прижатия, коэффициент жесткости.

Поступила 10.12.20, принята к публикации 26.02.21.

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: Цехош С.И. Исследование влияния износа цилиндрической щётки на её упругую характеристику, на требуемое усилие прижатия и на давление на выходе гидropневмоаккумулятора устройства управления положением щеточного рабочего органа / С.И. Цехош, Б.В. Журавский, П.И. Цехош. – DOI <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-106-119> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 1(77). – С. 106–119.

© Цехош С.И., Журавский Б.В., Цехош П.И., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-106-119>

STUDY OF CYLINDRICAL BRUSH WEAR EFFECT ON ITS ELASTIC CHARACTERISTICS, ON REQUIRED PRESSING FORCE AND ON PRESSURE AT THE OUTLET OF HYDRAULIC PNEUMATIC ACCUMULATOR FOR CONTROLLING POSITION OF CHIPPING WORKING BODY

Sofia I. Tsekhosh, Boris V. Zhuravsky, Pavel I. Tsekhosh*

*Siberian Automobile and Highway University,
Omsk, Russia*

** tsekhosh.lyubov@yandex.ru*

ABSTRACT

Introduction. The article is devoted to a current issue of improving the quality of road surface cleaning and increasing the resource of brush working equipment. Improving the quality of cleaning and the resource of the brush working equipment will reduce the cost of operating a communal machine. In the process of operation, the pile of the cylindrical brush is worn out, while its elastic characteristics change, which is reflected in the required pressing force to maintain the most favorable value of the width of the contact spot from the condition of ensuring high quality cleaning and minimal intensity of pile wear.

Materials and methods. The results of studies of the interaction of the pile of a cylindrical brush with the surface to be cleaned are presented at various degrees of wear of the brush pile. The research results are presented in analytical and graphical forms. The calculations were carried out using the Microsoft Excel software product and the Mathcad software environment for mathematical calculations.

Results. The paper shows the dependence of the degree of wear of the pile of the brush working equipment on the actual radius of the cylindrical brush. The relationship between the width of the contact spot and the deformation of the cylindrical brush at different degrees of wear and tear is shown as a graph. The influence of the degree of wear on the elastic characteristics of the brush working equipment is considered. The dependences of the average stiffness coefficient on the degree of wear of the pile of a cylindrical brush, as well as the required pressing force on the degree of wear at different values of the width of the contact patch of the cylindrical brush are given.

KEYWORDS: cylindrical brush, contact patch width, piles wear, pressing force, stiffness coefficient.

Submitted 10.12.20, revised 26.02.21.

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: Tsekhosh S.I., Zhuravsky B.V., Tsekhosh P.I. Study of cylindrical brush wear effect on its elastic characteristics, on required pressing force and on pressure at the outlet of hydraulic pneumatic accumulator for controlling position of chipping working body. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (1):106-119. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-106-119>

© Tsekhosh S.I., Zhuravsky B.V., Tsekhosh P.I., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Для очистки дорожного покрытия от загрязнений применяются коммунальные машины с щётчным рабочим оборудованием. При этом наибольшее распространение получило щёточное рабочее оборудование с цилиндрическими щётками, имеющими ворс из полимерного материала [1, 2, 3]. Цилиндрические щетки состоят из отдельных щеточных дисков, смонтированных на общем конструктивном элементе – барабане, посредством которого дискам сообщается вращательное движение. Одной из наиболее распространенных коммунальных машин в России в настоящее время является уборочная техника на базе тракторов МТЗ «Беларус» с щётчным рабочим оборудованием типа цилиндрической щётки, предназначенная для очистки проезжей части улиц, дорог, тротуаров и площадей от снега, песка, листьев и прочего мусора.

Основным достоинством таких коммунальных машин является многофункциональность, а также легкость монтажа-демонтажа сменного щёточного рабочего оборудования. Применяемое в настоящее время щёточное рабочее оборудование может иметь механический либо гидравлический привод вращения цилиндрической щётки, оснащаться бункером для сбора загрязнений, а также системой орошения для уменьшения пылеобразования. Для регулирования и поддержания необходимой величины ширины пятна контакта при работе

щёточного рабочего оборудования используются пневматические опорные катки (рисунок 1, а, б, в).

Основные технические характеристики наиболее распространенных моделей щёточного рабочего оборудования представлены в таблице 1. Из представленных данных следует, что в составе рассмотренных щёток применяются цилиндрические щётки с номинальным диаметром $d_n = 0,55$ м. Рекомендуемая толщина используемого ворса зависит от сезона эксплуатации и вида загрязнений. В зимний период рекомендуемая толщина ворса составляет $3,2 \cdot 10^{-3}$ м, а в летний, для уборки песчинок песка, листьев – $(1,5-3,0) \cdot 10^{-3}$ м, для уборки строительного мусора $4,0 \cdot 10^{-3}$ м. Ширина рабочей зоны варьируется в диапазоне от 1,44 до 2,00 м, масса щёточного рабочего оборудования находится в диапазоне от 220 до 400 кг, рекомендуемая угловая скорость цилиндрической щётки – от 27 до 56 рад/с, рекомендуемая скорость движения коммунальных машин в режиме очистки – от 1,9 до 3,6 м/с.

В результате анализа конструкций существующих щёток было выявлено, что цилиндрическая щётка устанавливается под углом 15° ; 25° ; 30° или 60° относительно продольной оси коммунальной машины. Число дисков щёточного рабочего оборудования находится в диапазоне 43–47 дисков. В качестве материала для изготовления щеточных дисков используется морозостойкий полипропилен марки ВА 204 Е и его аналоги.



а – KOVACO Kerhmaschine 1.8m



б – цилиндрическая щётка МК-1



в – цилиндрическая щётка МКП (МК-7)

Рисунок 1 – Основные разновидности конструкций щёточного рабочего оборудования

Figure 1 – The main types of brush working equipment designs

Таблица 1
Основные технические характеристики разных моделей щёточного рабочего оборудования

Table 1
Main technical characteristics of different models of brushed implements

Модель щёточного рабочего оборудования	Производитель	Масса щёточного рабочего оборудования, кг	Угловая скорость цилиндрической щётки, рад/с	Скорость коммунальной машины, м/с	Номинальный диаметр цилиндрической щётки, м	Ширина рабочей зоны, м
УМДУ-80 ЛЮКС	ПМК-567	290	56	2,8	0,550 ± 0,02	1,80
МК-454	ООО «Сальксельмаш»	330	27	3,6	0,550 ± 0,02	1,80
МК-2,0	ООО «Сальксельмаш»	435	27	3,6	0,550 ± 0,02	1,80
ЩД-01	н/д	345	29	2,5	0,550	2,00
УМДУ 80/82	ПМК-67	500	56	2,8	0,550 ± 0,02	1,70
МКП (МК-7)	ООО «Сальксельмаш»	345	27	3,6	0,550 ± 0,02	2,00
Буран-22	ООО «Территория»	350	56	2,8	0,550 ± 0,02	2,00
МК-1	ООО «Сальксельмаш»	435	–	3,6	0,550 ± 0,02	1,80
МКЩ-1,5	ООО «Сальксельмаш»	286	27	2,5	0,550 ± 0,02	1,44
ЩН-1.8	н/д	400	27	2,5	0,550	1,80
ЩФС-2.0	ООО «Механический завод»	480	56	2	0,550	2,00
Боб Кэт (Bobcat S175)	ООО «Бобкэт-Центр»	220	37	1,9–2	0,550	1,80
KOVACO Kerhmaschine 1.8 m	KOVACO	350	31	1,9–2,8	0,550	1,80

Как показывают исследования [4, 5, 6, 7, 8], для обеспечения максимальной эффективности очистки и уменьшения интенсивности износа ворса необходимо поддерживать оптимальное значение пятна контакта цилиндрической щётки с очищаемой поверхностью. В работе [9, 10] показано, что с увеличением ширины пятна контакта цилиндрической щётки с дорожным покрытием её эффективность плавно возрастает, однако при достижении определенного значения ширины пятна контакта интенсивность роста становится практически незаметной. При дальнейшем увеличении ширины пятна контакта происходит уменьшение эффективности удаления загрязнений, при этом щётка, действуя радиально на загрязнения, способствует не уборке, а упрочнению слоя загрязнений и его сцеплению с дорожным покрытием, при этом многократно

возрастает интенсивность износа ворса [11, 12, 13, 14, 15].

Величину износа удобно оценить показателем – степень износа, который показывает, на сколько фактический радиус цилиндрической щётки отличается от номинального и предельно допустимого радиуса. Основными факторами, влияющими на интенсивность изменения степени износа ворса, являются геометрические характеристики ворсины: свободная длина, форма и размеры поперечного сечения, моменты инерции и свойства материала, из которого она изготовлена: жёсткость, коэффициенты трения о смёт и покрытие.

В работах А. Г. Лепеша, М. П. Куксова отмечается непосредственная связь между размерами ширины пятна контакта цилиндрической щётки с очищаемой поверхностью и силой прижатия к ней [16, 17, 18]. Доказано,

что для обеспечения требуемого размера ширины пятна контакта необходимо обеспечить требуемую силу прижатия ворса к очищаемой поверхности. Для цилиндрической щётки с ворсом из полимерного материала диаметром 0,55 м с целью обеспечения максимальной эффективности рабочего процесса при приемлемой интенсивности износа ворса ширина пятна контакта должна находиться в диапазоне $X_k = 0,08-0,12$ м [19]. Фактическая величина ширины пятна контакта определяется соотношением сил упругости ворса и силы прижатия цилиндрической щётки [20, 21]. Как правило, прижатие цилиндрической щётки обеспечивается за счет силы тяжести, действующей на щеточное рабочее оборудование. При этом на практике для прижатия цилиндрической щётки используется только часть силы тяжести, а другая часть воспринимается поддерживающим устройством – опорными катками, при этом гидроцилиндр не участвует в работе (плавающее положение). Данный способ не позволяет обеспечить необходимые размеры ширины пятна контакта при наличии неуправляемых перемещений щётки за счет возмущающих воздействий со стороны микрорельефа очищаемой поверхности [22, 23]. Следствием этого является уменьшение эффективности уборки от загрязнений дорожного полотна, при этом возрастает износ ворса цилиндрической щётки. Также следует отметить пониженную надежность конструкции щеточного рабочего оборудования с опорными катками, которые часто получают повреждение при очистке прибордюрного пространства, наезде на колодезный люк.

Для поддержания необходимого усилия прижатия может применяться устройство управления положением щеточного рабочего органа на основе дополнительно установленного гидропневматического аккумулятора. В работе [23] представлена схема и описание работы устройства управления с гидропневматическим аккумулятором. Гидропневмоаккумулятор при работе коммунальной машины предлагается подключать к штоковой полости гидроцилиндра. В данном устройстве управления гидроцилиндр за счет давления рабочей жидкости на выходе гидропневматического аккумулятора создает на щеточном рабочем органе усилие, приложенное в направлении, противоположном действию силы тяжести. Усилие прижатия цилиндрической щетки будет определяться как разность силы тяжести и вертикальной составляющей усилия, создаваемого гидроприводом и приложенного к щетке.

Давление в гидропневматическом аккумуляторе равно давлению в штоковой полости штатного гидроцилиндра подъема-опускания щеточного рабочего оборудования, при котором обеспечивается требуемое значение силы прижатия цилиндрической щетки.

В процессе работы коммунальной машины при очистке дорожного покрытия происходит износ ворса цилиндрической щётки, при этом изменяются её геометрические параметры и жесткость, что непосредственно влияет на значение усилия прижатия, требуемое для обеспечения необходимых геометрических характеристик ширины пятна контакта.

Целью данной статьи является обоснование необходимого изменения силы прижатия цилиндрической щётки и давления на выходе дополнительного гидропневмоаккумулятора при износе ее ворса для поддержания оптимального значения ширины пятна контакта при работе предлагаемого устройства управления в составе коммунальной машины.

Задачи исследования:

1. Установить зависимость степени износа ворса цилиндрической щётки от ее радиуса.
2. Показать зависимость деформации ворса щётки от ширины пятна контакта цилиндрической щётки при различных степенях износа ворса.
3. Рассмотреть влияние степени износа ворса на упругую характеристику цилиндрической щётки в радиальном направлении.
4. Показать зависимость среднего коэффициента жесткости ворса щётки от степени износа ворса цилиндрической щётки.
6. Установить зависимость требуемого усилия прижатия цилиндрической щётки от степени износа ворса при разных величинах ширины пятна контакта.
7. Показать зависимость *давления в гидропневмоаккумуляторе от фактической свободной длины прутка ворса цилиндрической щетки.*

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В статье произведены расчеты при уборке загрязнений, характерных для летнего сезона эксплуатации коммунальной машины.

