

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



научный рецензируемый журнал

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

“Vestnik SibADI”

Том 19, № 6. 2022
Vol.19, No. 6. 2022

наука
science

creation
творчество

образование
education

innovations
инновации

technology
технологии

tradition
традиции

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

ВЕСТНИК СИБАДИ

THE RUSSIAN AUTOMOBILE AND HIGHWAY INDUSTRY JOURNAL

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

ТОМ 19, № 6. 2022

VOL. 19, No. 6. 2022

Сквозной номер выпуска – 88

Continuous issue – 88

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 Ural-Press catalog

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

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», 2022

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

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

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

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

2.9.4. – Управление процессами перевозок (технические науки),

2.9.5. – Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки),

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

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

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

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

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

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

Журнал индексируется и архивируется:

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ);

в международной базе Dimensions;

международной интерактивной справочно-библиографической системе EBSCO;

международной реферативной базе периодических печатных изданий

Ulrichsweb Global Serials Directory;

международной базе открытых публикаций Google Академия;

международной электронно-библиотечной системе The European Library;

научном информационном пространстве «Соционет»;

электронном каталоге научно-технической литературы ВИНТИ РАН;

научной электронной библиотеке «Киберленинка»;

Directory of Open Access Journals (DOAJ SEAL);

CNKI scholar.

Журнал является членом:

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), CrossRef

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Подписано в печать 19.12.2022. Дата выхода в свет 23.12.2022. Формат 60×84 1/8 Гарнитура Arial. Печать оперативная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 27,25 Тираж 500 экз. Заказ 500 экземпляров. Свободная цена. Отпечатано в типографии Издательско-полиграфический комплекс Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия

Контент доступен под лицензией CC BY.

Поступившие в редакцию материалы не возвращаются.

Гонорары не выплачиваются.

Все статьи публикуются бесплатно.

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

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», 2022

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

The journal is indexed and archived:

in Russian Index of Scientific Citations;

Dimensions;

EBSCO;

Ulrichsweb Global Serials Directory;

Google scholar

The European Library;

SOCIONET;

VINITI RAS;

Cyberlenika;

The Directory of Open Access Journals (DOAJ SEAL);

CNKI scholar.

The Journal is a member of

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

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



Signed in print on 19.12.2022. Publication date is 23.12.2022. Format is 60 × 84 1/8.

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

Content is available under license CC BY.

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

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Транспортное, горное и строительное машиностроение

Корчагин Павел Александрович, д-р техн. наук, проф., проректор по научной работе и цифровой трансформации, 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

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

Транспорт

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

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

Строительство и архитектура

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,
ORCID ID 0000-0003-2254-8803

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 0000-0002-2409-4078

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Макеев Сергей Александрович, д-р техн. проф. наук
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 57200729552, **Researcher ID** AAU-8361-2020, **ORCID ID** 0000-0002-2915-982X

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL TEAM

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

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

Transport, mining and mechanical engineering

Pavel A. Korchagin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of 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

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

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

Transport

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

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

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

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

Construction and architecture

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

Scopus Author ID 6602369365, **Researcher ID** B-7877-2019,
ORCID ID 0000-0003-2254-8803

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 0000-0002-2409-4078

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

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

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

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

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

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

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

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

Scopus Author ID 56487473100

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

В. Н. Кузнецова, И. С. Кузнецов

**ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ РЕМОНТА НЕФТЯНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА 790**

В. А. Николаев

**КОНСТРУКТИВНАЯ КОМПОНОВКА И РЕЖИМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ
БОЛЬШОГО РОТОРА ПРЯМОТОЧНОГО РОТОРНОГО РЫХЛИТЕЛЯ 800**

Н. Т. Сурашов, Д. Н. Толымбек

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗЕМЛЕРОЙНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН
ОТВАЛЬНОГО ТИПА 814**

И. С. Тюрменов, А. С. Краюшкин, Д. А. Шорохов

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПО УПЛОТНЕНИЮ ГРУНТА ВИБРАЦИОННЫМ КАТКОМ НАММ 3411 828**

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

А. П. Жигаadlo, Ю. П. Макушев

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ
ФОРСУНОК С ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ 842**

А. В. Куликов, П. А. Павлов, А. А. Куликов

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК
ХИМИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ ИЗ ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ
В БЛИЖНЕЕ И ДАЛЬНЕЕ ЗАРУБЕЖЬЕ 858**

И. И. Любимов, Н. Н. Якунин, Н. В. Якунина

**АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУБЪЕКТОВ
ПАССАЖИРСКИХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК 878**

А. И. Недобитков

**ЦИФРОВАЯ ТРАНСПОРТНАЯ ТРАСОЛОГИЯ НА ОСНОВЕ JAGISOFT
METASHARE И БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА 890**

О. А. Родионов, Б. Рашид

**РАЗРАБОТКА СЕМАНТИЧЕСКОЙ КАРТЫ ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО АВТОМОБИЛЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ОДНОВРЕМЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ
И КАРТОГРАФИРОВАНИЯ 900**

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Т. В. Боброва

**АКТУАЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ
ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОГО ПОТОКА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОЕКТА
ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ 916**

Л. В. Ильина, Л. Н. Тацки, К. С. Дьякова

**ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ БАКТЕРИАЛЬНЫМИ
РАСТВОРАМИ, ИНИЦИИРУЮЩИМИ ОТЛОЖЕНИЕ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ.
ОБЗОР 928**

Ю. В. Краснощеков, М. Ю. Заполева

УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЯСОВ АНТЕННЫХ ОПОР 936

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Victoriya N. Kuznetsova, Ilya S. Kuznetsov

**SELECTION OF EQUIPMENT FOR OIL TANK REPAIR
IN NORTHERN CONDITIONS 791**

Vladimir A. Nikolayev

**STRUCTURAL LAYOUT AND OPERATING PARAMETERS
FOR A LARGE ROTOR OF A DIRECT-FLOW BUCKET WHEEL
TYPE AGGREGATOR 801**

Nurgali T. Surashov, Damir N. Tolymbek

**DEVELOPMENT OF COMPLEX INDICATORS AND EVALUATION
OF EFFICIENCY FOR DUMP-TYPE EARTHMOVING
AND TRANSPORT MACHINES..... 815**

Ivan S. Tyuremnov, Arseniy S. Krayushkin, Dmitry A. Shorokhov

**EXPERIMENTAL STUDIES ON COMPACTION
OF SOIL WITH HAMM 3411 VIBRATING ROLLER 829**

PART II. TRANSPORT

Aleksandr P. Zhigadlo, Yuri P. Makushev

**THEORETICAL RESEARCH AND MAINTENANCE
OF ELECTRO HYDRAULICALLY CONTROLLED INJECTORS 843**

Alexey V. Kulikov, Pavel A. Pavlov, Andrey A. Kulikov

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF MULTIMODAL TRANSPORTATION
OF CHEMICAL PRODUCTS FROM THE VOLGOGRAD REGION
TO THE NEAR AND FAR ABROAD 859**

Igor I. Lyubimov, Nikolai N. Yakunin, Natalia V. Yakunina

**ANALYSIS FOR MODELS OF INTERACTION BETWEEN ROAD PASSENGER
TRANSPORT OPERATORS 879**

Alexander I. Nedobitkov

**DIGITAL TRANSPORT TRASEOLOGY BASED ON AGISOFT METASHAPE
AND UNMANNED AERIAL VEHICLE 891**

Oleg A. Rodionov, Bader Rasheed

**DEVELOPMENT OF A SEMANTIC MAP FOR AN UNMANNED VEHICLE
USING A SIMULTANEOUS LOCALISATION AND MAPPING METHOD 901**

PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Tatyana V. Bobrova

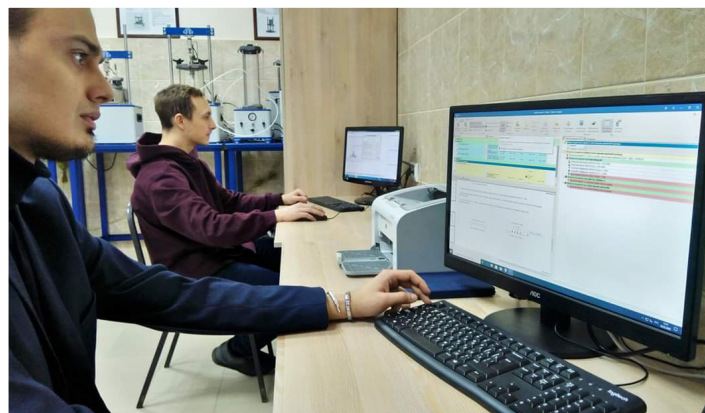
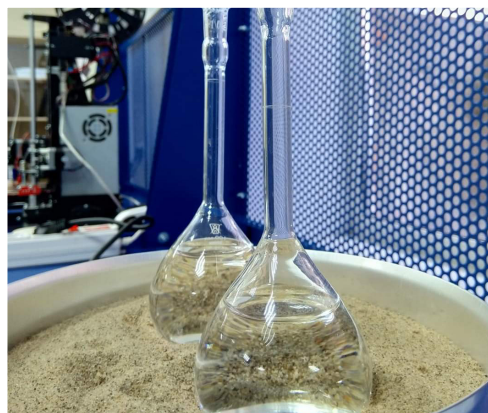
**UPDATING PARAMETERS OF AN INFORMATION MODEL
FOR ROAD CONSTRUCTION FLOW IN WORK DEVELOPMENT PROJECT 917**

Liliya V. Ilyina, Lyudmila N. Tatski, Kseniya S. Dyakova

**TREATMENT OF MATERIAL SURFACES WITH BACTERIAL SOLUTIONS
TO INITIATE THE DEPOSITION OF CALCIUM CARBONATE. REVIEW 929**

Yuriy V. Krasnoshchekov, Maria Y. Zapoleva

STABILITY OF ANTENNA SUPPORT BELTS 937



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



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

УДК 621.642.3

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-790-799>

EDN: PKKBRA

Научная статья



ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РЕМОНТА НЕФТЯНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

В. Н. Кузнецова, И. С. Кузнецов**Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет «СибАДИ»**г. Омск, Россия,**dissovetsibadi@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3546-0894>**mrprogamer111@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-6524-4976>***ответственный автор*

АННОТАЦИЯ

Введение. Нефтяная отрасль является ключевой составляющей экономики Российской Федерации. Для хранения нефти используется большое количество резервуаров, каждый из которых нуждается в своевременном ремонте. По результатам исследований практически половина аварий вызвана сверхнормативной неравномерной осадкой резервуара, которая вызывает преждевременный выход их из строя. Для восстановления исправного и работоспособного состояния резервуаров необходимо проведение ремонтных работ, качество и эффективность которых зависит от используемого ремонтного оборудования. Актуальной задачей является обоснование выбора оборудования для ремонта резервуаров, в частности стальных резервуаров вертикального типа.

Методы и материалы. Был проведен обзор различных типов резервуаров, который показал, что наибольшее распространение получили вертикальные стальные резервуары. Одним из способов устранения неравномерной осадки резервуара является его подъем при помощи домкратов и формирование нового основания с устранением наклона.

Результаты. Был рассмотрен процесс ремонта стального вертикального резервуара объемом 10000 м³. Получены значения массы резервуара при заполнении жидкими нефтепродуктами на 1% от максимальной заполняемости. Получено значение нагрузки на одно подъемное устройство. Выполнено проектирование конструкции устройства и расчет на прочность в программе Компас 3D.

Заключение. Был определен наиболее эффективный тип подъемника из существующих, выполнена модернизация его конструкции. Расчет на прочность показал, что гидравлический подъемник работоспособен при заданных условиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ремонт резервуара, подъемное устройство, резервуар стальной, способ подъема резервуара, хранение нефтепродуктов.

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

Статья поступила в редакцию 13.11.2022; одобрена после рецензирования 29.11.2022; принята к публикации 19.12.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Кузнецова В. Н., Кузнецов И. С. Выбор параметров оборудования для ремонта нефтяных резервуаров в условиях севера // *Вестник СибАДИ*. 2022. Т.19, № 6 (88). С. 790-799. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-790-799>

© Кузнецова В. Н., Кузнецов И. С., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-790-799>

EDN: PKKBRA

SELECTION OF EQUIPMENT FOR OIL TANK REPAIR IN NORTHERN CONDITIONS

Victoriya N. Kuznetsova, Ilya S. Kuznetsov*

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)

Russia, Omsk

dissovetsibadi@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3546-0894>

mrprogamer111@gmail.com, <http://orcid.org/>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The oil industry is a key component of the economy of the Russian Federation. A large number of tanks are used to store oil, each of which needs timely repair. According to the results of some research, almost half of the accidents are caused by excess uneven settlement of the tank, which causes premature failure. To restore the serviceable and operable condition of the tanks, it is necessary to carry out repair work, the quality and efficiency of which depends on the repair equipment used. An urgent task is to justify the choice of equipment for the repair of tanks, in particular, steel tanks of a vertical type.