Требуемое усилие прижатия цилиндрической щётки к очищаемой поверхности может быть определено аналитически по формуле [24, 25]:

$$F_{\text{пр}} = 0,183 \cdot E \cdot J \cdot f^{-0,5} \cdot \frac{S^6}{Y_k^8} \cdot \frac{S^6}{Y_k^8} \cdot i_{\text{ц}} \cdot \arccos\left(\frac{Y_k + r_b}{r}\right), \quad (1)$$

где $F_{\text{пр}}$ – требуемое значение силы прижатия, Н; E – модуль упругости ворса (для синтетического ворса $E = 7,1 \dots 8 \cdot 10^3$ МПа); J – момент инерции поперечного сечения прутка относительно оси, перпендикулярной плоскости вращения; f – коэффициент трения ворса о дорожное покрытие, $f = 0,2-0,3$; S – свободная длина прутка ворса, т.е. длина прутков ворса в недеформированном состоянии; Y_k – расстояние от поверхности барабана до очищаемой поверхности, м; $i_{\text{ц}}$ – общее количество прутков ворса в цилиндрической щётке; r_b – радиус барабана цилиндрической щётки; r – радиус траектории концов недеформированных ворсин цилиндрической щётки, м.

При износе ворса цилиндрической щётки будут изменяться: свободная длина прутка ворса – S , радиус траектории концов недеформированных ворсин щётки – r , расстояние от поверхности барабана до очищаемой поверхности – Y_k . Под свободной длиной прутка ворса понимается длина недеформированного прутка ворса.

Также при неизменной ширине пятна контакта с износом будет изменяться величина деформации цилиндрической щётки – $Y_{\text{цщ}}$.

Расчетная схема цилиндрической щётки показана на рисунке 2.

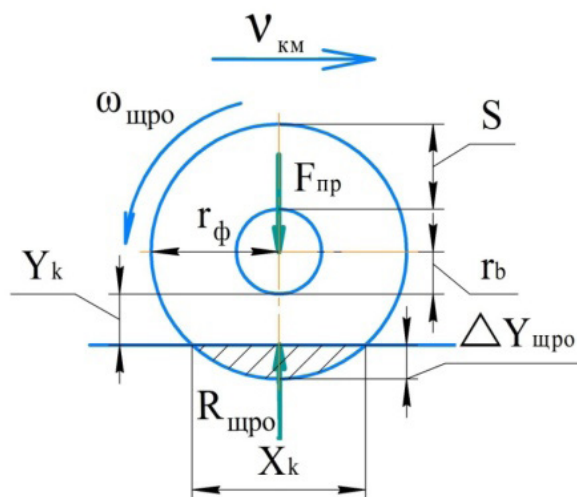


Рисунок 2 – Расчетная схема цилиндрической щётки

Figure 2 – Design scheme of a cylindrical brush

Степень износа цилиндрической щётки (C_u) можно определить по формулам:

$$C_u = \left(\frac{r_H - r_{\text{ф}}}{r_H - r_{\text{пд}}} \right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $r_{\text{ф}}$ – фактический радиус цилиндрической щётки; r_H – номинальный радиус цилиндрической щётки; $r_{\text{пд}}$ – предельно-допустимый радиус цилиндрической щётки (для цилиндрической щётки с номинальным радиусом $r_H = 0,275$ м предельно допустимый радиус $r_{\text{пд}} = 0,155$ м [26]).

$$C_u = \left(\frac{S_H - S_{\text{ф}}}{S_H - S_{\text{пд}}} \right) \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $S_{\text{ф}}$ – фактическая свободная длина прутка ворса цилиндрической щётки; S_H – номинальная свободная длина прутка ворса цилиндрической щётки; $S_{\text{пд}}$ – предельно-допустимая свободная длина прутка ворса цилиндрической щётки.

Соотношение, связывающее величину ширины пятна контакта (X_k) и деформацию цилиндрической щётки ($-$):

$$Y_{\text{цщ}} = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{X_k}{2} \right)^2}. \quad (4)$$

С учетом формулы (2) после преобразований формулы (4) получено соотношение, связывающее величину ширины пятна контакта, деформацию и степень износа цилиндрической щётки

$$Y_{\text{цщ}} = \left(r_H - \frac{C_u (r_H - r_{\text{пд}})}{100} \right) - \sqrt{\left(r_H - \frac{C_u (r_H - r_{\text{пд}})}{100} \right)^2 - \left(\frac{X_k}{2} \right)^2}. \quad (5)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Графическая зависимость деформации цилиндрической щётки ($\Delta Y_{\text{цщ}}$) от ширины пятна контакта (X_k) при различных значениях степени износа цилиндрической щётки (C_u) (для цилиндрической щётки с $r_H = 0,275$ м) показана на рисунке 3.

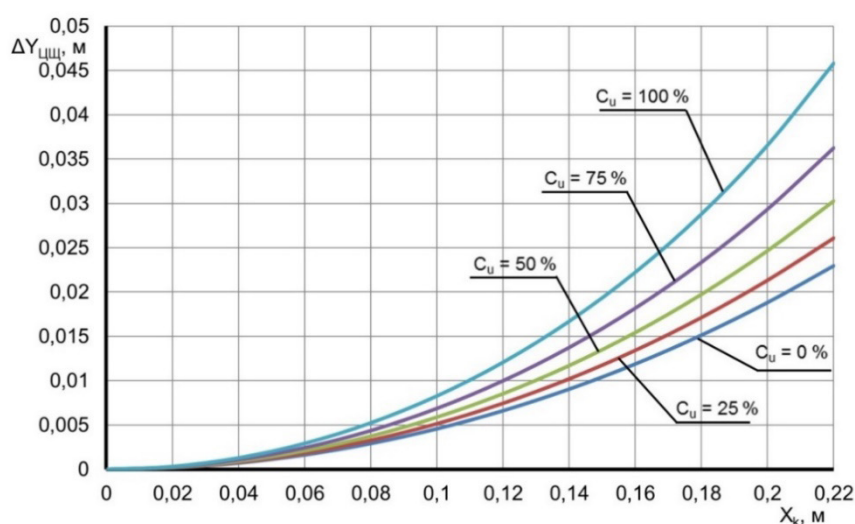


Рисунок 3 – Графическая зависимость деформации цилиндрической щётки от ширины пятна контакта при различных значениях степени износа ворса

Figure 3 – Graphical dependence of the deformation of a cylindrical brush on the width of the contact spot at different values of the degree of wear of the pile

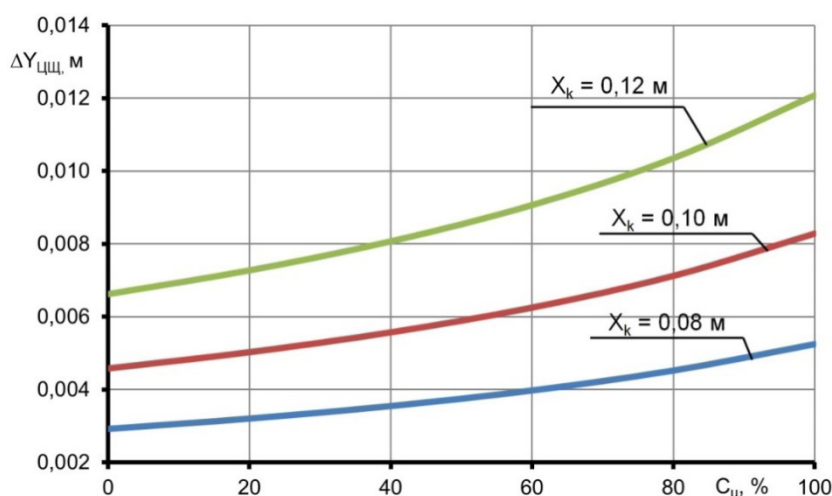


Рисунок 4 – Графическая зависимость величины деформации цилиндрической щётки от степени износа ворса при различных величинах ширины пятна контакта

Figure 4 – Graphical dependence of the amount of deformation of a cylindrical brush on the degree of wear of the pile at various widths of the contact patch

Из графика видно, что интенсивность нарастания деформации при увеличении ширины пятна контакта цилиндрической щётки тем выше, чем больше величина степени износа.

Графическая зависимость величины деформации цилиндрической щётки ($\Delta Y_{цщ}$) от степени износа при различных величинах ширины пятна контакта (X_k) (для цилиндрической щётки с $r_n = 0,275$ м) показана на рисунке 4.

Из графика видно, что интенсивность увеличения деформации при нарастании износа цилиндрической щётки тем выше, чем больше величина ширины пятна контакта.

Рассмотрено влияние износа на упругую характеристику цилиндрической щётки $\Delta Y_{цщ} = f(F_{np})$, для этого уравнение (1) преобразовано с учетом следующих выражений:

$$B = 0.183 \cdot E \cdot J \cdot f^{-0.5} \cdot i_{цщ}; \quad (6)$$

$$Y_k = r - r_b - Y_{цщ}; \quad (7)$$

$$S = r - r_b; \quad (8)$$

$$F_{\text{пр}} = B \cdot \frac{(r - r_b)^6}{(r - r_b - Y_{\text{цщ}})^8} \cdot \arccos \frac{(r - Y_{\text{цщ}})}{(r)}. \quad (9)$$

С учетом

$$r = \left(r_H - \frac{C_u (r_H - r_{\text{пл}})}{100} \right). \quad (10)$$

Получена зависимость силы прижатия ($F_{\text{пр}}$) от деформации ($\Delta Y_{\text{цщ}}$) и от степени износа цилиндрической щётки (C_u)

$$F_{\text{пр}} = B \cdot \frac{\left(\left(r_H - \frac{C_u (r_H - r_{\text{пл}})}{100} \right) - r_b \right)^6}{\left(\left(r_H - \frac{C_u (r_H - r_{\text{пл}})}{100} \right) - r_b - Y_{\text{цщ}} \right)^8} \cdot \arccos \left[1 - \frac{Y_{\text{цщ}}}{\left(r_H - \frac{C_u (r_H - r_{\text{пл}})}{100} \right)} \right]. \quad (11)$$

Для выражения функциональной зависимости $\Delta Y_{\text{цщ}} = f(F_{\text{пр}})$, выражение (11) преобразовано в уравнение вида

$$F_{\text{пр}} - f(Y_{\text{цщ}}) = 0. \quad (12)$$

Его решение найдено с помощью численных методов относительно деформации цилиндрической щётки ($\Delta Y_{\text{цщ}}$) для ряда значений силы прижатия ($F_{\text{пр}}$) и разных величинах степени износа цилиндрической щётки (C_u) с использованием пакета программ для математи-

ческих задач MathCAD 15, для многократного вычисления уравнения (11) были заданы условия расчета программы (рисунок 5). Диапазон изменения силы прижатия составлял 0...5000 Н, расчет осуществлялся с использованием оператора цикла for, число повторений цикла $v = 100$, шаг изменения силы прижатия $\Delta F = 50$ Н, результаты вычислений записываются в массив $N_{v,1}$.

В качестве исходных данных были приняты параметры цилиндрической щётки с 46 дисками с ворсом из полимерного материала (номинальный радиус $r_H = 0,275$ м, предельно допустимый радиус $r_{\text{пл}} = 0,155$ м, радиус барабана $r_b = 0,085$ м, диаметр прутка ворса $d_b = 3$ мм, общее число ворса $i_u = 17802$).

$$\Delta F_{\text{пр}} := 50 \quad \text{Н}$$

```

Z := | Fпр ← 0
      | for v ∈ 0..100
      |   | Nv,0 ← Fпр
      |   | Nv,1 ← root(f(ΔYцщро, Fпр), ΔYцщро)
      |   | Fпр ← Fпр + ΔFпр
      | N

```

Рисунок 5 – Алгоритм программы MathCAD для многократного численного решения уравнения (11)

Figure 5 – MathCAD program algorithm for multiple numerical solution of the equation (11)

Результаты вычислений представлены в графическом виде (рисунок 6).

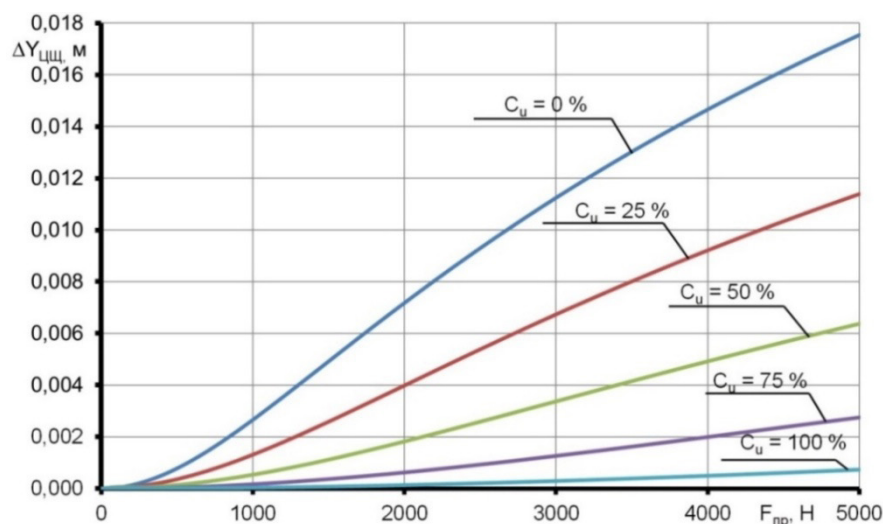


Рисунок 6 – Упругие характеристики цилиндрической щётки для разных степеней износа

Figure 6 – Elastic characteristics of a cylindrical brush for different degrees of wear

По полученным данным были определены средние коэффициенты жесткости цилиндрической щётки для разных степеней износа. Графическая зависимость среднего коэффициента жесткости ($k_{\text{щц}}$) от степени износа цилиндрической щётки представлена на рисунке 7.