Methods and materials. A review of the different types of tanks was carried out and showed that vertical steel tanks are the most widely used. One of the ways to eliminate the uneven settlement of the tank is to raise it with the help of jacks and form a new base with the elimination of the slope.

Results. The repair process for a 10,000 m³ steel vertical tank was considered. The values of the mass of the tank were obtained when filling with liquid petroleum products at 1% of the maximum occupancy. The value of the load on one lifting device is obtained. The design of the device structure and the strength calculation in the Compass 3D program were completed.

Conclusions. The most efficient type of the lift from the existing ones was determined, and its design was modernized. The strength calculation showed that the hydraulic lift is efficient under the given conditions.

KEYWORDS: tank repair, lifting device, steel tank, tank lifting method, oil storage.

ACKNOWLEDGEMENTS: The author thanks for the support of scientific research the team of the department «Operation of oil and gas and construction equipment» of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «SibADI», as well as the reviewers of the article.

The article was submitted 13.11.2022; approved after reviewing 29.11.2022; accepted for publication 19.12.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Kuznetsova Victoriya N., Kuznetsov Ilya S. Selection of equipment for oil tank repair in northern conditions. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (6): 790-799. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-790-799>

© Kuznetsova V. N., Kuznetsov I. S., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

Для поддержания резервуаров в технически исправном состоянии проводится планово-предупредительное техническое обслуживание, включающее осмотр, текущий и капитальный ремонт самого резервуара и всего оборудования резервуара. Ремонт резервуарных цистерн является неотъемлемой частью планового ремонта и реконструкции объектов. Объем работ включен в раздел «Резервуарные парки» комплексных программ диагностики, технического перевооружения, реконструкции и капитального ремонта объектов магистральных нефтепроводов [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Выбор емкости резервуара для его ремонта основывается на оценке его технического состояния.

Данными для анализа и оценки технического состояния емкости резервуара являются [7, 8]:

- результаты диагностики;
- информация о ранее обнаруженных и исправленных дефектах;
- данные технического паспорта емкости резервуара.

В связи с фактическим расположением производственных объектов, с учетом тенденции

развития производства нефтепродуктов на Крайнем Севере и необходимости увеличения объемов хранения, требуется строительство, а следовательно, дальнейшая эксплуатация и ремонт крупногабаритных резервуаров на участках, представленных неблагоприятными для строительства резервуаров илистыми, вечномерзлыми, неоднородными грунтами, довольно часто возникает вопрос о ремонте оснований и фундаментов [9, 10, 11, 12, 13, 14].

По данным исследования Г. Г. Васильева и А. П. Сальникова, выделено несколько возможных причин разрушения нефтяных резервуаров. Основные причины представлены в виде диаграммы на рисунке 1 [15, 16, 17].

Исходя из полученных результатов видно, что основными причинами разрушения резервуаров являются сверхнормативные осадки основания, поэтому повышение надежности оснований резервуаров в целях снижения аварийных ситуаций является актуальной задачей.

Существует несколько типов резервуаров для хранения жидких нефтепродуктов. Подземные хранилища устраивают в естественных или искусственных полостях под землей.

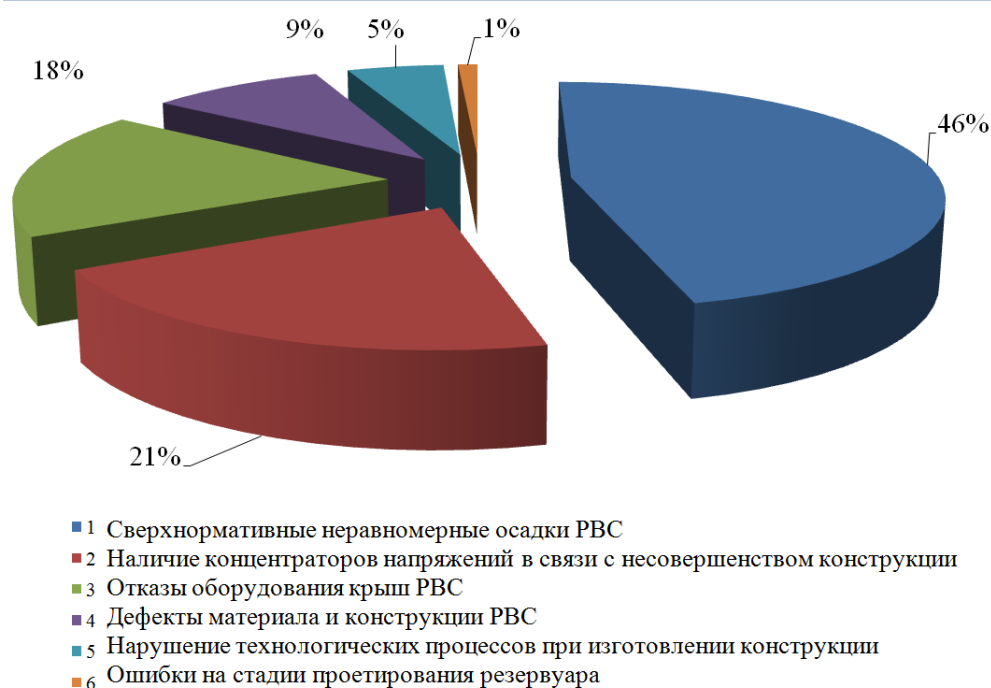


Рисунок 1 – Основные причины разрушения резервуаров
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Main causes of tank failures
Source: compiled by the authors.

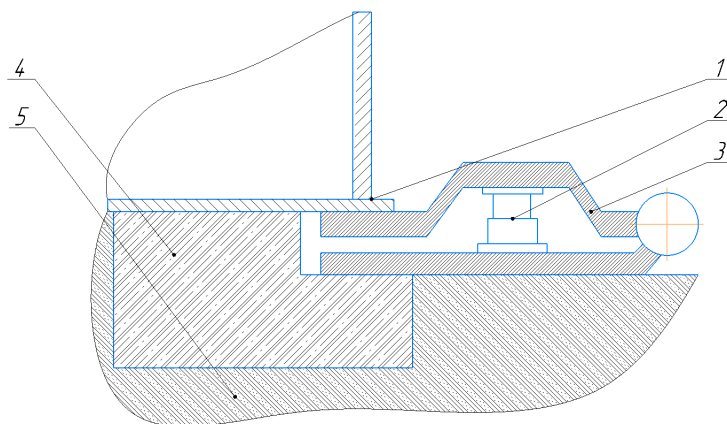


Рисунок 3 – Гидравлический подъемник типа «ножницы»:
1 – резервуар; 2 – гидравлический домкрат; 3 – подъемное устройство;
4 – фундамент резервуара; 5 – грунтовое основание
Источник: составлено авторами.

Figure3– Scissor-type hydraulic lift
1 – storage tank; 2 – hydraulic jack; 3 – lifting device;
4 – reservoir foundation; 5 – ground base
Source: compiled by the authors.

Также существуют горизонтальные хранилища небольшого объема (до 100 м³). Среди наземных резервуаров большой емкости выделяют железобетонные и вертикальные стальные резервуары. Их емкость может составлять 10–100 тыс. м³. Исходя из преимуществ и недостатков различных типов резервуаров и анализируя фактическое применение, большинство резервуаров на предприятиях нефтегазовой отрасли, в том числе в северных районах, составляют вертикальные стальные резервуары (рисунок 2).



Рисунок 2 – Резервуар вертикальный стальной
Источник: <https://snmash.ru/production/rezervuarnoe-oborudovanie/rezervuary-rulonnoego-tipa-rvs.html>

Figure 2 – Vertical steel tank
Source: <https://snmash.ru/production/rezervuarnoe-oborudovanie/rezervuary-rulonnoego-tipa-rvs.html>

Чаще всего резервуары возводят на площадках, представленных глинистыми и суглинистыми грунтами, либо скальными породами.

Выбор типа основания имеет важное значение в обеспечении устойчивости и долговечности всей конструкции. Правильная подготовка основания и фундамента обеспечит снижение воздействия осадков и грунтовых вод, а значит, облегчит последующую эксплуатацию и продлит срок между выполнением ремонтных работ [18, 19, 20, 21, 22].

В практике строительства резервуаров в нашей стране наиболее экономичным, а значит распространенным, является строительство на естественном основании. Для этого выполняют планировочные работы на площадке и устраивают песчаную или грунтовую подушку. Данный тип основания имеет один существенный недостаток. Спустя время основание резервуара имеет неравномерную осадку дна или же крен. Данный дефект влияет на концентрацию напряжений в местах сварных соединений, а также создается сверхнормативный момент в месте соединения дна и стенки резервуара, что во многом связано со слабой несущей способностью грунта. Это было отмечено в исследованиях В. Б. Галеева, Р. Бэллаи, К. Кавано [23, 24, 25, 26]. Также анализ причин разрушения резервуаров проведен М. В. Терентьевой, по данным которого причиной разрушения стального вертикального резервуара (РВС) в 35% случаев являлась неравномерная осадка основания [27].

Исходя из вышесказанного видно, что необходимо исследовать ремонт дефектов, связанных с осадками резервуаров.

Поскольку неравномерные осадки оснований резервуаров зачастую являются причиной аварий РВС, далее будет рассмотрен процесс устранения данного дефекта. Одним из устройств, применяемых при выполнении ремонтных работ, является гидравлический домкрат для подъема резервуара. Существует способ подъема резервуара, при котором выполняется подкоп грунта и в образованную нишу устанавливается домкрат. К недостаткам такого способа относят большой объем земляных работ, которые трудновыполнимы в условиях Крайнего Севера, а также невозможность восстановить фундамент с приданием изначальной прочности. Подъем резервуара возможно выполнять и другим способом. К боковой поверхности резервуара приваривают инвентарные ребра жесткости. Для выполнения подъема к ребрам жесткости прикрепляют стойку совместно с гидравлическим домкратом. Недостатком данного способа является необходимость приварки ребер жесткости и последующего их удаления по завершении работ.

Ранее отечественными специалистами нефтегазовой отрасли был разработан способ¹ подъема нефтяных резервуаров при помощи гидравлического подъемника ножничной конструкции (рисунок 3). Основными достоинствами данного способа по сравнению с другими являются: незначительное вмешательство, целостность фундамента резервуара, а также небольшой объем земляных работ; возможность выполнения ремонтных работ без необходимости опорожнения и очистки резервуара.

Для устранения наклона либо просадки резервуара используют некоторое количество устройств данного типа, располагая их вокруг ремонтируемого резервуара. Рассмотрим процесс выполнения ремонта резервуара номинальным объемом 10000 м³ с применением гидравлического подъемника данного типа. При капитальном ремонте стальных резервуаров емкость требуется полностью вывести из эксплуатации. Ее в обязательном порядке опорожняют, проводят дегазацию и очищают от коррозии. В рамках проведения работ оценивают техническое состояние всех элементов

конструкции – от стенок до днища и кровли. В регламент включают устранение дефектов и исправление положения резервуара, если его осадка отклоняется от нормативов [24, 25]. Осуществляют подъем резервуара гидравлическим подъемником типа «ножницы» на заданную высоту. После этого пространство между основанием и днищем резервуара заполняют грунтовой смесью и выравнивают его для устранения наклона резервуара. Затем резервуар опускают, извлекают подъемные устройства, а образованные ниши заполняют грунтовой смесью.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для определения количества гидравлических подъемников и нагрузки, приходящейся на них, необходимо выполнить расчет по ниже приведенной методике.

Исходные данные для расчёта представлены в таблице 1.

Из технических данных известно, что масса резервуара $m_p = 234346$ кг, а его диаметр $D = 34,20$ м. Зададимся условием, что РВС заполнен на 1% от номинального объема. Исходя из расчетной высоты налива, равной 11,20 м, высота столба при десятипроцентной наполненности будет составлять 0,11 м. Тогда объем нефти будет составлять $V_p = 101$ м³. Найдем массу нефти m_n при 1% наполненности резервуара по формуле

$$m_n = V_p \cdot \rho, \quad (1)$$

где ρ – плотность нефти, принимается 0,889 т/м³.

$$m_n = 101 \cdot 0,889 = 89,8 \text{ т.}$$

Таким образом, суммарная масса резервуара, наполненного нефтью до заданной величины, будет составлять $M = 324146$ кг.

Сила тяжести, действующая на основание резервуара, рассчитывается по формуле (2):

$$F_T = g \cdot M, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

$$F_T = 9,81 \cdot 324146 = 3179872,3 \text{ Н.}$$

Полученную величину целесообразно перевести в кН. Получим $F_m = 3179,9$ кН.

¹ Пат. № 2196210: МПК E04H 7/06: Устройство для ремонта резервуара / Т.А. Кулибаев, Ф.А. Мамонов, Е.А. Аймурзаев, В.В. Попов; ИПТЭР. № 2000101635/03; заявл. 20.01.2000; опубл. 10.01.2003.

Таблица 1
Техническая характеристика РВС-10000
Источник: составлено авторами.

Table 1
Technical specification of RVS-10000
Source: compiled by the authors.

Наименование	Величина
Объем, м ³	10000
Высота налива, м	11,2
Диаметр, м	34,2
Толщина стенки, мм	10
Масса, кг	234346

Таблица 2
Параметры расчета на прочность
Источник: составлено авторами.

Table 2
Strength calculation parameters
Source: compiled by the authors.

Наименование	Величина
Марка стали	Зкп
Предел текучести, МПа	235
Плотность, кг/м ³	7800
Предел прочности при сжатии, МПа	410

В соответствии с типовой технологией подъема резервуара стойки для подъема резервуара привариваются с шагом в 4 м, соответственно домкраты устанавливаются с тем же шагом, при модернизации технологии прием такой же шаг установки устройств типа «ножницы».

Для выбранного резервуара количество домкратов, исходя из периметра резервуара, который равен 107,44 м, принимаем количество домкратов, равное 27 шт. Сила, действующая на одно приспособление, будет составлять 117,77 кН, что составляет ~ 12000 кг.

Примем, что оптимальным вариантом по грузоподъемности и стоимости будет домкрат грузоподъемностью 15000 кг, который представлен в патенте RU2165039C1². Данный вариант гидравлического домкрата обеспечивает удержание груза на заданной высоте и повышение надежности при эксплуатации.

Была спроектирована конструкция подъемного устройства при помощи системы САПР Компас 3D (рисунок 4).

После проектирования конструкции был выполнен прочностный анализ с использованием встроенной утилиты APMFEM. Параметры прочностного расчета представлены в таблице 2. При построении были установлены следующие параметры сетки конечных элементов: 4-узловые тетраэдры с длиной стороны элемента, равной 10 мм. Коэффициент сгущения равен единице. Для расчетов простых конструкций такие параметры являются оптимальными, в связи с тем, что использование 10-узловых тетраэдров и меньшей длины конечных элементов практически не повышает точность, при этом затрачивается существенно больше вычислительных ресурсов. Точки закрепления выбраны таким образом, чтобы соответствовать условию, при котором перемещение механизма во время его работы равно нулю. Приложение нагрузки для верхней части устройства соответствует реакции от поднимаемого резервуара, а в нижней части устройства – реакции опоры от передачи нагрузки через гидравлический домкрат (рисунок 5).

² Пат. № 2165039: МПК F15B15/26: Гидравлический домкрат / В.И. Феллер; Научно-исследовательский институт измерительных приборов. № 99118629/06 ; заявл. 26.08.1999; опубл. 10.04.2001.

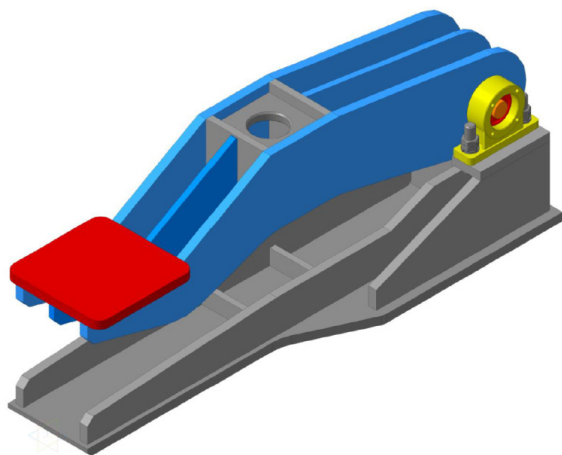


Рисунок 4 – Гидравлический подъемник типа «ножницы»
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Scissor-type hydraulic lift
Source: compiled by the authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ

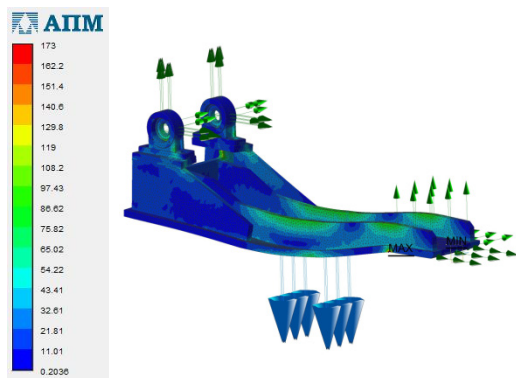
Расчет на прочность выполнялся для модели нижней и верхней части подъемного устройства отдельно. Результаты статического расчета на прочность методом конечных элементов представлены на рисунке 5.

Анализ полученных результатов показывает следующее. Наибольшее напряжение в

верхней части подъемного устройства возникает в месте изгиба вблизи штока гидравлического домкрата, а также в крайней его части в месте приложения нагрузки. Для нижней части подъемного устройства наибольшие напряжения проявляются рядом с основанием домкрата. Максимальное значение напряжения нижней части подъемного устройства достигает 173 МПа. Для верхней части подъемного устройства оно составляет 236 МПа.

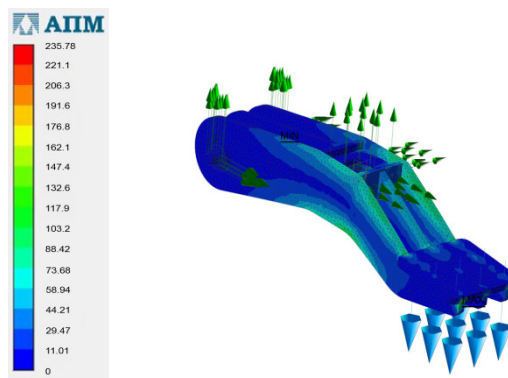
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для хранения жидких нефтепродуктов широкое распространение получили стальные резервуары. По мере их эксплуатации необходимо выполнять ремонтные работы, чтобы поддерживать их исправное состояние и не допускать аварий. Гидравлический домкрат является одним из устройств, необходимых для выполнения работ. Проведенное исследование позволило выявить наиболее эффективный тип такого подъемника и усовершенствовать его конструкцию. Для расчета на прочность была задана нагрузка выше расчетной – 16 кН. При этом максимальное напряжение по пределу текучести составило 236 МПа, что говорит о возможности использования устройства данного типа при ремонте стального резервуара объемом 10000 м³.



а

Рисунок 5 – Эквивалентное напряжение по Мизесу:
а – нижняя часть устройства;
б – верхняя часть устройства
Источник: составлено авторами.



б

Figure 5 – Equivalent voltage according to Mises:
а – the bottom of the unit;
б – upper part of the unit
Source: compiled by the authors.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алиев Р. А. Сооружение и ремонт газонефтепроводов, газохранилищ и нефтебаз. М.: Недра, 1987. 271 с.
2. Гайсина Л. М. Архитектура социальных приоритетов в российских компаниях нефтегазового комплекса // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Гуманитарные и социальные науки. 2011. Т. 6. С. 54–60.
3. Байбурин Р.А. Экспертная система в обслуживании и ремонте резервуаров и резервуарных парков // Совершенствование проектирования, строительства и эксплуатации металлических резервуаров: материалы Междунар. конф. Уфа: ТРАНСТЭК, 2005. С. 88-90.
4. Golik, V. V. Zemenkova, M.Yu. Zemenkov, Y.D. Ponomareva, T.G. Thermophysical modeling of processes in the soil foundations of oil pipelines in the arctic and on the shelf. Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry this link is disabled, 2021, 2021(6), DOI: 10.24887/0028-2448-2021-6-102-107.
5. Fawaz S. Al-Anzi, Khaled Al-Zamel. Efficient Maintenance Scheduler for Near Optimum Utilization of Oil Tanks // American Journal of Environmental Sciences. 2005. Vol 1, Iss 4, P. 254-258.
6. Shu Li, Xiang-Jun Peng, Dong-Ping Yao, Lai-Gen Luo, Feng Wang. The Design of Modularized Oil Tank Measurement and Control Intelligent Unit // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2013. Vol 5, Iss 22, P. 5286-5292.
7. Nguidjol A., Dikwa J., Mevaa L., Danwe R. An Automatic Tool for the Optimisation of the Design and Realization of a Raw Palm oil Storage Tank // International Journal of Engineering and Technology. 2010. Vol 2, Iss 6, Pp.482-487.
8. Mahmoudi M., Roshan A., Mirdrikvand M. Boilover in Storage Tanks: Occurrence, Consequences and Predictions // American Journal of Oil and Chemical Technologies. 2013. Vol 01, Iss 02, P. 8-13.
9. Некрасов В.О., Земенков Ю.Д. Перспективные методы повышения эксплуатационных свойств нефтяных резервуаров // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 6 (34). 2012. С. 24-26.
10. Рябинин И. А. Надежность и безопасность сложных систем. СПб.: Политехника. 2000. 248 с.
11. Ханухов Х. М. Анализ причин аварий стальных резервуаров и повышение безопасности их эксплуатации // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2003. № 10. С. 49–52.
12. Акимов В. А., Лапин В. Л., Попов В. М. Надежность технических систем и техногенный риск. М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002. 367 с.
13. Галюк В.А. Эксплуатация и ремонт резервуаров большой вместимости. М.: ВНИИОЭНГ, 1987. 61 с.
14. Барская Г. Б. Анализ причин неравномерных осадков резервуаров в Западной Сибири / Г. Б. Барская // Известия вузов. Нефть и газ. 2004. № 23. С. 36-38.
15. Васильев Г. Г. Анализ причин аварий вертикальных стальных резервуаров / Г. Г. Васильев, А. П. Сальников // Нефтяное хозяйство. 2015. № 2. С. 106-108.
16. Димов Л. А. Проектирование плитных фундаментов резервуаров для жидких углеводородов // Газовая промышленность. 2016. № 1. С. 114-117.
17. Егоров Е. А. Особенности работы и инженерный расчет вертикальных цилиндрических резервуаров / Е. А. Егоров // Нефтяное хозяйство. 1977. № 12. С. 48-59.
18. Коновалов П. А. Предельные значения средних и неравномерных осадков металлических резервуаров / П. А. Коновалов, Ю. К. Иванов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1985. № 5. С. 27.
19. Иванов Ю.К. Основания и фундаменты резервуаров / Ю. К. Иванов, П. А. Коновалов, Р. А. Мангушев, С. Н. Сотников. Москва: Стройиздат. 1989. 95 с.
20. Чепур П. В. Влияние параметров неравномерной осадки на возникновение предельных состояний в резервуаре/ П. В. Чепур, А. А. Тарасенко // Фундаментальные исследования. 2014. № 8 (7). С. 1560-1564.
21. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / под ред. Б.Е. Патона. М.: Машиностроение, 1996. 576 с.
22. Evaluation en Vue de la Determination de la Grandeur des Compartiments Coupe-Feu. Note Explicative de Protection Incendie. (2007). VKF/AEAI, doc. 115-03f.
23. Галеев В. Б. Аварии резервуаров и способы их предупреждения / В. Б. Галеев, Д. Ю. Гарин, Ю. А. Фролов. Уфа, 2004. 164 с.
24. Галеев В. Б. Устройство оснований резервуаров, сооружаемых на слабонесущих грунтах / В. Б. Галеев, В. В. Любушкин, Н. И. Коновалов. Москва: ВНИИОЭНГ. 1989. 45 с.
25. Галеев В. Б. Проектирование оснований резервуаров на слабых водонасыщенных грунтах // Нефтепромысловое строительство. Москва: ВНИИОЭНГ. 1976. С. 13-15.
26. Bell R. A., Iwakiri J. Settlement comparison used in tank failure study // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 1980. Vol. 106. P. 153–169.
27. Андронов, И. Н. Компьютерное моделирование конструкции плитного фундамента резервуара для нефти и нефтепродуктов с использованием арматуры из материалов с памятью / И. Н. Андронов, М. В. Терентьева // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2018. № 3. С. 46-54.