Из графика видно, что с возрастанием степени износа цилиндрической щётки коэффициент жесткости увеличивается (в среднем $\Delta k_{\text{щц}} = 11$ н/мм на каждый процент износа), после достижения степени износа ($C_u = 65\%$)

интенсивность увеличения коэффициента жесткости резко возрастает (в среднем $\Delta k_{\text{щц}} = 180$ н/мм на каждый процент износа). Изменение коэффициента жесткости с износом цилиндрической щётки должно отразиться на требуемом значении усилия прижатия.

С учетом зависимости (10) для рассмотрения влияния степени износа щёточного рабочего оборудования на усилие прижатия, требуемое для поддержания определенного значения ширины пятна контакта с опорной

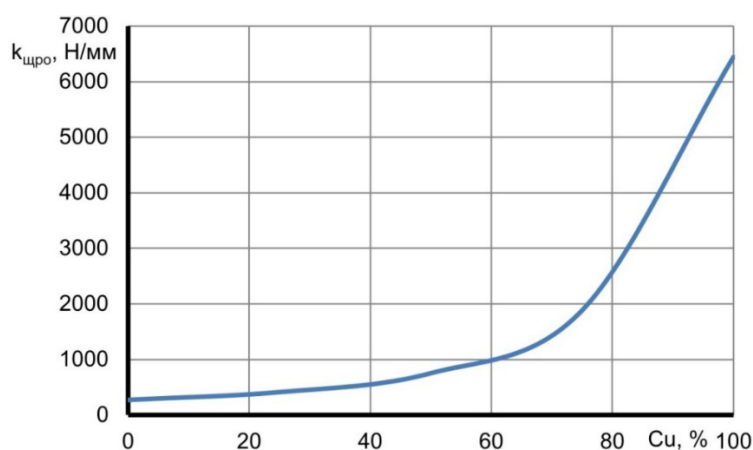


Рисунок 7 – Графическая зависимость среднего коэффициента жесткости от степени износа ворса цилиндрической щётки

Figure 7 – Graphical dependence of the average stiffness coefficient on the degree of wear of the pile of a cylindrical brush

Таблица 2
Результаты расчетов требуемого усилия прижатия цилиндрической щётки

Table 2
Calculation results of the required pressing force of the cylindrical brush

Степень износа цилиндрической щётки, C_u , %	Ширина пятна контакта, X_k					
	$X_k = 0.08$ м		$X_k = 0.10$ м		$X_k = 0.12$ м	
	Деформация, $\Delta Y_{\text{щц}}$, мм	Сила прижатия, $F_{\text{пр}}$, Н	Деформация, $\Delta Y_{\text{щц}}$, мм	Сила прижатия, $F_{\text{пр}}$, Н	Деформация, $\Delta Y_{\text{щц}}$, мм	Сила прижатия, $F_{\text{пр}}$, Н
0	2,92	1060	4,58	1426	6,63	1874
10	3,06	1282	4,80	1740	6,94	2312
20	3,21	1572	5,03	2156	7,28	2904
30	3,37	1960	5,29	2722	7,65	3726
40	3,55	2492	5,58	3514	8,07	4907
50	3,75	3242	5,89	4662	8,54	6676
60	3,98	4341	6,25	6399	9,07	9463
70	4,24	6026	6,66	9175	9,67	14157
80	4,53	8767	7,13	13940	10,36	22792
90	4,86	13584	7,66	22953	11,15	40755
100	5,25	23019	8,29	42533	12,08	85554

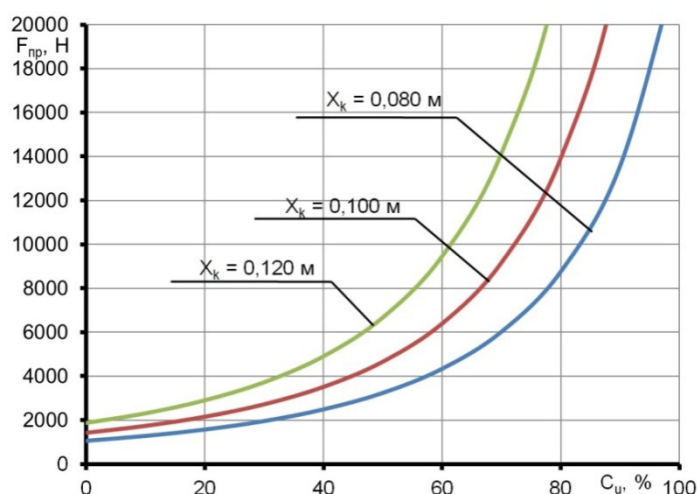


Рисунок 8 – Графическая зависимость требуемой силы прижатия цилиндрической щётки от степени износа при различных величинах ширины пятна контакта

Figure 8 – Graphical dependence of the required pressing force of the cylindrical brush on the degree of wear at different widths of the contact patch

поверхностью (для цилиндрической щётки с номинальным радиусом $r_n = 0,275$ м с ворсом из полимерного материала), произведены необходимые расчеты, результаты которых сведены в таблицу 2 и проиллюстрированы на рисунке 8.

Из таблицы 2 и графика (см. рисунок 8) видно, что требуемое усилие прижатия возрастает с увеличением степени износа цилиндрической щётки. При увеличении степени износа выше определенного значения становится невозможным поддерживать значение пятна контакта цилиндрической щётки в оптимальном диапазоне только за счет силы тяжести, так как требуемое усилие прижатия цилиндрической щётки становится больше силы тяжести, действующей на щеточное рабочее оборудование. Например, при массе щеточного рабочего оборудования, приходящейся на цилиндрическую щётку, $m_{щро} = 435$ кг максимальная возможная сила прижатия составит $F_{пр\ max} = 4276$ Н. При этом граничное значение степени износа, после которого становится невозможным поддерживать заданное значение ширины пятна контакта цилиндрической щётки только за счет силы тяжести, будет зависеть от величины ширины пятна контакта. Для значений ширины пятна контакта $X_k = 0,08$ м, $X_k = 0,10$ м, $X_k = 0,12$ м граничное значение степени износа составит 60%, 48% и 36% соответственно.

При эксплуатации предложенного устройства управления положением щеточного рабочего органа с дополнительным гидрп-

невмоаккумулятором возникает необходимость корректирования давления на выходе гидропневмоаккумулятора для поддержания необходимой ширины пятна контакта при износе ворса. Необходимо получить зависимость давления на выходе гидропневмоаккумулятора от свободной длины ворса цилиндрической щетки.

Связь между щеточным рабочим оборудованием и базовой машиной обеспечивает параллелограммная подвеска. Были составлены уравнения геометрических связей. В результате определен передаточный коэффициент подвески $K_{под} = 8,33$. Из условия равенства работ при перемещении штока гидроцилиндра и перемещении щеточного рабочего оборудования получено уравнение

$$F_{гц} = K_{под} \cdot F_{щц}, \quad (13)$$

где $F_{гц}$ – усилие на штоке гидроцилиндра, Н;
 $F_{щц}$ – усилие, приложенное к цилиндрической щетке со стороны гидропривода, Н.

Усилие прижатия $F_{пр}$ цилиндрической щетки к очищаемой поверхности

$$F_{пр} = G_{щро} - F_{щц}, \quad (14)$$

где $G_{щро}$ – вес ЩРО, Н.

С учетом обеспечения необходимого значения ширины пятна контакта цилиндрической щетки с очищаемой поверхностью с учетом степени износа из полученной зависимости (см. рисунок 4) определена необходимая вели-

чина деформации ворса щетки $\Delta Y_{\text{щ}}$. Далее с учетом коэффициента жесткости ворса щетки была определена необходимая сила прижатия $F_{\text{пр}}$. В результате необходимое усилие на штоке гидроцилиндра

$$F_{\text{гц}} = (G_{\text{щро}} - F_{\text{пр}}) \cdot K_{\text{под}}. \quad (15)$$

Было рассчитано необходимое давление в гидропневмоаккумуляторе $P_{\text{гпа}}$ по формуле

$$P_{\text{гпа}} = F_{\text{гц}} / S_{\text{гц шп}}, \quad (16)$$

где $S_{\text{гц шп}}$ – площадь поршня в штоковой полости гидроцилиндра, м^2 .

Далее получена зависимость давления в гидропневмоаккумуляторе от фактической свободной длины прутка ворса цилиндрической щетки, $P_{\text{гпа}} = f(S_{\text{ф}})$, (рисунок 9).

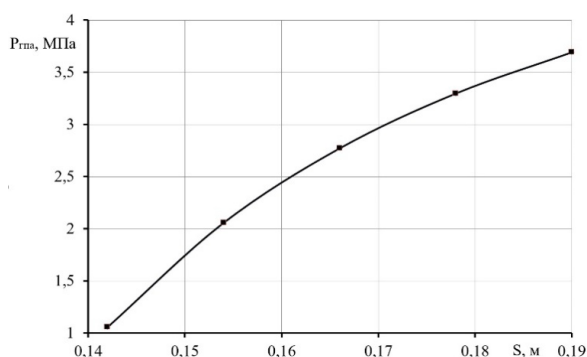


Рисунок 9 – Графическая зависимость давления в гидропневмоаккумуляторе от фактической свободной длины прутка ворса цилиндрической щетки

Figure 9 - Graphical dependence of the pressure in the hydraulic pneumatic accumulator on the actual free length of the pile bar of the cylindrical brush

Из графика на рисунке 9 видно, что с увеличением степени износа ворса, т.е. с уменьшением фактической свободной длины ворсин щетки, требуемое для поддержания необходимого значения ширины пятна контакта давление в гидропневмоаккумуляторе уменьшается.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обеспечения максимальной эффективности процесса очистки дорожного покрытия от загрязнений и уменьшения интенсивности износа щеточного ворса необходимо поддержание оптимального значения ширины пятна контакта цилиндрической щетки с очищаемой поверхностью, за счет регулирования усилия прижатия цилиндрической щетки с учетом её степени изнашивания в процессе эксплуатации. Для поддержания необходимого усилия

прижатия предлагается применение устройства управления положением щеточного рабочего оборудования на основе гидропневматического аккумулятора.

В процессе работы цилиндрической щетки изнашивается и изменяется её жесткость, с возрастанием степени износа цилиндрической щетки коэффициент жесткости увеличивается, при этом после достижения определенного значения степени износа интенсивность увеличения коэффициента жесткости резко возрастает. В зависимости от ширины пятна контакта существуют граничные значения степеней износа, после достижения которых становится невозможным поддерживать заданное значение ширины пятна контакта цилиндрической щетки только за счет силы тяжести, действующей на щеточное рабочее оборудование. Полученные зависимости позволяют учитывать износ ворса цилиндрической щетки при имитационном моделировании предлагаемого устройства управления положением щеточного рабочего оборудования коммунальной машины. Получена зависимость давления в гидропневмоаккумуляторе устройства управления положением щеточного рабочего органа от фактической свободной длины прутка ворса цилиндрической щетки. За счет изменения давления на выходе гидропневмоаккумулятора возможно поддерживать необходимую ширину пятна контакта при износе ворса цилиндрической щетки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лепеш А.Г. Научные основы повышения производительности подметальных агрегатов коммунальных машин // Инновации. 2011. № 6. С. 136–139.
2. Xue C., Hu Y. The main cleaning system design of garbage sweeper // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 945-949. Pp. 257-260. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.945-949.257.
3. Lu S., Zhou Z., Han E., Guofeng Y. New Energy Road Sweeper Scenario Design and Simulation. // IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC Asia-Pacific). 2014. DOI: 10.1109/ITEC-AP.2014.6940708.
4. Fasiuddin S.N.Q. Design and manufacturing of Automobile testing track sweeping machine // Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management 8-10 March. 2016. P. 1498.
5. Libardo V., Vanegas-Useche, Magd M., Abdel-Wahab, Graham A., Parker, Wang, Chong, Sun, Qun, Wahab, Magd Abdel. Effectiveness of oscillatory gutter brushes in removing street sweeping waste // Waste Management. 2015. Vol. 43. Pp. 28-36. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.05.014.

6. Abdel Wahab M M Wang C Vanegas Useche L V Parker G A 2010 Finite element models for brush-debris interaction in road sweeping *Acta Mech.* Pp. 71-84.
7. Wang C., Parker G. Analysis of Rotary Brush Control Characteristics for a Road Sweeping Robot Vehicle // *INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS AND CONTROL (ICMC)*. 2015. Pp. 1799-1804. DOI: 10.1109/ICMC.2014.7231871.
8. Yuan Xi, Yan Dai, Yonghou Xiao, Kai Cheng, Tao Xiao and Shixiang Zhao. Internal Flow Field Uniformity Study of Dust Collector for A Street Vacuum Sweeper Based on CFD // *Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 272. Pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/272/1/012007.
9. Лепеш А.Г. Прогнозирование изнашивания щеток коммунальных машин // *Технико-технологические проблемы сервиса*. № 2(12). 2010. С. 25-34.
10. Лепеш Г.В., Иванова Е.С. Расчет характеристик трения в задачах анализа внутрибаллистических процессов / Вторые Окуневские чтения // *Сборник трудов Международной научно-практической конференции*. С-Петербург: БГТУ. 2001. С. 56–67.
11. Chen XX., Yang MY., Deng, Kangyao. Numerical analysis of a centrifugal fan for a road sweeper // *ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*. 2017. Vol. 1A. DOI: 10.1115/FEDSM2017-69103.
12. Jeon J., Jung B., Koo J.C. Pintado A., Oh P. Autonomous robotic street sweeping: Initial attempt for curbside sweeping // *IEEE International Conference on Consumer Electronics*. 2017. Pp. 72-73. DOI:10.1109/ICCE.2017.7889234.
13. Vanegas-Useche L V Abdel-Wahab M M Parker G A 2011 Determination of friction coefficients, brush contact arcs and brush penetrations for gutter brush-road interaction through FEM *Acta Mech.* Pp. 119-132.
14. Wang C., Sun Q, Wahab M.A., Zhang X., Xu L. Regression modeling and prediction of road sweeping brush load characteristics from finite element analysis and experimental results // *Waste Management*. 2015. Vol.43. Pp.19-27. DOI: 10.1016 / j.wasman.2015.06.027.
15. Yang Q.L., Zhou Y., Ying K.M., Li R.B., Wang X. Study on Cleaning Performanct of Small Road Sweeper Vehicle // *Proceedings of the 2018 3rd international conference on electrical, autovation and mechanical engineering*. 2018. Vol. 127. Pp. 194-198. DOI: 10.2991/eame-18.2018.41.
16. Куксов М. П. Определение рациональных режимов работы малогабаритной коммунальной машины для летнего содержания дворовых территорий с использованием математического моделирования // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. № 3. С. 44–48.
17. Куксов М. П., Сякин С. Н. Определение рационального коэффициента распределения мощности малогабаритной коммунальной машины для зимнего содержания дворовых территорий // *Авиамашиностроение и транспорт Сибири – 2013: сб. научных трудов студентов и преподавателей Института авиамашиностроения и транспорта*. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ. 2013. 168 с.
18. Куксов М.П., Нижегородов А.И. К построению математической модели рабочего процесса подметально-уборочной машины // *Вестник ИрГТУ*. 2013. № 12. С. 88-91.
19. Лепеш А.Г. К определению силового взаимодействия щёток коммунальных машин с дорожным покрытием // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2011. №1(15). С.30–35
20. Лепеш А.Г. Прогнозирование изнашивания щеток коммунальных машин // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2010. № 2 (12) С. 25–34.
21. Лепеш А.Г., Лепеш Г.В. Математическое моделирование силового взаимодействия щеток коммунальных машин с дорожным покрытием // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2010. №3 (13). С. 32–38.
22. Tsekhosh1 S I Ignatov S D Zanin AV Kvasov I N 2020 Dynamics of utility machines with brush working equipment. *Journal of Physics Conf. Series electronic collection*. Vol. 1441 (2020). 012122. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012122.
23. Tsekhosh S I, Ignatov S D, Demidenko A I and Kvasov I N 2020 Increasing the resource of the brush working equipment of a communal machine through the use of a device for controlling its position *Collection Problems of Mechanical Engineering XV Int. Sci. and Tech. Conf (Omsk) OmSTU*. Vol. 1546 (2020). 012143. DOI:10.1088/1742-6596/1546/1/012143.
24. Игнатов С.Д., Цехош С.И. Упругие характеристики щётчного ворса рабочего оборудования коммунальной машины // *Вестник СибАДИ*. 2019. Т. 16. №1. С. 6–17.
25. Игнатов С.Д., Цехош С.И. Определение упругих характеристик ворса щётчного рабочего органа коммунальной машины // *Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации*. 2019. С. 6266.
26. Лепеш А.Г. Имитационное моделирование рабочего процесса коммунальной уборочной техники // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2011. №3(17). С.32–41.

REFERENCES

- 1 Lepesh A G. Nauchnye osnovy povysheniya proizvoditel'nosti podmetal'nyh agregatov kommunal'nyh mashin [Scientific basis for improving the productivity of municipal sweeper units] // *Innovations*. 2011; 6: 136-139. (In Russian)
- 2 Xue C., Hu Y. The main cleaning system design of garbage sweeper // *Advanced Materials Research*. 2014; 945-949: 257-260. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.945-949.257.
- 3 Lu S., Zhou Z., Han E., Guofeng Y. New Energy Road Sweeper Scenario Design and Simulation. // *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC Asia-Pacific)*. 2014. DOI: 10.1109/ITEC-AP.2014.6940708.
- 4 Fasiuddin S.N.Q. Design and manufacturing of Automobile testing track sweeping machine // *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* 8-10 March. 2016: 1498.

- 5 Libardo V., Vanegas-Useche, Magd M., Abdel-Wahab, Graham A., Parker, Wang, Chong, Sun, Qun, Wahab, Magd Abdel. Effectiveness of oscillatory gutter brushes in removing street sweeping waste // *Waste Management*. 2015. Vol. 43. Pp. 28-36. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.05.014.
- 6 Abdel Wahab M M Wang C Vanegas Useche L V Parker G A 2010 Finite element models for brush-debris interaction in road sweeping *Acta Mech.* Pp. 71-84.
- 7 Wang C., Parker G. Analysis of Rotary Brush Control Characteristics for a Road Sweeping Robot Vehicle // *INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS AND CONTROL*. 2015: 1799-1804. DOI: 10.1109/ICMC.2014.7231871.
- 8 Yuan Xi, Yan Dai, Yonghou Xiao, Kai Cheng, Tao Xiao and Shixiang Zhao. Internal Flow Field Uniformity Study of Dust Collector for A Street Vacuum Sweeper Based on CFD // *Materials Science and Engineering*. 2017; 272: 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/272/1/012007.
- 9 Lepesh A G. Prognozirovanie iznashivaniya shhetok kommunal'nyh mashin [Predicting the wear of utility vehicle brushes] // *Technical and technological problems of the service*. № 2(12). 2010: 25-34. (In Russian)
- 10 Lepesh G V, Ivanova E S. Raschet harakteristik trenija v zadachah analiza vnutribalisticheskikh processov [Calculation of friction characteristics in problems of analysis of intra-ballistic processes] // *Proceedings of the international scientific and practical conference*. St. Petersburg: BSTU. 2001: 56-67. (In Russian)
- 11 Chen XX., Yang MY., Deng, Kangyao. Numerical analysis of a centrifugal fan for a road sweeper // *ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*. 2017. Vol. 1A. DOI: 10.1115/FEDSM2017-69103.
- 12 Jeon J., Jung B., Koo J.C. Pintado A., Oh P. Autonomous robotic street sweeping: Initial attempt for curbside sweeping // *IEEE International Conference on Consumer Electronics*. 2017: 72-73. DOI:10.1109/ICCE.2017.7889234.
- 13 Vanegas-Useche L V Abdel-Wahab M M Parker G A 2011 Determination of friction coefficients, brush contact arcs and brush penetrations for gutter brush-road interaction through FEM *Acta Mech*: 119-132.
- 14 Wang C., Sun Q, Wahab M.A., Zhang X., Xu L. Regression modeling and prediction of road sweeping brush load characteristics from finite element analysis and experimental results // *Waste Management*. 2015; 43: 19-27. DOI: 10.1016 / j. wasman.2015.06.027.
- 15 Yang Q.L., Zhou Y., Ying K.M., Li R.B., Wang X. Study on Cleaning Performanct of Small Road Sweeper Vehicle // *Proceedings of the 2018 3rd international conference on electrical, autovanion and mechanical engineering*. 2018;127:194-198. DOI: 10.2991/eam-18.2018.41.
- 16 Kuksov M P 2015 Opređenje racional'nyh rezhimov raboty malogabaritnoj kommunal'noj mashiny dlja letnego sodержaniya dvorovyh territorij s ispol'zovaniem matematicheskogo modelirovaniya [Determination of rational modes of operation of a small-sized communal machine for summer maintenance of yard territories using mathematical modeling] // *Bulletin of the Irkutsk State Technical University* (Russia: Irkutsk): 44 – 48. (In Russian)
- 17 Kuksov M P, Sachin S.N. Opređenje racional'nogo koeficienta raspredeleniya moshnosti malogabaritnoj kommunal'noj mashiny dlja zimnego sodержaniya dvorovyh territorij [Determination of the rational power distribution coefficient of a small-sized utility vehicle for winter maintenance of courtyards] // *Aviamashinostroenie I transport Sibiri-2013: collection of scientific papers of students and teachers of the Institute of aircraft engineering and transport*. – Irkutsk: Publishing house Irgtu. 2013: 168. (In Russian)
- 18 Kuksov M P, Nizhegorodov A.I. K postroeniju matematicheskoy modeli rabocheho processa podmetal'no-uborochnoj mashiny [To build a mathematical model of the working process of a sweeper] // *Bulletin Of Irstu*. 2013; 12: 88-91. (In Russian)
- 19 Lepesh A G, K opredeleniju silovogo vzaimodejstviya shhetok kommunal'nyh mashin s dorozhnym pokrytiem [To determine the force interaction of brushes of utility vehicles with the road surface] // *Technical and technological problems of the service*. 2011; 1(15): 30-35. (In Russian)
- 20 Lepesh A G. Prognozirovanie iznashivaniya shhetok kommunal'nyh mashin [Predicting the wear of utility vehicle brushes] // *Technical and technological problems of the service*. 2010; (12): 25-34. (In Russian)
- 21 Lepesh A G, Lepesh G V. Matematicheskoe modelirovanie silovogo vzaimodejstviya shhetok kommunal'nyh mashin s dorozhnym pokrytiem [Mathematical modeling of the force interaction of brushes of utility vehicles with the road surface] // *Technical and technological problems of the service*. 2010; 3 (13): 32 -38. (In Russian)
- 22 Tsekhosh S I Ignatov S D Zanin AV Kvasov I N 2020 Dynamics of utility machines with brush working equipment. *Journal of Physics Conf. Series electronic collection*. Vol. 1441 (2020). 012122. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012122.
- 23 Tsekhosh S I, Ignatov S D, Demidenko A I and Kvasov I N 2020 Increasing the resource of the brush working equipment of a communal machine through the use of a device for controlling its position *Collection Problems of Mechanical Engineering XV Int. Sci. and Tech. Conf (Omsk) OmSTU*. Vol. 1546 (2020). 012143. DOI:10.1088/1742-6596/1546/1/012143. (In Russian)
- 24 Ignatov S D and Tsekhosh Uprugie harakteristiki shhetotochnogo vorsa rabocheho oborudovaniya kommunal'noj mashiny [Elastic characteristics of brush pile of the working equipment of a communal machine] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2019 (Russia: Omsk): 6–17. (In Russian)
- 25 Ignatov S D, Tsekhosh S I. Opređenje uprugih harakteristik vorsa shhetotochnogo rabocheho organa kommunal'noj mashiny [Determination of elastic characteristics of the pile of the brush working body of a utility machine] // *Architectural, construction and road transport complexes: problems, prospects, innovations*. 2019: 62–66. (In Russian)

26 Lepesh A. G. Imitacionnoe modelirovanie rabocheho processa kommunal'noj uborochnoj tehniki [Simulation of the working process of municipal cleaning equipment] // *Technical and technological problems of the service*. 2011; 3(17): 32-41. (In Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Цехош С.И. Обоснование необходимости применения устройства управления положением щеточного рабочего органа на основе дополнительно установленного гидропневматического аккумулятора. Показаны в виде графика зависимость ширины пятна контакта от деформации цилиндрической щетки при различных степенях износа. Установлена зависимость требуемого усилия прижатия цилиндрической щетки от степени износа ворса при разных величинах ширины пятна контакта. Оформление готового варианта статьи.

Журавский Б.В. Приведена зависимость степени износа ворса щеточного рабочего оборудования от фактического радиуса цилиндрической щетки. Рассмотрено влияние степени износа ворса на упругую характеристику цилиндрической щетки в радиальном направлении. Формулировка цели и задач.

Цехош П.И. Анализ существующих конструкций щеточного рабочего оборудования. Получена зависимость давления в гидропневмоаккумуляторе устройства управления положением щеточного рабочего органа от фактической свободной длины прутка ворса цилиндрической щетки. Проверка и корректировка статьи. Заключение.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Журавский Борис Викторович – старший преподаватель кафедры «Эксплуатация и ремонт ав-

томобилей», ORCID: 0000-0002-4516-2607, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5 e-mail: Ra9meo@mail.ru).

Цехош София Ивановна – старший преподаватель кафедры «Инженерная педагогика», ORCID: 0000-0002-4904-4173, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: tsehossh.lyubov@yandex.ru).

Цехош Павел Иванович – наладчик автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии (АИИСКУЭ) в структурном подразделении центральной базы производственного обслуживания по ремонту и наладке энергетического оборудования (ЦБПО РНЭО), компания ПАО «Сургутнефтегаз» (г. Сургут, e-mail: paw234@yandex.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boris V. Zhuravsky – senior lecturer of the Automobile Operation and Repair Department, ORCID: 0000-0002-4516-2607, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5 e-mail: Ra9meo@mail.ru).