REFERENCES

1. Aliev R. A. *Sooruzhenie i remont gazonefteprovodov, gazokhranilishh i neftebaz*. [Construction and repair of gas and oil pipelines, gas storages and oil depots]. Moscow: Nedra, 1987: 271. (In Russ.)
2. Gaisina L. M. Architecture of social priorities in Russian oil and gas companies [Arhitektura social'nyh

prioritetov v rossijskih kompanijah neftegazovogo kompleksa]. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Serija: Gumanitarnye i social'nye nauki*. 2011; V. 6: 54–60. (In Russ.)

3. Baiburin R. A. Jekspertnaja sistema v obsluzhivanii i remonte rezervuarov i rezervuarnyh parkov [Expert system in the maintenance and repair of tanks and tank farms]. *Sovershenstvovanie proektirovanija, stroitel'stva i jekspluatacii metallicheskih rezervuarov: materialy Mezhdunar. konf.* Ufa: TRANST. 2005: 88-90. (In Russ.)

4. Golik V. V. Zemenkova M. Yu. Zemenkov Y. D. Ponomareva T. G. Thermophysical modeling of processes in the soil foundations of oil pipelines in the arctic and on the shelf. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry* this link is disabled. 2021; 6: 102-107. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-6-102-107.

5. Fawaz S. Al-Anzi, Khaled Al-Zamel. Efficient Maintenance Scheduler for Near Optimum Utilization of Oil Tanks. *American Journal of Environmental Sciences*. 2005; Vol 1, Iss 4: 254-258.

6. Shu Li, Xiang-Jun Peng, Dong-Ping Yao, Lai-Gen Luo, Feng Wang. The Design of Modularized Oil Tank Measurement and Control Intelligent Unit. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2013; Vol 5, Iss 22: 5286-5292.

7. Nguidjol A., Dikwa J., Mevaa L., Danwe R. An Automatic Tool for the Optimization of the Design and Realization of a Raw Palm oil Storage Tank. *International Journal of Engineering and Technology*. 2010; Vol 2, Iss 6: 482-487.

8. Mahmoudi M., Roshan A., Mirdrikvand M. Boilover in Storage Tanks: Occurrence, Consequences and Predictions. *American Journal of Oil and Chemical Technologies*. 2013; Vol 01, Iss 02: 8-13.

9. Nekrasov V. O., Zemenkov Yu. D. Perspektivnye metody povyshenija jekspluacionnyh svojstv nefjanyh rezervuarov [Perspective methods for improving the operational properties of oil reservoirs]. *Truboprovodnyj transport: teorija i praktika*. 2012; 6 (34): 24-26. (In Russ.)

10. Ryabinin I. A. *Nadezhnost' i bezopasnost' slozhnyh sistem* [Reliability and security of complex systems]. St. Petersburg: Polytechnic. 2000. 248 p. (In Russ.)

11. Khanukhov Kh. M. Analiz prichin avarij stal'nyh rezervuarov i povyshenie bezopasnosti ih jekspluatacii [Analysis of the causes of accidents in steel tanks and improving the safety of their operation]. *Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroyenie*. 2003; 10: 49–52. (In Russ.)

12. Akimov V. A., Lapin V. L., Popov V. M. Nadezhnost' tehnikeskikh sistem i tehnogennyj risk. [Reliability of technical systems and technogenic risk]. Moscow: CJSC FID "Business Express". 2002: 367. (In Russ.)

13. Galyuk V. A. *Jekspluatacija i remont rezervuarov bol'shoj vmestimosti* [Operation and repair of large-capacity tanks]. Moscow: VNIIOENG, 1987: 61. (In Russ.)

14. Barskaya G. B. [Analysis of the causes of uneven sedimentation of reservoirs in Western Siberia]. *Izvestiya vuzov*. 2004; 23: 36-38. (In Russ.)

15. Vasiliev G. G., Salnikov A. P. Analiz prichin avarij vertikal'nyh stal'nyh rezervuarov [Analysis of the causes of accidents in vertical steel tanks]. *Neftjanoe hozjajstvo*. 2015; 2: 106-108. (In Russ.)

16. Dimov L. A. Proektirovanie plitnyh fundamentov rezervuarov dlja zhidkih uglevodorodov [Design of slab foundations of reservoirs for liquid hydrocarbons]. *Gazovaja promyshlennost'*. 2016; 1: 114-117. (In Russ.)

17. Egorov E. A. Osobennosti raboty i inzhenernyj raschet vertikal'nyh cilindricheskikh rezervuarov [Features of work and engineering calculation of vertical cylindrical tanks]. *Neftjanoe hozjajstvo*. 1977; 12: 48-59. (In Russ.)

18. Konovalov P. A., Ivanov Yu. K. Predel'nye znachenija srednih i neravnomernyh osadok metallicheskih rezervuarov [Limiting values of average and uneven sedimentation of metal tanks]. *Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov*. 1985; 5: 27. (In Russ.)

19. Ivanov Yu. K., Konovalov P. A., Mangushev R. A., Sotnikov S. N. [Foundations and foundations of reservoirs]. Moscow: Stroyizdat. 1989: 95. (In Russ.)

20. Chepur P. V., Tarasenko A. A. [Influence of non-uniform settlement parameters on the occurrence of limit states in a reservoir]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2014; 8 (7):1560-1564. (In Russ.)

21. *Svarnye konstrukcii. Mehanika razrushenija i kriterii rabotosposobnosti* [Welded structures. Fracture mechanics and performance criteria] / ed. B.E. Paton. Moscow: Mashinostroyenie, 1996: 576. (In Russ.)

22. Evaluation en Vue de la Determination de la Grandeur des Compartiments Coupe-Feu. Note Explicative de Protection Incendie. (2007). VKF/AEAI, doc. 115-03f.

23. Galeev V. B., Garin D. Yu., Frolov Yu. A. [Tank accidents and ways to prevent them]. Ufa, 2004: 164. (In Russ.)

24. Galeev V. B., V. V. Lyubushkin, N. I. Konovalov *Ustrojstvo osnovanij rezervuarov, sooruzhaemyh na slabonesushhih gruntah* [Construction of the foundations of tanks constructed on weakly bearing soils]. Moscow: VNIIOENG. 1989. 45 p. (In Russ.)

25. Galeev V. B. [Design of tank foundations on weak water-saturated soils]. *Neftpromyslovoe stroitel'stvo*. Moscow: VNIIOENG. 1976:13-15. (In Russ.)

26. Bell R. A., Iwakiri J. Settlement comparison used in tank failure study. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 1980; 106: 153–169.

27. Andronov I. N., Terentyeva M. V. Komp'yuternoe modelirovanie konstrukcii plitnogo fundamenta rezervuara dlja nefi i nefteproduktov s ispol'zovaniem armatury iz materialov s pamjat'ju [Computer modeling of the design of the slab foundation of a tank for oil and oil products using reinforcement from materials with memory]. *Construction of oil and gas wells on land and at sea*. 2018; 3: 46-54. (In Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Кузнецова В. Н. Руководство темой исследования. Анализ состояния вопроса и существующих решений.

Кузнецов И. С. Разработка конструкции и методики. Выполнение расчетов и чертежей. Оформление статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Victoriya N. Kuznetsova Research topic management. Analysis of the issue and current solutions.

Ilya S. Kuznetsov Development of design and methodology. Performing calculations and drawings. Article layout.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Виктория Николаевна Кузнецова – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники».

Илья Сергеевич Кузнецов – преподаватель кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники».

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Victoriya N. Kuznetsova – Dr. of Sci., Professor, Operation of Oil and Gas and Construction Machinery Department.

Ilya S. Kuznetsov – lecturer, Operation of Oil and Gas and Construction Machinery Department.

УДК 625.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-800-813>

EDN: RUEBAM

Научная статья



КОНСТРУКТИВНАЯ КОМПОНОВКА И РЕЖИМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ БОЛЬШОГО РОТОРА ПРЯМОТОЧНОГО РОТОРНОГО РЫХЛИТЕЛЯ

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема ускорения и удешевления строительства автодорог без снижения их качества может быть решена путём создания комплекса агрегатов непрерывного действия. Агрегаты, следуя друг за другом, осуществляют весь комплекс работ, направленных на строительство автодорог. Применение спутниковой навигации открывает широкие перспективы полной автоматизации агрегатов, поэтому общей целью является создание комплекса агрегатов, осуществляющих непрерывное строительство автомобильных дорог, преимущественно в автоматическом режиме. Одним из устройств, входящих в состав агрегатов непрерывного действия, является прямоточный роторный рыхлитель. Применение прямоточных роторных рыхлителей для разработки грунта сдерживается недостаточным теоретическим обоснованием их параметров. Прежде чем провести анализ взаимодействия элементов рабочих органов прямоточного роторного рыхлителя с грунтом, необходимо уточнить конструктивную компоновку ротора прямоточного роторного рыхлителя.

Методика исследования. Некоторые конструктивные параметры прямоточного роторного рыхлителя получены из логических рассуждений. Другие параметры прямоточного роторного рыхлителя получены путём построения схем воздействия ножа на грунт в плоскости и пространственного моделирования. Изначально для расчёта принят ротор прямоточного роторного рыхлителя диаметром один метр.

Результаты. Окружным и торцевым ножам присвоены номера: №1, №2, №3... по мере приближения от периферии ротора к оси его вращения. На основе принятой методики уточнена конструкция присоединения ножа, передний и задний угол окружных и торцевых ножей. Установлено предельно малое расстояние от оси вращения ротора до ближайшей точки ножа. Отсюда сделан вывод о необходимости, кроме большого ротора, соосно с ним, установить малый ротор. Определена окружная скорость лезвия окружного ножа №1 и угловая скорость большого ротора. Принято расположение ножей в три ряда, то есть ряды ножей по окружности развёрнуты под углом 120° друг относительно друга. Выявлена подача на торцевой нож, то есть толщина пласта, срезаемого торцевым ножом.

Заключение. На основе принятой методики определены геометрические и режимные параметры большого ротора прямоточного роторного рыхлителя. Установлен предельно малый радиус расположения окружных и торцевых ножей большого ротора. Для выемки грунта вблизи оси вращения ротора прямоточного роторного рыхлителя должен быть соосно установлен малый ротор с большей угловой скоростью. Направление вращения малого ротора должно быть противоположным по отношению к направлению вращения большого ротора для частичной компенсации реактивного момента, создаваемого большим ротором.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, автодороги, агрегаты непрерывного действия, прямоточный роторный рыхлитель, большой ротор, окружные ножи, торцевые ножи, геометрические и режимные параметры.

Статья поступила в редакцию 18.10.2022; одобрена после рецензирования 25.10.2022; принята к публикации 19.12.2022.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Николаев: В. А. Конструктивная компоновка и режимные параметры большого ротора прямоточного роторного рыхлителя // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 6 (88). С. 800-813. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-800-813>

© Николаев В. А., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-800-813>
EDN: PUEBAM

STRUCTURAL LAYOUT AND OPERATING PARAMETERS FOR A LARGE ROTOR OF A DIRECT-FLOW BUCKET WHEEL TYPE AGGREGATOR

Vladimir A. Nikolayev

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

ABSTRACT

Introduction. The problem of accelerating and cheapening the construction of roads without reducing their quality can be solved by creating a complex of continuous units. Units, following each other, carry out the whole complex of works aimed at the construction of roads. The use of satellite navigation opens up broad prospects for full automation of units. Therefore, the overall goal is to create a complex of units that carry out the continuous construction of roads, mainly in automatic mode. One of the devices that make up the continuous units is a direct-flow bucket wheel type aggregator. The use of direct-flow bucket wheel type aggregators for soil development is constrained by insufficient theoretical substantiation of their parameters. Before analysing the interaction of the elements of the working bodies of a direct-flow bucket wheel type aggregator with the soil, it is necessary to clarify the structural layout for the rotor of a direct-flow bucket wheel type aggregator.