Sofia I. Tsekhosh – senior lecturer of the Engineering Pedagogy Department, ORCID: 0000-0002-4904-4173, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: tsehossh.lyubov@yandex.ru).

Pavel I. Tsekhosh – service engineer of the automated information and measurement system for commercial electricity metering in the structural division of the Central base of production services for the repair and service of power equipment, Surgutneftegas Company (Surgut, e-mail: paw234@yandex.ru).

УДК 691

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-120-134>

ГЕОНИКА (ГЕОМИМЕТИКА) И ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

В.С. Лесовик¹, А.А. Шеремет², И.Л. Чулкова³, А.Э. Журавлева⁴

¹БГТУ им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия;

²БГТУ им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия;

³ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
г. Омск, Россия;

⁴БГТУ им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Излагаются методологические подходы и обоснование появления нового трансдисциплинарного направления – геоники, которое рассматривается как искусство применения знаний неорганического мира.

Материалы и методы. Сформулировано понятие «техногенный метасоматоз» – стадия в эволюции строительных материалов, характеризующаяся приспособлением композита к изменяющимся условиям. Описан «Закон сродства структур», который заключается в выборе сырья для композита с аналогичными физико-механическими характеристиками.

Результаты. Приведены примеры использования нетрадиционных сырьевых ресурсов в областях строительного материаловедения (интеллектуальные композиты, реставрационные смеси) и архитектуры (здание Белорусской калийной компании в Белоруссии, дом «Отражение минерала» в Японии, дизайн-концепция памятника Курской магнитной аномалии).

Обсуждение и заключение. Обосновано, что развитие трансдисциплинарного подхода геоники позволит улучшить комфортность пребывания человека в окружающей среде.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: трансдисциплинарные исследования, кибернетика, геоника, геомиметика, архитектурная геоника, материаловедение, строительство, композиционные материалы.

Поступила 24.01.21, принята к публикации 26.02.21.

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: Геоника (геомиметика) и поиск оптимальных решений в строительном материаловедении/ В.С. Лесовик, А.А. Шеремет, И.Л. Чулкова, А.Э. Журавлева. – DOI <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-120-134> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 1(77). – С. 120–134.

© Лесовик В.С., Шеремет А.А., Чулкова И.Л., Журавлева А.Э., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-120-134>

GEONICS (GEOMIMETICS) AND SEARCH FOR OPTIMAL SOLUTIONS IN BUILDING MATERIALS SCIENCE

Valery S. Lesovik¹, Alena A. Sheremet², Irina L. Chulkova³, Alina E. Zhuravleva⁴

¹V. G. Shukhov Belgorod State Technological University,
Belgorod, Russia

²V. G. Shukhov Belgorod State Technological University,
Belgorod, Russia

³Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia

⁴V. G. Shukhov Belgorod State Technological University,
Belgorod, Russia

ABSTRACT

Introduction. Methodological approaches and validation of the emergence of a new transdisciplinary area – geonics, which is considered as the art of applying knowledge of the inorganic world, are presented.

Materials and methods. The concept of technogenic metasomatism as a stage in the evolution of building materials, characterized by the adaptation of the composite to changing conditions is formulated. The Law of affinity of structures, which consists in the selection of raw materials for a composite with similar physical and mechanical characteristics, is described.

Results. The examples of non-traditional raw materials use in the areas of construction materials science (intelligent composites, restoration mixtures) and architecture (the building of the Belarusian Potash Company in Belarus, the 'Reflection of the mineral' building in Japan, the design concept of the monument to the Kursk magnetic anomaly) are presented.

Discussion and conclusions. It is proved that the development of a transdisciplinary approach to geonics will improve the comfort of human stay in the environment.

KEYWORDS: transdisciplinary research, cybernetics, geonics, geomimetics, architectural geonics, materials science, construction, composite materials

Submitted 24.01.21, revised 26.02.21.

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: Lesovik V.S., Sheremet A.A., Chulkova I.L., Zhuravleva A. E. Geonics (geomimetics) and search for optimal solutions in building materials science. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (1):120-134. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-120-134>

© Lesovik V.S., Sheremet A.A., Chulkova I.L., Zhuravleva A.E., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

С самого начала эволюционного пути человек стремился познать секреты своего существования и окружающей его природы. Первые шаги в этом направлении были сделаны благодаря философии – древнейшей науке, которая зародилась в VI–V в. до н. э. Аристотель, Сократ, Пифагор и другие устремили свое сознание на разрешение проблемы отношений индивида и мира в социальной онтологии, где мудрость воспринималась как гармония знаний и действия, равновесие сложных взаимоотношений человека и среды обитания¹.

Особенностью современной науки является узкая специализация. Дифференциация и интеграция – два противоположных процесса, которые описывают процесс развития наук, причем первое понятие характеризуется выделением новых научных дисциплин, а второе – объединением нескольких смежных наук или областей знаний в дисциплины. При этом дифференциация долгое время играла доминирующую роль, пока узкая специализация не замедлила процесс гармоничного взаимодействия человека и природы. Наиболее ярко это отрицательное воздействие выражено на стыке взаимодействия органического и неорганического мира.

Становление нового научного знания происходит в контексте ускоряющегося и усложняющегося процесса развития социальной и природной среды: старые теории отходят на второй план и на их месте появляются новые, основанные на более сложном инструментарии. С каждым годом этот процесс становится все более ярко выраженным: стихийные бедствия, электромагнитные излучения, изменения флоры и фауны, социально-политические парадоксы и метаморфозы, пандемия приводят к новой, трансдисциплинарной парадигме исследований [1, 2].

Появление технологии гибридных материалов в строительстве и материаловедении приводит к созданию новых композитных материалов, включающих в себя гибридную матрицу. В результате возникают новые трансдисциплинарные направления науки. Кибернетика – одно из первых направлений трансдисциплинарности (рисунок 1).

Из процесса объединения наук следовало появление целого рода новых научных направлений (биотехнология, геохимия, геофизика и т. д.), в том числе и зарождение геоники (геомиметики). Впервые термин «геологическая бионика» или «геоника» был использован в 1982 г. в книге «Геология и живая природа», написанной Г.С. Франтовым². На ежегодном

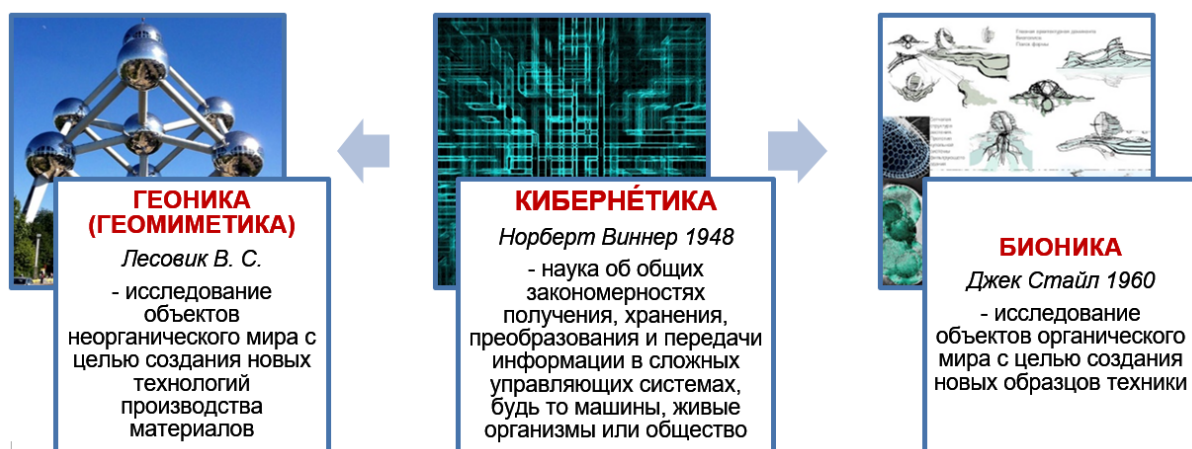


Рисунок 1 – Направления кибернетики

Figure 1 – Directions of cybernetics

¹ Ильичев Л.Ф., Федосеев П.Н., Ковалев С.М., Панов В.Г. Философский энциклопедический словарь. М.: Сов. Энциклопедия, 1983. 840 с.

² Франтов Г. С. Геология и живая природа (Уровни организации вещества, бионика и геоника, клетки и газово-жидкие включения). Л.: Недра, 1982. 144 с.

³ Лесовик В. С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. 195 с.

собрании центрального регионального отделения РАССН в г. Тамбове и на ученом совете учреждения Российской академии наук института экспериментальной минералогии РАН в г. Черноголовке в 2012 г. была озвучена окончательная формулировка нового научного направления.

Бионика и геоника – важнейшие области кибернетики. Бионика использует анализ структуры и жизнедеятельности организмов для решения инженерных задач формирования и технического обеспечения новых структур и материалов. Использование методов бионики, как показал отечественный [3, 4, 5] и зарубежный опыт [6, 7], позволяет рационально подходить к конструированию строительных объектов и гармонизировать архитектуру с природной средой обитания. Геоника (геомиметика) – это трансдисциплинарное научное направление, которое рассматривается как искусство применения знаний неорганического мира для решения новых технологических задач³. Геоника позволяет преодолеть грандиозный разрыв между показателями свойств природных и техногенных материалов. Основными составляющими геоники являются поиск оптимальных решений, принцип экономии материалов и поиск новых, принцип максимальной экологичности, принцип энергосбе-

режения, гармоничное сочетание конструкций и природы, а также создание благоприятной для жизни среды, обеспечивающей здоровые и безопасные условия, гармонично сочетающей производимую человеком социальную и инженерную инфраструктуру, поддерживающую природное равновесие. Необходимо искать новые формы и технологии, развивая направления архитектурной геоники (геомиметики), освоения и строительства подземных сооружений, формирования алгоритмов и спецификаций управления неорганическими природными объектами, подчинения космической энергии (рисунок 2).

Теоретические положения геоники (геомиметики) актуальны не только на отечественном [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15], но и на международном уровне [16, 17, 18].

Архитектурная геоника – это создание архитектурных ансамблей с учетом результатов и воздействий геологических и косвенных химических процессов на неорганический мир, габитуса кристаллов и строения кристаллической решетки минералов. Цель архитектурной геоники (геомиметики) – трансдисциплинарный подход к изучению влияния геологических факторов на психологическое, эмоциональное и физическое состояние человека (рисунок 3).



Рисунок 2 – Направления геоники

Figure 2 – Geonics directions



Рисунок 3 – Направления архитектурной геоники (геомиметики)

Figure 3 – Directions of architectural geonics (geomimetics)

Комбинированный подход между геоникой и неорганическим миром в ультрасовременной инженерной практике используется для эффективного применения природных и природоподобных механизмов в строительстве.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Более 80% жизни мы находимся в окружении материалов, поэтому их выбор играет значительную роль. Относительное удобство и комфорт так называемого цивилизованного мира нивелируются рядом совершенно новых рисков, образующих побочные эффекты одного и того же прогресса. Таким образом, развитие медицины вряд ли способно идти в ногу с новыми заболеваниями и различными негативными воздействиями. В среднем вероятность того, что нынешнее поколение доживет до 60 лет, вряд ли выше, чем было у их предков 100–150 лет назад. Это вызвано социальными проблемами, возникающими на фоне технологического прогресса: снижением занятости за счет автоматизации и роботизации, переносом производственных площадок в низкооплачиваемые регионы и т. д. Со времен масштабного строительства во второй половине 20 в. прогресс в области строительных материалов, за исключением редких случаев,

ориентирован на снижение производственных и строительных затрат. Однако, учитывая цены на недвижимость, от этого, скорее всего, выиграют только производители, но не потребители. Определенное снижение соотношения энергии к объему производства строительных материалов и, несомненно, существенная борьба за энергосбережение обусловлены, во-первых, ростом энергозатрат, а во-вторых, стремлением улучшить экологическую обстановку. На самом деле большинство применяемых в наши дни строительных материалов, за исключением несколько более высоких прочностных и тепловых свойств, практически ничем не отличаются от вековых аналогов. Причина этого кроется в стабильном подходе к их производству с акцентом на инженерно-технические требования. Реализация теоретических положений геоники (геомиметики) и системный подход к урегулированию вопросов дали возможность создать методологическую базу разработки комфортных для человека эффективных строительных композитов нового поколения. В связи с этим разрабатываются технологии производства и изучаются характеристики данных материалов. Современный термин «техногенный метасоматоз» в строительном материаловедении был опубликован в 2015 г.

Прочность и миграционная активность химических элементов характеризуют механизм адаптации строительных материалов к отрицательному влиянию окружающей среды, что инициирует термодинамическую неустойчивость. Эти процессы более сложны и характерны для природных условий, где, согласно геологическим принципам, прочность горных пород зависит от обменных процессов с окружающей средой.

Отметим, что традиционная гипотеза о метасоматозе, заключающемся в кристаллизации новой фазы при растворении исходной, неверна. В норме метасоматоз включает в себя комплекс термодинамических факторов. При техногенном метасоматозе строительного композита сбор агрессивных компонентов в структуре материала осуществляется при нарастающем потоке жидкостей из окружающей среды. Эта жидкость просачивается внутрь и перемещается по системе. В целом механизм метасоматического замещения состоит из двух этапов: дефицитно-объемного замещения и избыточно-объемного замещения. Эти механизмы могут быть применены при техногенном метасоматозе при геологическом разрушении горных пород, а также в строительном композите при сервисном разрушении. Механизм замещения дефицита в объеме состоит в следующем: начальная стадия химического взаимодействия компонентов; растворение поверхностного слоя материалов, приводящее к перенасыщению. Затем агрессивный компонент проникает вместе с разрушенным материалом. Иницирующим фактором метасоматического замещения является миграция компонентов из минералообразующей среды в зоны с ее пониженной концентрацией, приводящей к трансформации исходной системы. Изучение генетических характеристик минералов и горных пород позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики искусственных строительных композитов и эффективно использовать их для синтеза новых материалов и оптимизации взаимоотношений в системе «человек – материал – среда обитания» [16].

Апробация теории техногенного метасоматоза и переход на трансдисциплинарные исследования в строительном материаловедении для реализации принципов геоники (геомиметики) позволит использовать геологи-

ческий термин «цикл» для решения теоретических задач строительного материаловедения.

Промышленный и экономический эффект последнего десятилетия обусловлен непрерывным совершенствованием существующих строительных материалов. Благодаря уникальной комбинации свойств наметились тенденции проектирования интеллектуальных композитов, предусмотреть возможность самовосстановления дефектов, возникших при эксплуатации зданий и сооружений, и стабилизировать их состояние под влиянием опасных факторов.

В нашем университете в рамках реализации теоретических положений нового направления исследований – геоники (геомиметики) учеными кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций была разработана методика создания интеллектуальных строительных композитов, отвечающих современным требованиям [19, 20].

Долговечность и прочностные характеристики строительных материалов напрямую зависят от трансформации веществ неорганического мира, происходящих в природных процессах.

«Умные» композиты, спроектированные с учетом контроля над всеми процессами формирования структур, способны реагировать на возникновение стрессовых ситуаций во время эксплуатации зданий и сооружений.

Одним из аспектов геоники (геомиметики) является «закон сродства структур», который заключается в выборе сырья для композита с аналогичными физико-механическими характеристиками³. Теоретические основы закона сродства структур позволят проектировать сложные композиты при системном анализе макро-, микро- и наноуровней. Данные структуры должны максимально соответствовать базовому составу, в этом случае обеспечивается наилучшая адгезия и, соответственно, долговечность композита. Закон сформулирован на основе изучения природных объектов, аналогичных строительным композиционным материалам.

Проведение ремонтных работ и качественной реставрации основано на создании «умного» композитного материала, компоненты которого по физико-механическим свойствам, своему строению и составу были бы аналогичны восстанавливаемой матрице (бой штука-

³ Лесовик В. С., Чулкова И. Л. Управление структурообразованием строительных композитов: монография. Омск: СибАДИ, 2011. 462 с.



Рисунок 4 – Использование нетрадиционных сырьевых ресурсов

Figure 4 – Use of unconventional raw materials

турных покрытий, бой кирпича бетонного лома и т.п., возраст которых сопоставим со временем создания матрицы).

Красота творения природы, как прекрасные архитектурные сооружения, может быть использована человеком для совершенствования комфортных условий пребывания в окружающей среде на новом этапе развития цивилизации. На всех уровнях прослеживается удивительная взаимосвязь природных явлений, геологических процессов, человека и результатов его деятельности.

При проектировании архитектурных зданий, сооружений и МАФ в качестве предмета для подражания можно использовать космическое пространство: звездные системы, галактики, кометные пояса, вселенную, спутники планет, формы космических объектов, цветовую гамму, структуру и текстуру космических объектов как одну из областей неорганического мира.

Уникальные эстетически особенности, форма и цвет горных пород, минералов и минеральных агрегатов, кристаллы и кристаллические решетки химических соединений – это результат деятельности геофизических, космических, химических процессов неорганиче-

ской системы, которые могут стать областью научных исследований с целью заимствования обширного спектра строительных конфигураций, архитектурных особенностей, колористических решений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Получение искусственных минералов нуждается в разработке новых, основанных на геологических процессах, технологий. На базе именно таких технологий разрабатывается технология синтеза минералов различного назначения (рисунок 4).

Несмотря на то что созданы многочисленные искусственные строительные материалы (бетон на крупном заполнителе – аналог конгломерата, а мелкозернистый бетон создан по подобию песчаника, облицовочные слои стен в архитектурных сооружениях – это затирка коренных отложений, сформированная постоянными водными потоками и т. д), параметры их, например соотношение прочности и плотности, в несколько раз, а иногда и намного уступают своим природным аналогам.

Кафедра «Строительное материаловедение изделий и конструкций» предлагает технологии, полностью или частично воспро-

изводящие геологические процессы (композиционный кладочный раствор с пределом прочности на срез в 25–35 раз выше нормативных показателей), что является одним из ключевых решений значительного повышения свойств материалов.

Междисциплинарные методы применялись кафедрой СМиК при решении проблемы комплексного использования горных пород из Латинской Америки, ЮАР, Европы и многих регионов Российской Федерации, в том числе на сырьевых ресурсах Курской магнитной аномалии^{4 5} и Архангельской алмазонасной провинции. Результаты исследований были внедрены при утверждении запасов Лебединского, Стойленского, Коробковского и Приоскольского месторождений кварцитов и Терновского месторождения керамзитовых глин. Сырьевые ресурсы Лебединского, Стойленского и Терновского месторождений используют десятки заводов стройиндустрии, при этом получены десятки миллионов кубических метров строительных материалов, возведены десятки миллионов квадратных метров жилья, промышленных зданий и сооружений, отремонтированы, реконструированы и построены сотни километров дорог и тротуаров.

Управлять свойствами материалов можно с помощью различных факторов воздействия. Целенаправленное формирование их порового пространства представляет большой интерес для реализации предложенной концепции как эффективного механизма управления. Это обусловлено следующими факторами:

- неоднородностью пор как элементов гидратационно-твердеющей композитной структуры;
- разнообразием накопленных знаний об их влиянии на различные свойства для дальнейшего анализа и обобщения;
- ролью пористости в формировании некоторых свойств, влияющих на микроклимат и комфорт (теплопроводность, паропроницаемость, звукопоглощение, теплоизоляция и др.);
- наличие промышленных технологий получения пористых материалов.

Еще одним важным фактом является то, что пористость будет одним из наиболее эффективных способов снижения материалоемкости и энергозатрат на стадии производства

и повышения энергоэффективности и безопасности при эксплуатации, что чрезвычайно ценно с точки зрения концепции зеленого строительства.

«Зеленое строительство» – термин, характеризующий применение энергосбережения в строительстве и материаловедении, является новым видом строительства и эксплуатации и связан с появлением и внедрением информационных технологий.

Неавтоклавный газобетон очень привлекателен благодаря гибкости технологии, достигнутому уровню стандартных свойств, сроку службы химической системы и капитальным затратам производства. Использование в качестве ее основы композиционных связующих, хорошо зарекомендовавших себя для решения специальных задач, открывает многообразные возможности варьирования свойств матрицы, в том числе свойств, относящихся ко второй и третьей категориям вышеприведенной классификации.

Геоника в большей степени концентрируется на генерации новых «умных» материалов с высокими регулируемыми прочностными и структурными характеристиками. Кроме того, возможность «самозалечивать» дефекты структуры и ликвидировать разупрочняющую пористость также будет являться немаловажным свойством таких материалов.

Совместный помол цемента и гетеропористых (гетеропористость – это нанопористость, капиллярная пористость, гелиевая пористость) туфов Иордании позволяет получить вяжущее, которое обладает регулируемыми прочностными и структурными характеристиками и оптимизирует способы внутреннего ухода за бетоном. В процессе твердения бетонов могут образовываться микротрещины или микродефекты. Введенные микрозернистые частицы помогают сформировать так называемые интеллектуальные композиты – материалы, в которых заложена идея оптимального взаимодействия с окружающей средой. Эти частички выделяют воду, запасенную пористостью, обеспечивая процесс структурообразования или же залечивания дефектных систем, что оказывает положительное влияние на триаду «человек – материал – среда обитания».

Проведение таких мероприятий позволило повысить предел прочности при сжатии бето-

⁴ Лесовик В. С. К проблеме научного содружества при изучении пород вскрыши месторождений КМА. Творческое содружество научно-исследовательских, проектно-конструкторских организаций, вузов и предприятий в распространении и внедрении научных достижений: тез. докладов. Матер. науч. техн. конф. Белгород, 1977. С. 1617.

на до 128 МПа, предел прочности на растяжение при изгибе 35 МПа, модуль упругости до 83×10^{-3} МПа. Наилучшими физико-механическими характеристиками обладают вяжущие с удельной поверхностью цемента 350 м²/кг и туфа 700 м²/кг при соотношении цемента и туфа, соответственно, 90%:10%.

Новейшие методы структурообразования были реализованы в ходе реставрационных работ по восстановлению памятников архитектуры: здание ставки Колчака в г. Омске, дворцово-парковый ансамбль Царицыно в Москве и др., при внедрении результатов диссертации на соискание ученой степени д-ра техн. наук И.Л. Чулковой. Аналогично матрице основного бетона обеспечивается управление синтезом новообразований капиллярно-пористой структуры, что позволит разрабатывать кладочно-ремонтные, штукатурные и реставрационные смеси нового поколения^{5 6}.

Продолжены исследования в диссертационной работе на соискание ученой степени д-ра техн. наук Л. Х. Загороднюк (Повышение эффективности сухих строительных смесей в зависимости от базовой поверхности) и в работе Д. А. Беликова на соискание ученой степени канд. техн. наук (Сухие строительные смеси для ремонтных работ на композиционных вяжущих)^{7 6}.

Технический прогресс в производстве бетона и железобетона требует дополнительных источников сырья, в частности использование высококачественных компонентов. Решению этой проблемы препятствует постоянно растущая нехватка минеральных и энергетических ресурсов, а также возросшие экологические требования. Альтернативным источником сырья для производства бетонов могут служить отходы разрушенных зданий [5, 14].

Большой потенциал для этого имеют государства, в которых по различным причинам имеется большое количество снесенных или разрушенных строительных объектов. Задача утилизации данных отходов обусловлена как большой затратностью данного мероприятия, так и необходимостью скорейшего введения в эксплуатацию земельных участков под эти-

ми объектами^{7 8}. В связи с этим целесообразно использовать фрагменты разрушенных зданий и сооружений в качестве сырья для производства материалов для строительства новых зданий, а особенно «зеленых» и «интеллектуальных» композитов. Теоретической основой для проектирования композитов с использованием указанного сырья является геоника (геомиметика), которая использует результаты исследований природных процессов для создания высокопрочных бетонов и строительных конструкций нового поколения. Кафедра СММК БГТУ им. В.Г. Шухова проводит исследования в области потенциального влияния мелкодисперсных минеральных добавок (бетонных отходов) как наполнителя и мелкого заполнителя для легких и тяжелых бетонов.

Широкий простор для творчества архитекторов представляет мир минералов. В настоящее время установлено около 4900 минеральных видов. Такое сочетание геоники и технологий позволило внедрить инновационные методы в области архитектуры, энергоэффективного обеспечения и экономико-экологических программ. Архитектурно-геоническая наука – это синтез соответствующей практики и теории. Если архитектурно-геоническая практика – это процесс использования формирующих законов неживой природы, который происходил и часто происходит интуитивно, бессознательно, то архитектурная геоника осознает этот процесс и направляет его по законам современной строительной и архитектурной практики. Яркий пример современной минской архитектуры вырос на берегу Свислочи в 2011–2012 гг. Оригинальной формы здание строилось как штаб-квартира Белорусской калийной компании, контролирующей треть мировых поставок калийных удобрений. Поэтому архитекторы решили, что внешний вид головного офиса должен сам по себе говорить о деятельности предприятия, и взяли за основу проекта форму кристалла калия (рисунк 5).

Подобная идея реализована и в других странах. С новым подходом к дизайну и архитектуре архитекторы пытаются объединить

⁵ Лесовик В.С., Чулкова И.Л. Управление структурообразованием строительных композитов: монография. Омск: СибАДИ, 2011. 462 с.

⁶ Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Ильинская Г.Г., Беликов Д.А. Сухие строительные смеси для ремонтных работ на композиционных вяжущих: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. 145 с.

⁷ Казлитина О.В., Глаголев Е.С. Геоника. Геомиметика – теоретическая основа разработки мелкозернистых бетонов // Научные технологии и инновации. Электронный сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019. С. 207-210.