The method of research. Some design parameters of a direct-flow bucket wheel type aggregator are derived from logical reasoning. Other parameters of the direct-flow bucket wheel type aggregator are obtained by constructing schemes for the impact of the knife on the ground in the plane and spatial modelling. Initially, the rotor of a direct-flow bucket wheel type aggregator with a diameter of one meter was adopted for calculation.

Results. The circular and end knives are assigned the numbers No 1, No 2, No 3, etc. as it approaches from the periphery of the rotor to the axis of its rotation. On the basis of the adopted methodology, the design of the knife attachment, the front and back corner of the circular and end knives have been clarified. An extremely small distance from the axis of rotation of the rotor to the nearest point of the knife is established. Hence the conclusion is made that in addition to a large rotor, in conjunction with it, it is necessary to install a small rotor. The circumferential velocity of the blade of no. 1 circumferential knife and the angular velocity of the large rotor are determined. It is customary to arrange the knives in three rows, that is, the rows of knives around the circumference are deployed at an angle of 120° relative to each other. The feed on the end knife was revealed, that is, the thickness of the layer cut by the end knife.

Conclusion. On the basis of the adopted methodology, the geometric and mode parameters of a large rotor of a direct-flow bucket wheel type aggregator have been determined. An extremely small radius of location of the circular and end knives of the large rotor is established. To excavate the soil near the axis of rotation for the rotor of the direct-flow bucket wheel type aggregator, a small rotor with a higher angular velocity shall be coaxially installed. The direction of rotation of the small rotor shall be opposite to the direction of rotation of the large rotor in order to partially compensate for the reactive moment produced by the large rotor.

KEYWORDS: construction, roads, continuous units, direct-flow bucket wheel type aggregator, large rotor, circular knives, end knives, geometric and mode parameters.

The article was submitted 18.10.2022; approved after reviewing 25.10.2022; accepted for publication 19.12.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Nikolayev V. A. Structural layout and operating parameters for a large rotor of a direct-flow bucket wheel type aggregator. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (6): 800-813. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-800-813>

© Nikolayev V. A., 2022



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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ:

1) уточнена конструкция присоединения ножа, передний и задний угол окружных и торцевых ножей;

2) установлено предельно малое расстояние от оси вращения ротора до ближайшей точки ножа большого ротора;

3) определена угловая скорость большого ротора и толщина пласта, срезаемого торцевым ножом;

4) построена зависимость предельно малого радиуса, на котором может быть расположено лезвие окружного ножа, от угла отклонения лезвия по отношению к направлению, перпендикулярному резанию.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема ускорения и удешевления строительства автодорог без снижения их качества может быть решена путём создания комплекса агрегатов непрерывного действия [1]. Агрегаты, следуя друг за другом, осуществляют весь комплекс работ, направленных на строительство автодорог. Применение спутниковой навигации открывает широкие перспективы полной автоматизации агрегатов, поэтому общей целью является создание комплекса агрегатов, осуществляющих непрерывное строительство автомобильных дорог, преимущественно в автоматическом режиме.

Одним из устройств, входящих в состав агрегатов непрерывного действия, является прямооточный роторный рыхлитель^{1,2}. Прямоточные роторные рыхлители предназначены для рыхления грунта с последующим его удалением другими техническими средствами. На рисунке 1 показан вариант применения прямооточного роторного рыхлителя в составе агрегата для устройства кюветов³, каналов. Агрегат включает энергетическое устройство рыхлите-

ля 3 с черенковым ножом 1, установленным на передней навеске 2. Прямоточный роторный рыхлитель 11 размещён на раме рыхлителя 8, присоединённой к задней навеске 5. Привод прямооточного роторного рыхлителя может быть как от гидромотора, так и механическим, включающим коробку отбора мощности 4, карданный вал привода рыхлителя 6, передачу 7, предохранительное устройство 9 и подшипниковый узел 10.

Предварительная схема прямооточного роторного рыхлителя с четырьмя рядами ножей, то есть ряды ножей развёрнуты по окружности под углом 90° друг относительно друга, показана на рисунке 2. Цельносварной ротор содержит вал 5 с приваренным к нему опорным диском 4, с держателями 7 и лопастями 6. К лопастям присоединены окружные ножи 1 и торцевые ножи 3, установленные уступом. К валу присоединён спиральный нож 2.

Хотя теоретические основы разработки грунта весьма подробно рассмотрены^{4,5} [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24], взаимодействие с грунтом элементов прямооточного роторного рыхлителя почти не изучены. Применение прямооточных роторных рыхлителей для разработки грунта сдерживается недостаточным теоретическим обоснованием их параметров. Так, некоторые исследователи пытались для разработки грунта использовать прямооточный роторный рыхлитель с ножами, сходными по форме с лопастями самолётного или корабельного винта⁶. Без достаточного теоретического обоснования эти попытки оказались неудачными. Прежде чем провести анализ взаимодействия элементов рабочих органов прямооточного роторного рыхлителя с грунтом, необходимо уточнить конструктивную компоновку ротора прямооточного роторного рыхлителя.

¹ Патент РФ №2735497. Прямоточный роторный рыхлитель / Николаев В.А. Заявл. 09.01.2019 №2019100367 // Опу-бл. 03.11.2020, бюл. № 31. 14 с.

² Патент РФ №2709849. Агрегат непрерывного действия, формирующий кювет и основание автомобильной дороги / В.А. Николаев. Заявл. 17.03.2020 №2020111163 // Опубл. 23.12.2019, бюл. №36. 13 с.

³ Патент РФ №2709849. Агрегат непрерывного действия, формирующий кювет и основание автомобильной дороги. Тамм же.

⁴ Жук А. Ф. Теоретическое обоснование рациональной технологической схемы и параметров ротационного плуга. Сборник научных трудов «Теория и расчёт почвообрабатывающих машин». Т. 120. М.: Машиностроение, 1989. С. 145–153.

⁵ Баловнев [и др.] Машины для земляных работ: конструкции, расчёт, потребительские свойства. Белгород. Изд-во БГТУ, 2012. 401 с.

⁶ Исследование рабочих органов землеройных машин непрерывного действия. Сборник под ред. З.Е. Гарбузова. М.: 1966. 88 с.

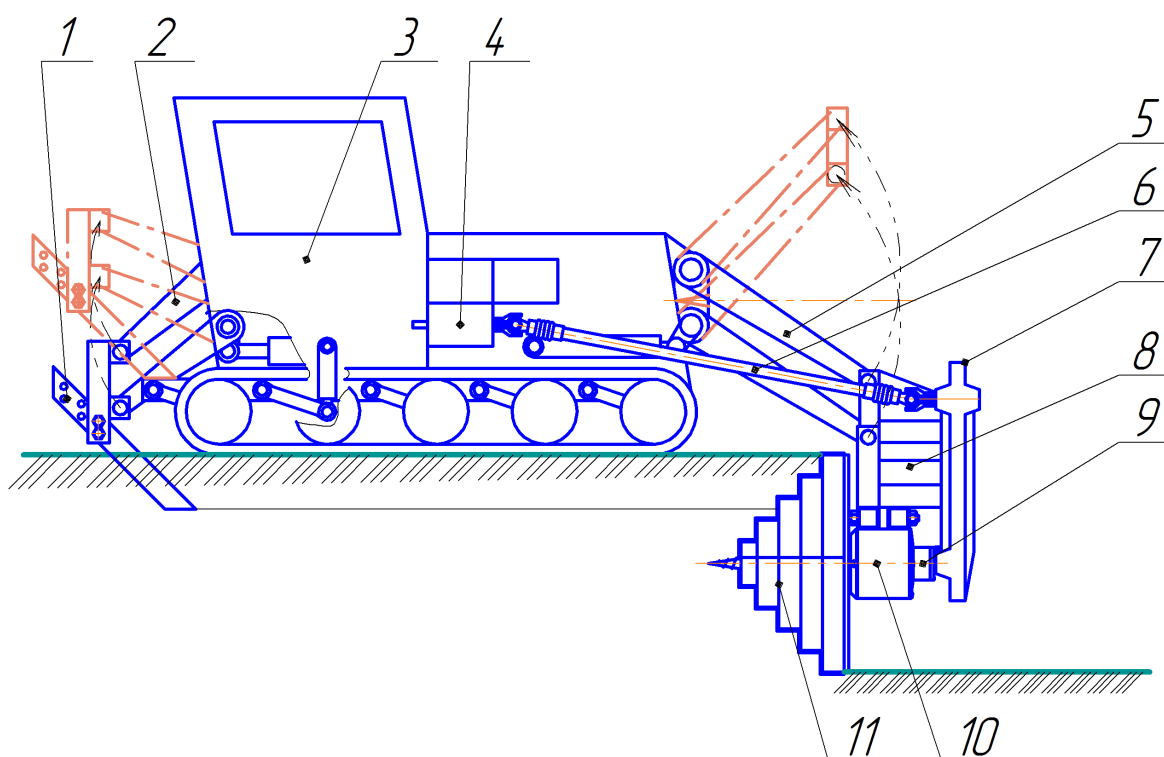


Рисунок 1 – Схема прямооточного роторного рыхлителя в агрегате с энергетическим устройством:
 1 – черенковый нож; 2 – передняя навеска; 3 – энергетическое устройство рыхлителя;
 4 – коробка отбора мощности; 5 – задняя навеска; 6 – карданный вал привода рыхлителя;
 7 – передача; 8 – рама рыхлителя;
 9 – предохранительное устройство; 10 – подшипниковый узел;
 11 – прямооточный роторный рыхлитель
 Источник: составлено автором.

Figure 1 – Diagram of a direct-flow bucket wheel type aggregator in a unit with an energy device:
 1 – cuttings knife; 2 – front hitch; 3 – energy device of the ripper; 4 – power take-off;
 5 – rear hitch; 6 – driveshaft of the ripper drive;
 7 – transmission; 8 – ripper frame; 9 – safety device; 10 – bearing unit;
 11 – direct-flow bucket wheel type aggregator
 Source: compiled by the authors.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Некоторые конструктивные параметры прямооточного роторного рыхлителя получаются из логических рассуждений. В частности, применять в прямооточном роторном рыхлителе длинные дорогостоящие ножи нецелесообразно. В грунте возможны камни и другие предметы, при воздействии на которые дорогостоящие ножи могут погнуться или сломаться. Поэтому в прямооточном роторном рыхлителе целесообразно использовать множество унифицированных ножей небольшой величины ромбовидного поперечного сечения (рисунок 3), которые можно было бы легко заменить при их повреждении.

Для закрепления окружные и торцевые ножи имеют выемку с обратной фаской. Ромбовидное поперечное сечение ножа создаёт возможность двукратного увеличения срока

его службы путём разворота на 180° после затупления режущей кромки.

Угол заточки ножа должен быть меньше угла трения стали о грунт. Он варьируется в широких пределах, но в среднем $\varphi_{с-г} \approx 26^\circ$. Если угол заточки ножа будет больше угла трения стали о грунт, то резание лезвием грунта трансформируется в резание пуансоном. С другой стороны, слишком малый угол заточки приведёт к выкрашиванию лезвия при резании. Исходя из этого, примем угол заточки лезвия $i = 20^\circ$. Тогда размеры элементов ножа в его поперечном сечении получаются из конструктивной компоновки.

Другие параметры прямооточного роторного рыхлителя получены путём построения схем воздействия ножа на грунт в плоскости и пространственного моделирования. Изначально для расчёта принят ротор прямооточного роторного рыхлителя диаметром один метр.

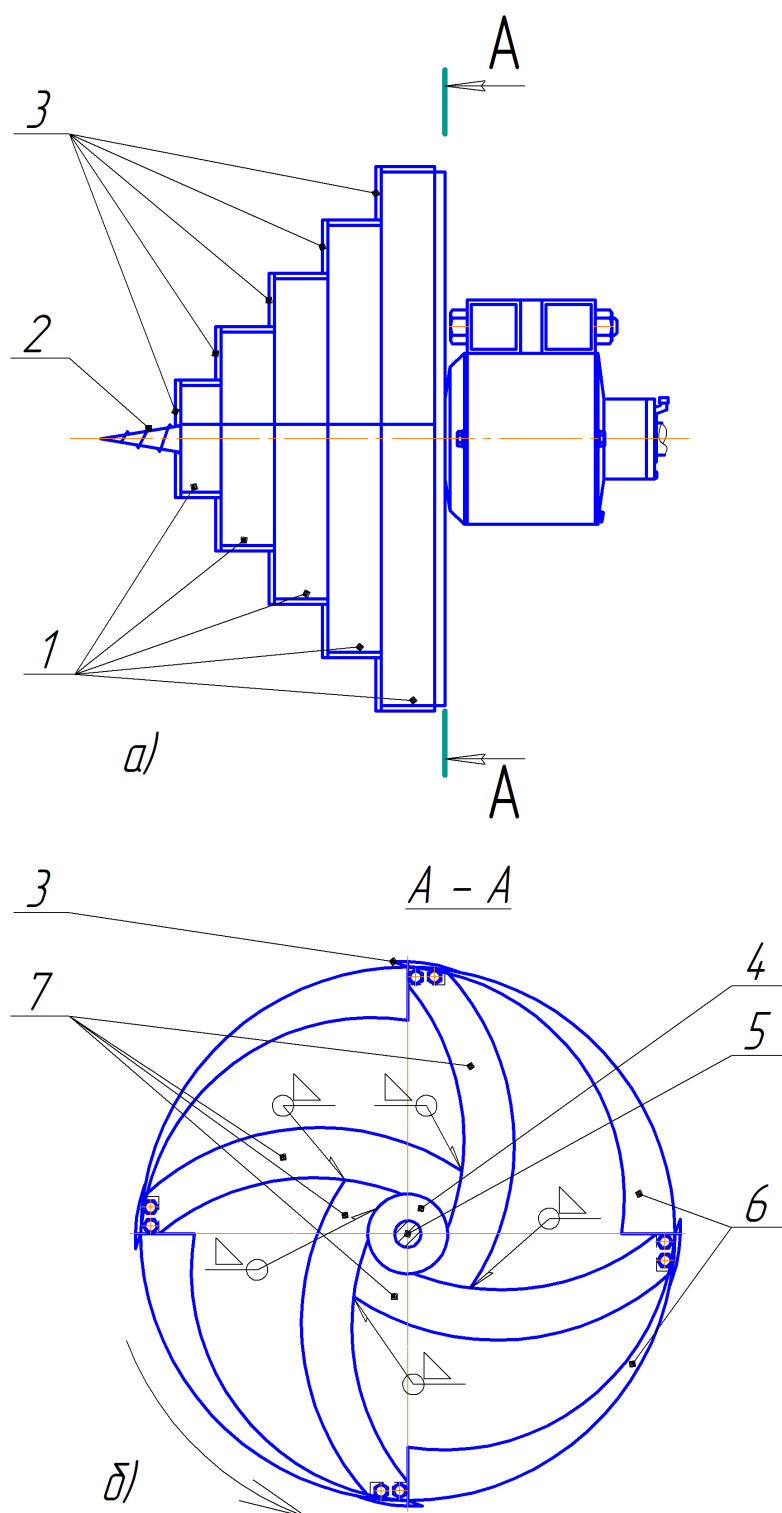


Рисунок 2 – Прямоточный роторный рыхлитель: а – вид сбоку; б – разрез А – А; 1 – окружной нож; 2 – спиральный нож; 3 – торцевой нож; 4 – опорный диск; 5 – вал; 6 – лопасть; 7 – держатель
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Direct-flow bucket wheel type aggregator:
a) side view; b) incision A – A; 1 – circular knife; 2 – spiral knife;
3 – end knife; 4 – support disc; 5 – shaft; 6 – blade; 7 – holder
Source: compiled by the authors.

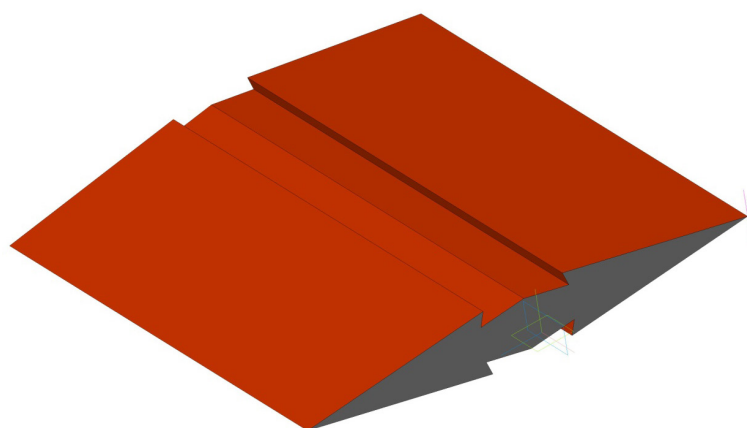


Рисунок 3 – Ромбовидный нож
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Diamond knife
Source: compiled by the authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Присвоим окружным и торцевым ножам номера: №1, №2, №3... по мере приближения от периферии ротора к оси его вращения. Допустим, лезвие окружного ножа параллельно оси

вала ротора. Изобразим сечение окружного ножа №1 поперечно-вертикальной плоскостью (рисунок 4), то есть плоскостью, перпендикулярной оси вращения ротора, когда его лезвие находится в нижнем положении.

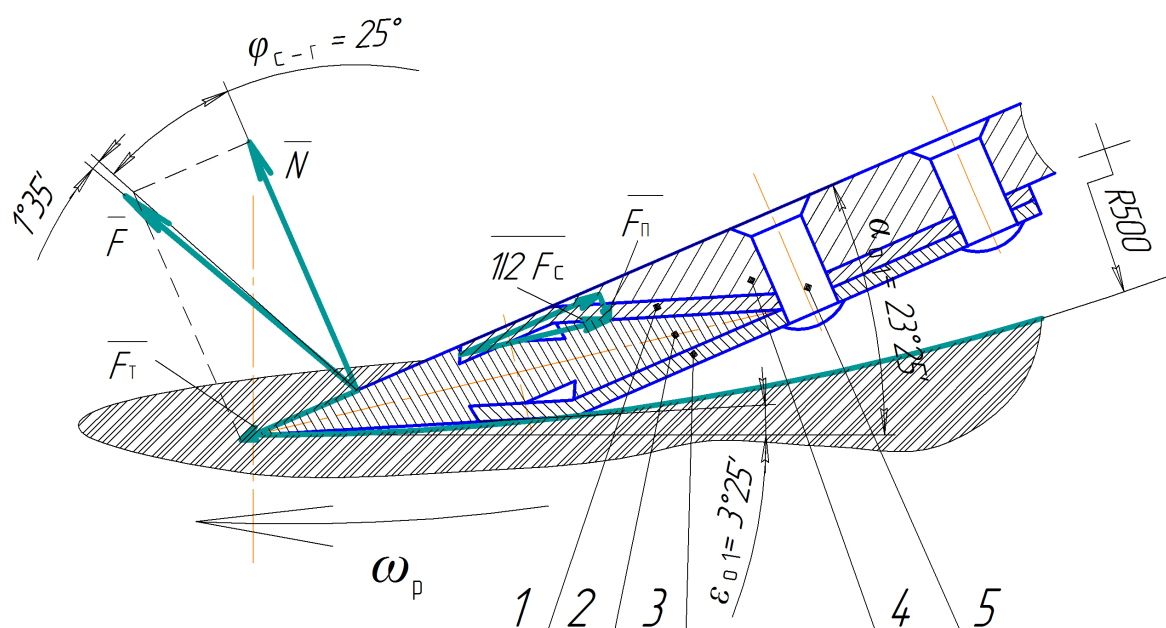


Рисунок 4 – Конструкция присоединения ножа и схемы сил взаимодействия окружного ножа №1, наиболее удалённого от вала, и грунта: 1 – внутренняя щека; 2 – нож; 3 – наружная щека; 4 – лопасть; 5 – заклёпка
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Design of the knife attachment and the scheme of interaction forces of the circumferential knife No. 1, the most distant from the shaft, and the ground: 1 – inner cheek; 2 – knife; 3 – outer cheek; 4 – blade; 5 – Rivet
Source: compiled by the authors.

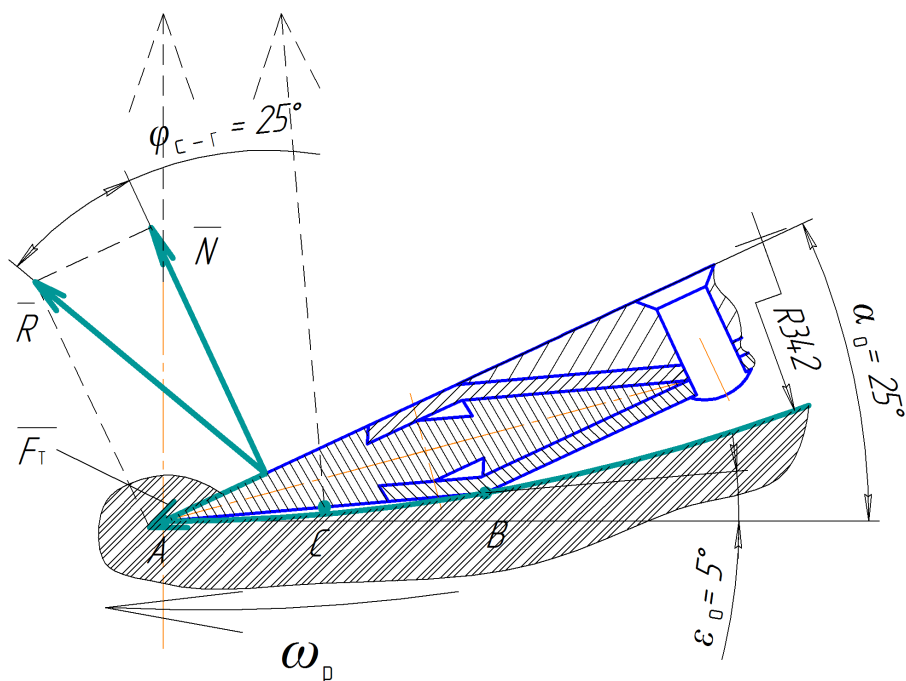


Рисунок 5 – Определение минимального радиуса ротора, когда лезвие ножа параллельно его продольно-радиальной плоскости
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Determination of the minimum radius of the rotor, when the blade of the knife is parallel to its longitudinal-radial plane
Source: compiled by the authors.

К лопасти 4 заклёпками 5 приклепаны внутренняя щека 1 и наружная щека 3, которые выполнены из пружинной стали. Нож 2 вставляют между внутренней щекой и наружной щекой. Из схемы сил воздействия обратной фанси ножа на внутреннюю щеку видно, что при резании появится сила F_n , прижимающая внутреннюю щеку к ножу. Равная ей сила с другой стороны будет прижимать к ножу наружную щеку. При этом чем больше сила сопротивления грунта резанию, тем больше сила F_n . Это обеспечит надёжность присоединения ножа.

Из построения видно, что задний угол окружного ножа №1, наиболее удалённого от вала, $\varepsilon_{01} \approx 3,4^\circ$. Если лезвие ножа параллельно оси вала, передний угол окружного ножа №1 $\alpha_{01} = \varepsilon_{01} + i = 3,4 + 20 \approx 23,4^\circ$. Схема сил воздействия передней поверхности ножа на грунт показывает, что сила воздействия ножа на грунт отклонена от нормали на угол, превышающий угол трения стали о грунт. Поэтому грунт не будет упираться в переднюю поверхность окружного ножа №1, а будет скользить по ней. Произойдёт резание лезвием.

Обозначим лезвие в сечении окружного ножа точкой A (рисунок 5). Допустим, что наружная щека касается грунта в точке B.

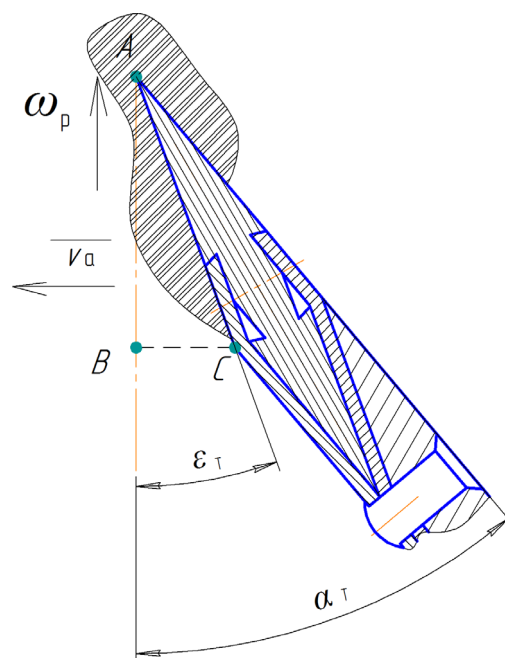


Рисунок 6 – Взаимодействие с грунтом торцевого ножа №1, наиболее удалённого от оси вращения ротора
Источник: составлено автором.