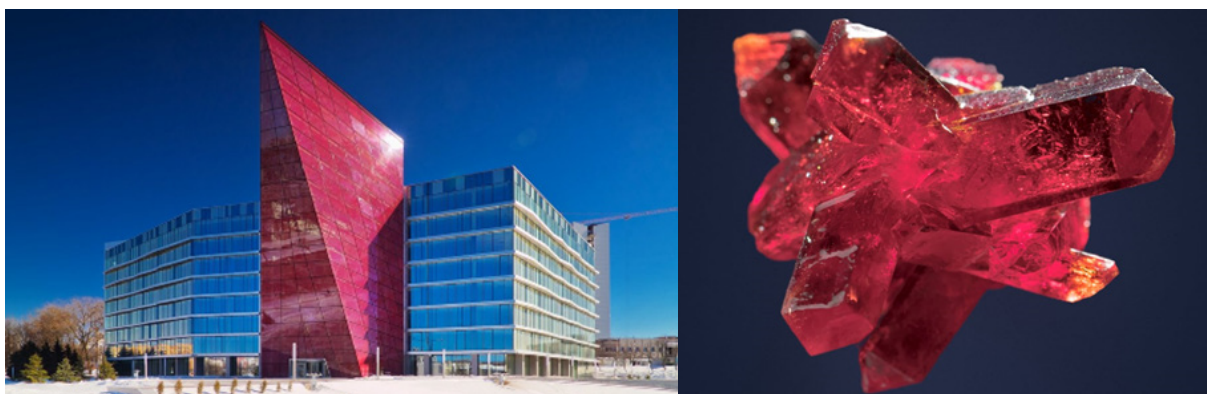


Рисунок 5 – Здание Белорусской калийной компании в Минске (Белоруссия)

Figure 5 – Building of the Belarusian Potash Company in Minsk (Belarus)



Рисунок 6 – Дом «Отражение минерала» в г. Токио (Япония)

Figure 6 – 'Reflection of the mineral' building in Tokyo (Japan)

искусственную среду и природу. Уникальный дом «Отражение минерала» возведен архитекторами Ясухиро Ямасита и Йоши Танака в центре Накано, административном районе г. Токио. Процесс принятия решения об окончательной форме дома схож с огранкой драгоценного камня, а результат был как сияющий кусок алмаза. Дом, построенный на крохотном клочке земли, использовал каждый сантиметр доступного пространства, и успешно занял свою нишу в архитектурном мире (рисунок 6).

Междисциплинарные подходы применялись кафедрой СММК БГТУ им. В.Г. Шухова при решении проблемы комплексного использования нерудных пород и отходов обогащения Курской магнитной аномалии (КМА) – самого мощного на Земле железорудного бассейна:

площадь составляет 22,5 км², эффективная площадь – 17,3 км². Объем ежегодно складированных продуктов переработки железистых кварцитов превышает 12 млн м³. Для ускоренного развития и освоения богатств КМА 6 января 1954 г. сформирована Белгородская область, а затем в 1954 г. был создан Белгородский государственный технологический институт строительных материалов (БТИСМ). В связи с этим разработана дизайн-концепция уникального архитектурного памятника Курской магнитной аномалии в Белгородской области, который отражает кристаллическую решетку, форму кристалла магнетита, а также структуру и текстуру железистого кварцита (рисунок 7).



Рисунок 7 – Концепция проектирования архитектурного памятника Курской магнитной аномалии в Белгородской области на основе железистого кварцита

Figure 7 – Design concept of the architectural monument of the Kursk magnetic anomaly in the Belgorod region based on ferruginous quartzite

Проблема сохранения и поддержания экологического равновесия остро стоит во всем мире в связи с растущим антропогенным воздействием на окружающую среду. С учетом трансдисциплинарности, которая является визитной карточкой будущего, геоника (геомиметика) занимается вопросом придания специфичности ландшафтной среде (синтаксис пространства), помогает защитить человека от аномальных природных явлений и обеспечить комфортность пребывания в среде обитания. Так как ландшафтные факторы включают область неорганического мира, геонике можно считать одним из экологически заинтересованных направлений в архитектуре и строительном материаловедении. Новое научное направление открывает новые возможности применения эниологических свойств пространственной среды (влияние архитектурных сооружений на направление электромагнитного излучения Земли, геометрия пространства, фрактальность архитектурных форм) в архитектуре и строительном материаловедении.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение последних научных достижений в области геохимии, генетики, бионики, геоники (геомиметики), а также других наук необходимо для оптимизации сложной системы «человек – материал – среда обитания». Трансдисциплинарный подход к исследованиям и изменениям городской инфраструктуры становится приоритетным в строительной отрасли. Необходимо пересмотреть существующие технологии формирования искусственной среды обитания, которая включает в себя пас-

сивную безвредность и нейтральность. Новая искусственная среда должна оказывать положительное воздействие на психоэмоциональное и физическое состояние, обеспечивать защиту от различных негативных воздействий, обеспечивая тем самым гармонию системы «человек – материал – среда обитания». Наибольшее значение в формировании новой искусственной среды обитания придается архитектуре и строительству, а также применяемым материалам.

Использование идей трансдисциплинарного подхода в учебном процессе позволили кафедре строительного материаловедения, изделий и конструкций БГТУ им. В.Г. Шухова возглавить рейтинг профильных кафедр России (по данным Министерства образования и науки РФ). Основные положения геоники (геомиметики) доложены на десятках форумах, проходивших под эгидой РАН, РААСН, международных конференциях в России, Германии (гг. Веймар, Дрезден, Дортмунд) и т.д. Сформирован научно-образовательный центр международного уровня «Геоника (геомиметика)». Проведено 14 международных вебинаров, изданы три монографии, в том числе на английском языке, на платформах YouTube и VK размещены видеолекции на русском, английском и арабском языках, которые ежедневно смотрят тысячи человек.

Таким образом, геоника (геомиметика) занимается и успешно решает практические вопросы структурирования жилой среды, архитектурных композиций, создания интеллектуальных композитов и архитектурных ансамблей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика) как трансдисциплинарное направление исследований // Высшее образование в России. 2014. С. 77–83.
2. Князева Е.Л. Трансдисциплинарные стратегии исследований // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2011. №10. С.193–201.
3. Димитрюк Ю.С., Шнейдер Е.М. Применение архитектурной бионики при реновации и реконструкции строительных объектов // Научный вестник государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Невинномысский государственный гуманитарно-технический институт». 2020. №1. С.5–6.
4. Музалевская Ю.Е. Метод художественного проектирования на основе законов бионики // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2018. Т. 41. № 3. С. 79–83.
5. Павлова В.А. Природоэквивалентная архитектура в современных творческих концепциях // Architecture and Modern Information Technologies. 2019. № 1(46). С. 340–355.
6. Yanping Yuan, Xiaoping Yu, Xiaojiao Yang, Yimin Xiao, Bo Xiang, Yi Wang, Bionic building energy efficiency and bionic green architecture. A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 74: 771–787, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.004>.
7. Mayatskaya I., Eremin V. Bionics and the choice of rational structural form, E3S Web of Conferences, 2019, vol 110, 01042, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001042>.
8. Лесовик В.С., Пьеркова М.В., Бабаев В.Б. Архитектурная геоника как междисциплинарное направление в архитектурной науке и практике // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 6. С. 74–79.
9. Першина И.Л. Архитектурная геоника: новые подходы к архитектурному поиску комфортной среды обитания // Наука, образование и экспериментальное проектирование в МАРХИ. 2018. С. 430–431.
10. Елистраткин М.Ю., Шапиро А.Э., Милькина А.С., Лесовик Г.А., Агеева М.С. Геоника. Геомиметика как основополагающее направление для развития строительной индустрии // Научные технологии и инновации. 2019. С.125–129.
11. Елистраткин М.Ю., Глаголев Е.С., Шапиро А.Э. Геоника. геомиметика и аддитивные технологии // Научные технологии и инновации. 2019. С.121–124.
12. Казлитина О.В., Мартынова К.Ю., Адонин С.В., Лазарев П.И., Моторыкин Д.А., Антонюк Р. Геоника. Геомиметика как наука о разработке и применении эффективных композитов для монолитного строительства // Научные технологии и инновации. 2019. С. 221–224.
13. Бычкова А.А. Отображение синергетики в архитектурной геонике (геомиметике) // Экономика. Общество. Человек. 2019. С. 57–61.
14. Цветкова Ю.П. Геоника как новое стилистическое направление в архитектуре // Фундамен-

тальные основы строительного материаловедения. 2017. С. 1260–1265.

15. Немцева А.В., Пономарева М.М. Архитектурная геоника в современных творческих концепциях // Природоподобные технологии строительных композитов для защиты среды обитания человека, Sovik V., Volodchenko A., Glagolev E., Lashina I., Fischer H. Geonics (geomimetics) as a theoretical basis for new generation compositing. 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019). Сер. «Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences», 2019, pp. 344–347, https://doi.org/10.1007/978-3-030-22974-0_83.

16. Lesovik V.S., Lesovik O.V., Volodchenko A.A. Geonics (Geomimetics) as a Theoretical Approach for Designing and Production of Natural-Like Heat-Insulating Structurally and Composites with Acoustic Properties. Journal of southwest jiaotong university, 2020, Vol. 55, No. 3, <https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.55.3.14>.

17. Pershina I.L. On study and accounting of geophysical fields in architectural space of sacral purpose. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, vol. 687, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/687/5/0550>.

18. Лесовик В. С. Генетические основы энергосбережения в промышленности строительных материалов. Изв. вузов. Строительство. 1994. №7. С. 96–100.

19. Лесовик В.С. Снижение энергоёмкости производства строительных материалов за счет использования энергетики геологических и техногенных процессов. Ibaus. Internationale Baustofftagung, Weimar, 2012.

20. Гарькина И.А., Данилов А.М. Королев Е.В. Эволюция представлений о композиционных материалах с позиций смены парадигм // Строительные материалы. 2018. № 1–2. С. 60–62.

21. Эшби У. Р. Введение в кибернетику: пер. с англ. / под ред. В.А. Успенского. Предисл. А.Н. Колмогорова. Изд. 3-е, стереотипное – Москва : КомКнига, 2006. 432 с.

22. Королев Е. В. Перспективы развития строительного материаловедения // Academia, Архитектура и строительство. 2020. № 3.

23. Danish A., Mosaberpanah M.A. Formation mechanism and applications of cenospheres: a review. Journal of Materials Science, 2020, No 55(11), pp. 4539–4557.

24. Федюк Р.С., Мочалов А.В., Пезин Д.Н., Тимохин Р.А. Самоуплотняющиеся бетоны с применением отходов растениеводства // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета, 2018. Т. 15. № 2 (60). С. 294–304.

25. Rajabi A.M., Omid Moaf F., Abdelgader H.S. Evaluation of Mechanical Properties of Two-Stage Concrete and Conventional Concrete Using Nondestructive Tests. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, No 32(7), 04020185.

26. Сулейманова Л.А., Малюкова М.В., Корякина А.А. Декоративные бетоны в архитектурной геонике // Природоподобные технологии строительных

композитов для защиты среды обитания человека. 2019. С. 57–61.

27. Lepskiy, V. Evolution of cybernetics: philosophical and methodological analysis. *Kybernetes*, Vol. 47, No 2, pp. 249–261. <https://doi.org/10.1108/K-03-2017-0120>.

28. Elistratkin M.Y., Glagolev E.S., Absimetov M.V., Voronov V.V.: Composite Binder for Structural Cellular Concrete. *Materials Science Forum*, 2019, vol. 945, pp. 53–58, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.53>.

29. Ayzenshtadt A.M., Shinkaruk A.A., Frolova M.A. Possible Criterion for Evaluating the Compatibility of Components in the Building Mixtures. *Innovations and Technologies in Construction. BUILDINTECH BIT 2020. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 95, https://doi.org/10.1007/978-3-030-54652-6_42.

30. Bystrova T. Y. Concept of Organic Architecture in the Second Half of the XXth Century in the Context of Sustainable Development. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 481, 01202, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/481/1/012020>.

31. Glagolev E.S. Development of composite binders' compositions for additive technologies in low-rise building construction, *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2020, vol. 95, pp. 150–157, https://doi.org/10.1007/978-3-030-54652-6_23.

32. Афанасьев М.Н. Формирование теоретических основ модификации бетонов // Актуальные научные исследования в современном мире. 2019. № 4–1 (48). С. 26–28.

33. Чернышов Е.М. Материаловедение и технология строительных композитов как система научного знания и предмет развития исследований. Часть 1. Постановка проблемы и ее существо // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 12 (720). С. 41–51.

REFERENCES

1. Lesovik V.S. Geonika (geomimetika) kak transdisciplinarnoe napravlenie issledovaniy [Geonics (geomimetics) as a transdisciplinary area of research]. *Higher education in Russia*, 2014: 77–83.

2. Knjazeva E.L. Transdisciplinarnye strategii issledovaniy [Transdisciplinary research strategies]. *Bulletin of Tomsk State Pedagogical University*, 2011; 10: 193–201. (In Russian)

4. Dimitryuk YU.S., SHnejder E.M. Primenenie arhitekturnoj bioniki pri renovacii i rekonstrukcii stroitel'nyh ob'ektov [Application of architectural bionics in the renovation and reconstruction of building objects]. *Nauchnyj vestnik gosudarstvennogo avtonomnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya «Nyuinnomysskij gosudarstvennyj gumanitarno-tekhnicheskij institut»*, 2020; 1: 5–6. (In Russian)

4. Muzalevskaya YU.E Metod hudozhestvennogo proektirovaniya na osnove zakonov bioniki [Method of artistic design based on the laws of bionics]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Tekhnologiya legkoj promyshlennosti*, 2018; 41(3): 79–83. (In Russian)

5. Pavlova V.A. Prirodoekvivalentnaja arhitektura v sovremennyh tvorcheskikh koncepcijah [Preradoviceva architecture in the modern creative concepts]. *Architecture and Modern Information Technologies*, 2019, 1(46): 340–355. (In Russian)

6. Yanping Yuan, Xiaoping Yu, Xiaojiao Yang, Yimin Xiao, Bo Xiang, Yi Wang Bionic building energy efficiency and bionic green architecture. *A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017; 74: 771–787, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.004>.