Figure 6 – Interaction with the ground of the end knife No 1, the farthest from the axis of rotation of the rotor
Source: compiled by the authors.

Разделив отрезок AB пополам, проведём из точки C луч до пересечения с вертикальным лучом из точки A лезвия окружного ножа. Из полученного центра проведём дугу, проходящую через точки A и B , измерим её радиус. Если лезвие окружного ножа параллельно оси вала ротора, минимально возможный радиус, на котором окружной нож, наименее удалённый от оси вращения ротора, может осуществлять резание лезвием, 342 мм.

Рассмотрим взаимодействие с грунтом торцевого ножа №1, наиболее удалённого от оси вращения ротора (рисунок 6). Он вращается с угловой скоростью ω_p и перемещается совместно с агрегатом со скоростью v_a . Чтобы осуществлять резание лезвием, передний угол торцевого ножа, так же как и окружного ножа, должен быть $\alpha_r \leq 26^\circ$. Допустим, $\alpha_r = 25^\circ$, тогда задний угол $\varepsilon_r = 5^\circ$. Чтобы задняя поверхность ножа не упиралась в грунт, пока точка B переместится на расстояние BC , точка A должна переместиться по дуге на расстояние AB . При движении торцевого ножа, наиболее удалённого от оси вращения ротора, дуга AB незначительно отличается от отрезка AB , поэтому

$$\tan \varepsilon_{r1 \min} = \frac{BC}{AB} = \frac{v_a}{v_{r1 \max}},$$

где $v_{r1 \max}$ – окружная скорость точки на торцевом ноже, наиболее удалённой от оси вращения ротора, равная минимальной окруж-

ной скорости лезвия окружного ножа №1:

$$v_{r1 \max} = v_{окр1} = v_{окр \min}.$$
 Отсюда

$$v_{окр1} = \frac{v_a}{\tan \varepsilon_{r1 \min}}. \quad (1)$$

Так как рабочая скорость агрегата $v_a = 0,085$ м/с [25], $v_{окр1} = 0,97$ м/с. Чтобы не было трения задней поверхности торцевого ножа №1 о грунт при его резании, примем минимальную окружную скорость торцевого ножа №1, равную максимальной окружной скорости наружной точки лезвия окружного ножа: $v_{окр1 \min} = v_{r1 \max} = 1$ м/с.

Располагать лезвия окружных ножей параллельно оси вала ротора нерационально. Для уменьшения затрат энергии желательно, чтобы выполнялось резание со скольжением. Когда лезвие ножа осуществляет резание со скольжением, то происходит трансформация угла заострения ножа в сторону его уменьшения. Для унификации ножей желательно, чтобы угол отклонения лезвия в плоскости резания торцевых и окружных ножей был одинаковым. Между тем, чтобы осуществлять резание лезвием, передний угол должен быть $\alpha_{r,o} \leq 25^\circ$. Путём пространственного моделирования определим угол заострения лезвия ножа в зависимости от угла отклонения лезвия в плоскости резания β . Зависимость угла заострения лезвия от угла отклонения лезвия от направления, перпендикулярного резанию, если угол заточки лезвия 20° , показана на рисунке 7.

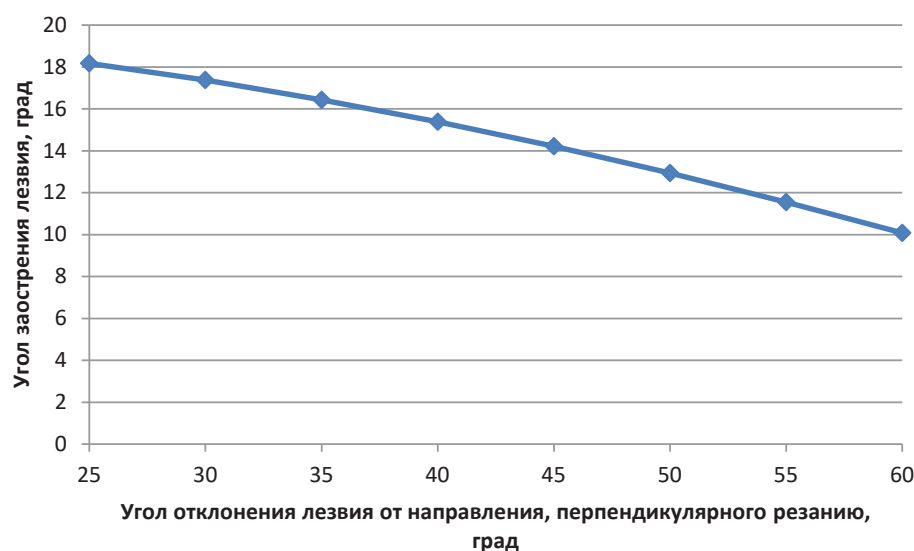


Рисунок 7 – Зависимость угла заострения лезвия от угла отклонения лезвия от направления, перпендикулярного резанию; угол заточки лезвия 20°
Источник: составлено автором.

Figure 7 – Dependence of the angle of sharpening of the blade on the angle of deviation of the blade from the direction perpendicular to cutting; blade sharpening angle 20°
Source: compiled by the authors.

Чем больше угол β отклонения лезвия в плоскости резания по отношению к направлению резания, тем больше трансформация угла заострения лезвия, тем меньше угол заострения лезвия ножа. При увеличении угла β уменьшается предельно малый радиус, на котором может быть расположено лезвие окружного ножа при условии $\alpha_{\tau,0} \leq 25^\circ$. Одновременно с увеличением угла β увеличивается длина лезвия ножа.

Чтобы грунт проходил в пространстве между торцевыми ножами, расстояние между их лезвиями должно превышать толщину срезаемого слоя грунта. Исходя из размеров ромбовидного ножа (см. рисунок 3), примем длины проекций лезвий торцевых ножей на продольно-радиальную плоскость 100 мм. Для унификации проекции лезвий окружных ножей на продольно-радиальную плоскость также примем 100 мм.

Чтобы избежать воздействия грунта на поверхность, торцевой нож должен быть распо-

ложен так, чтобы его лезвие было не в продольно-радиальной плоскости, а под углом как к продольно-радиальной плоскости, так и к направлению движения агрегата. Аналогично формуле (1) для точки лезвия торцевого ножа №1, приближенной к оси вращения ротора,

$$\begin{aligned} \tan \varepsilon_{\tau 1 \max} &\geq \frac{v_a}{v_{\tau 1 \min}}; \\ \tan \varepsilon_{\tau 1 \max} &\geq \frac{0,085}{0,8} = 0,106; \\ \varepsilon_{\tau 1 \max} &\geq \arctg 0,106 = 6,06^\circ. \end{aligned} \quad (2)$$

Выполнив построения, аналогичные изображенным на рисунке 5, выявим предельно малые радиусы, на которых может быть расположено лезвие окружного ножа в роторе, когда оно не параллельно продольно-радиальной плоскости ротора (рисунки 8, 9). Зависимость длины лезвия от угла отклонения лезвия по отношению к направлению, перпендикулярно-му резанию, показана на рисунке 10.

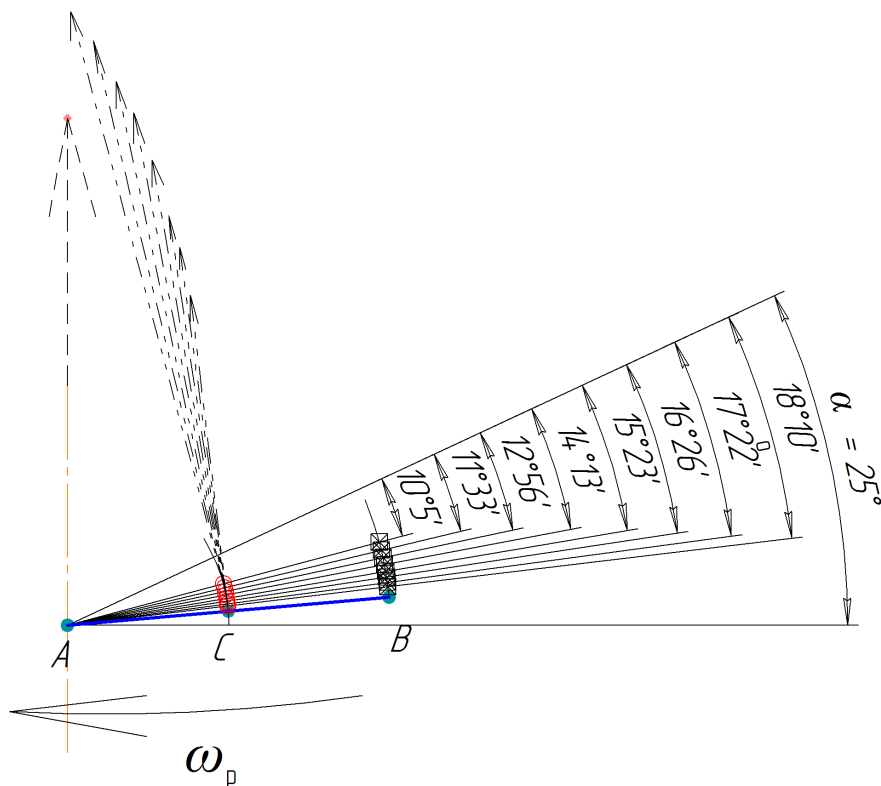


Рисунок 8 – К определению предельно малого радиуса, на котором может быть расположено лезвие окружного ножа, от угла отклонения лезвия по отношению к направлению, перпендикулярному резанию
Источник: составлено автором.

Figure 8 – To determine the extremely small radius on which the blade of the circumferential knife can be located, from the angle of deflection of the blade in relation to the direction perpendicular to the cutting
Source: compiled by the authors.

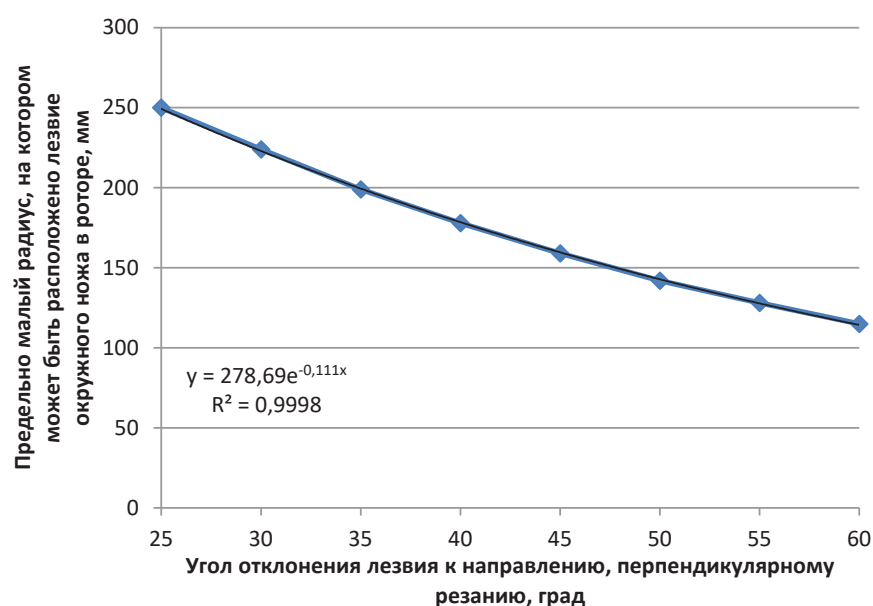


Рисунок 9 – Зависимость предельно малого радиуса, на котором может быть расположено лезвие окружного ножа, от угла отклонения лезвия по отношению к направлению, перпендикулярному резанию
Источник: составлено автором.

Figure 9 – Dependence of the extremely small radius on which the blade of the circumferential knife can be located on the angle of deflection of the blade in relation to the direction perpendicular to the cutting
Source: compiled by the authors.