7. Mayatskaya I., Eremin V. Bionics and the choice of rational structural form. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol 110, 01042, <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/20191001042>.

8. Lesovik V.S., Per'kova M.V., Babaev V.B. Arhitekturnaja geonika kak mezhdisciplinarnoe napravlenie v arhitekturnoj nauke i praktike [Architectural geonics as interdisciplinary direction in architectural science and practice]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhov*, 2015; 6: 74–79. (In Russian)

9. Pershina I.L. Arhitekturnaya geonika: novye podhody k arhitekturnomu poisku komfortnoj sredy obitaniya [Architectural geonics: new approaches to the architectural search for a comfortable living environment]. *Science, Education and Experimental Design at the Moscow Architectural Institute*, 2018: 430–431. (In Russian)

10. Elistratkin M.Yu., Shapiro A.E., Milkina A.S., Lesovik G.A., Ageeva M.S. Geonika. Geommimetika kak osnovopolagayushchee napravlenie dlya razvitiya stroitel'noj industrii [Geonics. Geommimetics as a fundamental direction for the development of the construction industry]. *Science-intensive technologies and innovations*, 2019: 125–129.

11. Elistratkin M.Yu., Glagolev E.S., Shapiro A.E. Geonika. geomimetika i additivnye tekhnologii [Geonics. geomimetics and additive technologies]. *Science-intensive technologies and innovations*, 2019: 121–124. (In Russian)

12. Kazlitina O.V., Martynova K.Yu., Adonin S.V., Lazarev P.I., Motorykin D.A., Antonyuk R. Geonika. Geommimetika kak nauka o razrabotke i primenении effektivnyh kompozitov dlya monolitnogo stroitel'stva [Geonics. Geommimetics as a science of the development and application of effective composites for monolithic construction]. *Science-intensive technologies and innovations*, 2019: 221–224.

13. Bychkova A.A. Otobazhenie sinergetiki v arhitekturnoj geonike (Geomimetike) [Displaying synergetics in architectural geonics (geomimetics)]. *Economics. Society. Man*, 2019: 57–61.

14. Cvetkova JU.P. Geonika kak novoe stilisticheskoe napravlenie v arhitekture [Geonics as a new stylistic direction in architecture]. *Fundamental basis of building materials*, 2017: 1260–1265.

15. Nemtseva A.V., Ponomareva M.M. Arhitekturnaya geonika v sovremennyh tvorcheskikh koncepcijah [Architectural geonics in modern creative concepts]. *Nature-like technologies of building composites to protect the human environment*, 2019: 34–38. (In Russian)

16. Lesovik V., Volodchenko A., Glagolev E., Lashina I., Fischer H. Geonics (geomimetics) as a theoretical basis for new generation compositing. *14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019)*. Cep. "Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences", 2019: 344-347, https://doi.org/10.1007/978-3-030-22974-0_83.
17. Lesovik V.S., Lesovik O.V., Volodchenko A.A. Geonics (Geomimetics) as a Theoretical Approach for Designing and Production of Natural-Like Heat-Insulating Structurally and Composites with Acoustic Properties. *Journal of southwest jiaotong university*, 2020; 55(3) <https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.55.3.14>.
18. Pershina I. L. On study and accounting of geophysical fields in architectural space of sacral purpose. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 687, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/687/5/0550>.
19. Lesovik, V. S. Geneticheskie osnovy energosberezheniya v promyshlennosti stroitel'nykh materialov [Genetic foundations of energy saving in the construction materials industry]. *Izv.vuzov. Construction*, 1994; 7: 96-100. (In Russian)
20. Lesovik V.S. Snizhenie energoemkosti proizvodstva stroitel'nykh materialov za schet ispol'zovaniya energetiki geologicheskikh i tekhnogennykh processov [Reduction of energy intensity of production of building materials due to the use of energy of geological and technogenic processes]. *Ibaus. Internationale Baustofftagung*, Weimar, 2012.
21. Gar'kina I.A., Danilov A.M. Korolev E.V. Evolyucija predstavlenij o kompozicionnykh materialah s pozicij smeny paradigm [Evolution of ideas about composite materials from the standpoint of changing paradigms]. *Construction materials*, 2018; 1(2): 60-62.
22. Eshbi U. R. *Vvedenie v kibernetiku* [Introduction to Cybernetics]. Translated from English. Moscow: KomKniga, 2006, 432 p.
23. Korolev E. V. Perspektivy razvitiya stroitel'nogo materialovedeniya [Prospects for the development of construction materials science]. *Academia, Architecture and Construction*, 2020, No. 3. (In Russian)
24. Danish A., Mosaberpanah M.A. Formation mechanism and applications of cenospheres: a review// *Journal of Materials Science*, 2020; 55(11): 4539–4557.
25. Fedjuk R.S., Mochalov A.V., Pezin D.N., Timohin R.A. Samouplotnyayushchiesya betony s primeneniem othodov rastenievodstva [Self-compacting concrete with the use of crop waste]. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University*, 2018; 15, No 2 (60): 294-304.
26. Rajabi A.M., Omid Moaf F., Abdelgader H.S. Evaluation of Mechanical Properties of Two-Stage Concrete and Conventional Concrete Using Nondestructive Tests. // *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020; 32 (7), 04020185.
27. Suleimanova L.A., Malyukova M.V., Koryakina A.A. Dekorativnye betony v arhitekturnoj geonike [Decorative concretes in architectural geonics]. Nature-like technologies of building composites to protect the human environment, 2019: 57-61.
28. Lepskiy, V. Evolution of cybernetics: philosophical and methodological analysis. *Kybernetes*, 47(2): 249-261. <https://doi.org/10.1108/K-03-2017-0120>.
29. Elistratkin M.Y., Glagolev E.S., Absimetov M.V., Voronov V.V.: Composite Binder for Structural Cellular Concrete. *Materials Science Forum*, 2019; 945: 53-58, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.53>.
30. Ayzenshtadt A.M., Shinkaruk A.A., Frolova M.A. Possible Criterion for Evaluating the Compatibility of Components in the Building Mixtures. *Innovations and Technologies in Construction. BUILDINTECH BIT. Lecture Notes in Civil Engineering*, 2020; vol. 95, https://doi.org/10.1007/978-3-030-54652-6_42.
31. Bystrova T. Y. Concept of Organic Architecture in the Second Half of the XXth Century in the Context of Sustainable Development. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019; vol. 481, 01202, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/481/1/012020>.
32. Glagolev E.S. Development of composite binders' compositions for additive technologies in low-rise building construction. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2020; 95: 150-157, https://doi.org/10.1007/978-3-030-54652-6_23.
33. Afanas'ev M.N. Formirovanie teoreticheskikh osnov modifikacii betonov [Formation of theoretical foundations of concrete modification]. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire*, 2019; 4-1 (48): 26-28. (In Russian)
34. Chernyshov E.M. Materialovedenie i tekhnologiya stroitel'nykh kompozitov kak sistema nauchnogo znaniya i predmet razvitiya issledovaniy. CHast' 1. Postanovka problemy i ee sushchestvo [Materials science and technology of building composites as a system of scientific knowledge and a subject of research development]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo*, 2018;12 (720): 41-51. (In Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Лесовик Валерий Станиславович. Формулировка направления и темы исследования, руководство процессом разработки темы и написания статьи, консультирование по теме исследования.

Шеремет Алена Анатольевна. Анализ содержания вопросов и результатов исследования, написание, редактирование и оформление статьи.

Чулкова Ирина Львовна. Консультации, написание и редактирование статьи.

Журавлева Алина Эдуардовна. Написание и редактирование статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Valeriy S. Lesovik – direction and research topic formulation, leadership in the development of the topic and writing an article, consulting on the research topic.

Alena A. Sheremet – issues status and research results analysis, writing, article editing and design.

Irina L. Chulkova – consulting, article writing and editing.

Alina E. Zhuravleva – article writing and editing.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Лесовик Валерий Станиславович – д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ, чл.-кор. РААСН, ORCID ID 0000-0002-2378-3947, заведующий кафедрой строительного материаловедения изделий и конструкций Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, (Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46, e-mail: naukavs@mail.ru).

Шеремет Алена Анатольевна – аспирант кафедры строительного материаловедения изделий и конструкций, ORCID ID 0000-0001-5320-3440, ассистент кафедры дизайна архитектурной среды Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, (Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, e-mail: aleen_94@mail.ru).

Чулкова Ирина Львовна – д-р техн. наук, ORCID ID 0000-0002-2378-3947, проф. Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СИБАДИ), (Россия, 644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5, e-mail: le5@inbox.ru).

Журавлева Алина Эдуардовна – аспирант кафедры строительного материаловедения изделий и конструкций Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, (Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46, e-mail: alex.ermolaewa@yandex.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valery S. Lesovik (Belgorod, Russia) – Dr. of Sci., Professor, an honored worker of science of the Russian Federation, a corresponding member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAASN), ORCID ID 0000-0002-2378-3947, Head of the Construction Materials Sciences Products and Structures Department, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University. (V.G. Shukhov BSTU), (Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str. 46, e-mail: naukavs@mail.ru).

Alena A. Sheremet (Belgorod, Russia) - postgraduate student of the Construction Materials Sciences Products and Structures Department, ORCID ID 0000-0001-5320-3440, assistant of the Architectural Environment Design Department, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University, (Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str. 46 e-mail: aleen_94@mail.ru).

Irina L. Chulkova (Omsk, Russia) – Dr. of Sci., Professor of Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), (Russia, 644080, Omsk, prospekt Mira, 5, e-mail: le5@inbox.ru).

Alina E. Zhuravleva (Belgorod, Russia) - postgraduate student of the Construction Materials Sciences Products and Structures Department, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University (V.G. Shukhov BSTU), (Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str. 46 e-mail: alex.ermolaewa@yandex.ru).

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются рукописи по направлениям: Транспорт. Транспортные и технологические машины; Строительство. Строительные материалы и изделия; Редакция принимает к рассмотрению **оригинальные научные статьи** объемом 8–10 стр. машинописного текста через 1 интервал, 5–8 рисунков и (или) таблиц, 20–40 ссылок; **обзорные статьи** – (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – от 10 и более страниц, от 5 и более рисунков, до 80 ссылок.

Статья должна быть неопубликованной ранее в других изданиях, написана в контексте современной литературы, обладать новизной и соответствовать профилю журнала. Автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирования и ссылок на официальные документы и другие источники. Редакция принимает на себя обязательство ограничить круг лиц, имеющих доступ к присланной в редакцию рукописи, сотрудниками редакции, членами редколлегии, а также рецензентами данной работы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий статья будет **ретрагирована** (отозвана из печати).

Следует уделить особенное внимание качеству перевода. Недопустимо при переводе пользоваться машинами-переводчиками. Перевод должен быть выполнен профессиональными переводчиками, а лучше – носителем английского языка. Необходимо учесть, что законодательство охраняет права переводчиков авторским правом наравне с правами авторов оригинальных произведений. Перевод текста – творческий процесс, производный объект авторского права, т.е. переводчик – соавтор нового произведения.

1 УДК. На первой странице, слева в верхнем углу без отступа, указываются индекс по универсальной десятичной классификации (УДК) (размер шрифта 10 пт).

2. Заглавие статьи. Заголовок (максимально 10-12 слов) должен быть информативным, лаконичным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы. Приводится на русском и английском языках, по центру полужирным шрифтом размером 12 пт. прописными буквами.

3. Фамилии авторов. Количество авторов не должно превышать четырех. Для англоязычных метаданных важно соблюдать вариант написания сведений об авторе в последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия (Anna V. Ivanova). При латинизации фамилии можно воспользоваться системой 1 BSI – Британский Институт Стандартов (British Standards Institution) транслитерации на сайте <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 представлены на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Обсуждение и заключение. Раздел содержит интерпретацию полученных результатов исследования, предположения о полученных фактах, сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

9. 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 A4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом употреблении должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подрисочной 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 – подрисочные 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. Корректуре статей авторам не высылается, тем не менее вопросы, возникающие в процессе редактирования высылаются авторам для согласования.

Окончательный вариант макета статьи высылается по электронной почте автору на утверждение. На рассмотрение отводится три дня, по истечении которых в случае неполучения ответа от автора, макет автоматически считается автором одобренным и в представленном виде направляется в печать.

Публикация. Подготовленный к публикации макет тиражируется в типографии СибАДИ и размещается на сайте журнала в открытом бесплатном доступе. Публикация всех статей одного выпуска осуществляется единой датой.

Метаданные опубликованных статей выпуска регистрируются в РИНЦ, размещаются в библиографических сервисах и базах данных в сроки, установленные соответствующими договорами, распространяются по подписке.