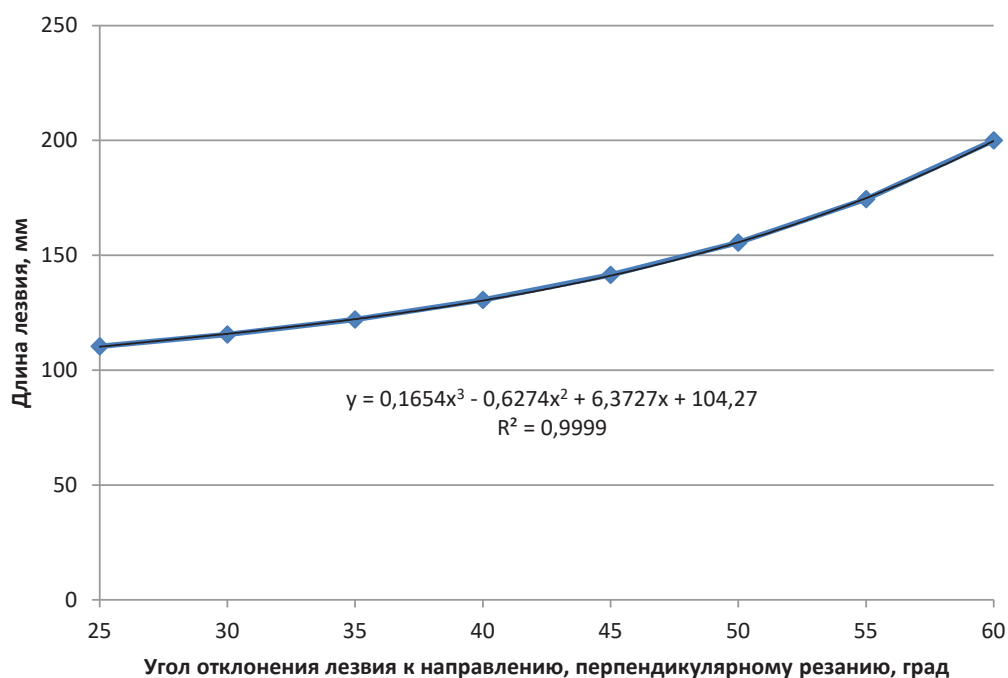


Рисунок 10 – Зависимость длины лезвия от угла отклонения лезвия по отношению к направлению, перпендикулярному резанию
Источник: составлено автором.

Figure 10 – Dependence of the blade length on the angle of deflection of the blade in relation to the direction perpendicular to the cutting
Source: compiled by the authors.

Чем больше угол в плоскости резания по отношению к направлению резания, тем меньше угол заострения лезвия (см. рисунок 7). Поэтому желательно увеличение этого угла. Однако если окружные ножи установить так, что лезвия будут под большим углом в плоскости резания по отношению к направлению резания, их будет необходимо изогнуть. Радиус изгиба окружных ножей зависит от их расположения в роторе, то есть расстояния от оси вращения ротора. Лезвия торцевых ножей должны быть вогнутые также в зависимости от их расположения в роторе. Изгибать окружные ножи и торцевые ножи не технологично. Будет отсутствовать унификация ножей. Поэтому

примем компромиссное конструктивное решение: угол отклонения лезвия в плоскости резания по отношению к направлению резания 30° (рисунок 11), минимально превышающий угол трения грунта о сталь. Предельно малый радиус, на котором может быть расположено лезвие окружного ножа в роторе, в котором угол отклонения лезвия в плоскости резания $\beta = 30^\circ$, 224 мм (см. рисунок 9). Следовательно, окружные ножи, более близкие к оси вращения ротора, не будут осуществлять резания лезвием. По мере приближения к оси вращения ротора резание будет всё более трансформироваться в резание пуансоном, поскольку передний угол $\alpha_0 > 26^\circ$.

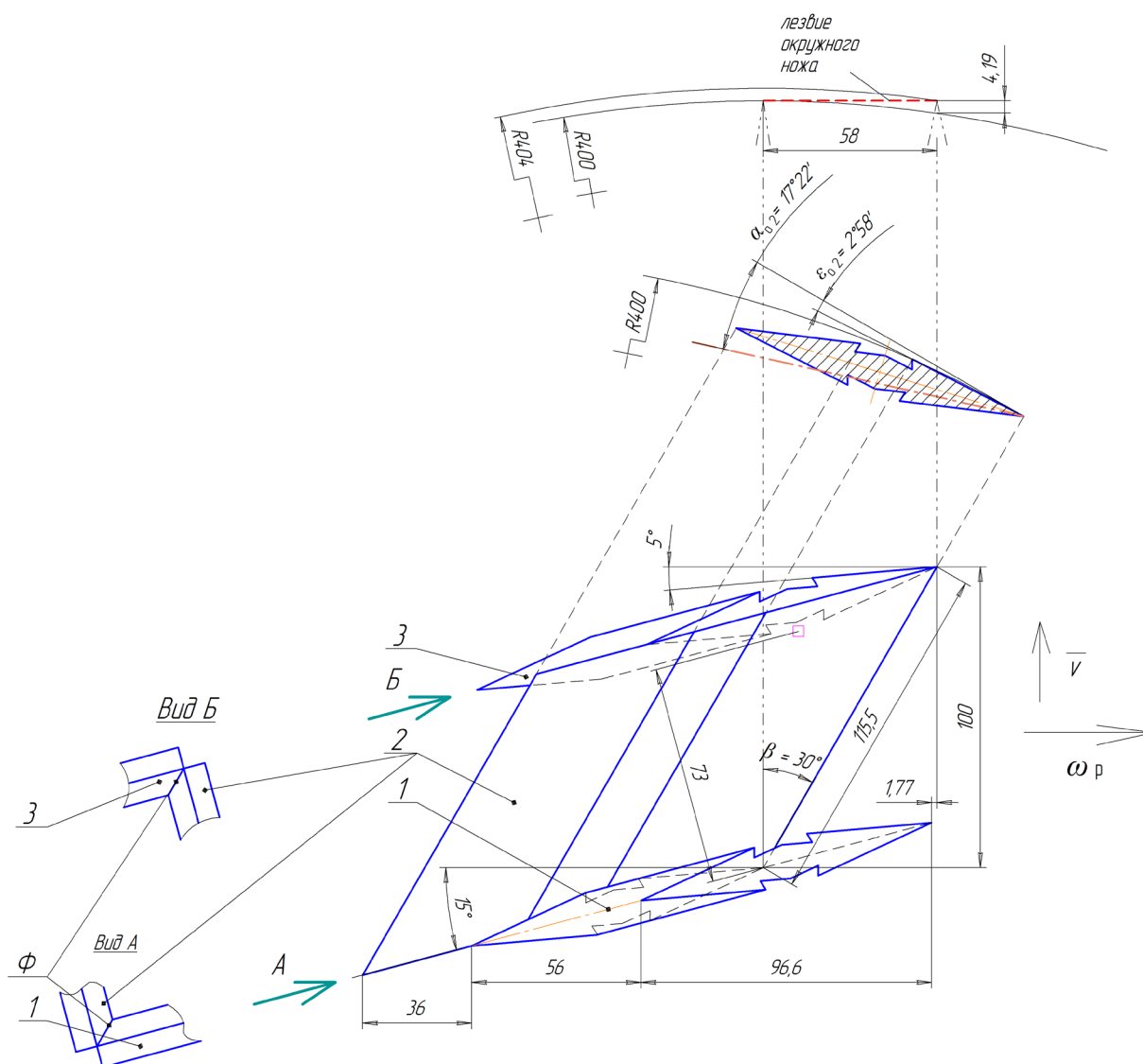


Рисунок 11 – Ножи: 1 – торцевой нож №1; 2 – окружной нож №2; 3 – торцевой нож №2
Источник: составлено автором.

Figure 11 – Knives: 1 – end knife No1; 2 – circular knife No. 2; 3 – end knife No2
Source: compiled by the authors.

Изобразим торцевой нож №1, окружной нож №2 и торцевой нож №2 (см. рисунок 11, внизу) так, будто смотрим на окружной нож №2 сверху.

Направим окружной нож №2 так, чтобы его лезвие было состыковано с лезвием торцевого ножа №1 и направлено под углом 30° к продольно-радиальной плоскости. Продолжив линию лезвия окружного ножа №2 (на рисунке вправо-вверх), изобразим его поперечное сечение, вписанное в дугу радиусом 400 мм. Это радиус точки лезвия торцевого ножа №1, наиболее близкой к оси вращения ротора. Отметим передний угол $\alpha_{0.2}$ с учётом трансформации угла заострения лезвия. Изобразим торцевой нож №1 и торцевой нож №2, примыкающие к окружному ножу №2 (вид А и вид Б) фасками. Торцевой нож №1 примыкает к окружному ножу №2 с одной стороны (на рисунке сверху), а торцевой нож №2 – с другой стороны (на рисунке снизу). Из построения расстояние между торцевым ножом №1 и торцевым ножом №2 73 мм.

Угол 30° наклона лезвия окружных ножей к продольно-радиальной плоскости не учитывает трансформации угла заострения лезвий окружных ножей, связанной с поступательным перемещением агрегата. Так как агрегат перемещается, направление резания окружных ножей не будет расположено в поперечно-радиальной плоскости. Поэтому происходит дополнительная трансформация угла заострения лезвий окружных ножей. Чтобы задние углы торцевых ножей не были меньше $\varepsilon_{\tau}=5^\circ$ (см. рисунок 6), к углу наклона лезвия окружных ножей $\beta=30^\circ$ можно добавить ещё 5° для учёта трансформации углов заострения лезвий окружных ножей, связанной с поступательным перемещением агрегата. Тогда предельно малый радиус уменьшится от 224 мм до 199 мм (см. рисунок 9): $r_{\min n}=199 \text{ мм} \approx 0,2 \text{ м}$. Расположение окружного ножа №4 соответствует этому требованию. Следовательно, в одном ряде большого ротора будут расположены 4 окружных ножа и три торцевых ножа.

Если расстояние от оси вращения ротора до точки ножа будет меньше 199 мм, не будет соблюдено минимальное соотношение окружной скорости точки ножа и поступательной скорости агрегата. Поэтому для выемки грунта вблизи оси вращения ротора прямооточного роторного рыхлителя должен быть соосно установлен малый ротор с большей угловой скоростью.

Угловая скорость большого ротора

$$\omega_p = \frac{v_{\text{окр min}}}{r_i}. \quad (3)$$

Так как $v_{\text{окр min}} = v_{\tau 1 \max} = 1 \text{ м/с}$, $r_{\min n} \approx 0,2 \text{ м}$, необходимая угловая скорость большого ротора $\omega_p = 5 \text{ рад/с}$.

Предварительно приняли расположение ножей в роторе в четыре ряда. Но при такой угловой скорости ротора уменьшится толщина слоя грунта, срезаемого ножами. Чрезмерное разрыхление грунта нежелательно в связи с увеличением энергии на этот процесс. Установка ножей в два ряда нерациональна, так как приведёт к увеличению напряжений в приводе вала ротора при изменении локальных сопротивлений грунта. Поэтому примем расположение ножей в три ряда, то есть ряды ножей по окружности развёрнуты под углом 120° друг относительно друга. Количество окружных ножей 12, торцевых ножей – 9. В большом роторе расположен 21 унифицированный нож.

Время одного оборота ротора

$$\tau_1 = \frac{2\pi}{\omega_p}; \quad \tau_1 = 1,256 \text{ с.}$$

Время 1/3 поворота ротора $\tau_{1/3} = 1,256/3 \approx 0,419 \text{ с}$. Подача на торцевой нож

$$s_{нб} = v_a \tau_{1/3}, \quad (4)$$

где $\tau_{1/3}$ – время 1/3 поворота ротора. Так как скорость агрегата $v_a = 0,85 \text{ м/с}$ [30], подача на торцевой нож, то есть толщина пласта, срезаемого торцевым ножом, $s_{нб} \approx 0,035 \text{ м}$. Даже с учётом разрыхления грунт будет проходить свободно в пространстве между унифицированными ножами (см. рисунок 11).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Путём логических рассуждений, расчётов, построений в плоскости и пространстве определены геометрические и режимные параметры большого ротора прямооточного роторного рыхлителя диаметром 1 м. Установлен предельно малый радиус расположения окружных и торцевых ножей большого ротора. Для выемки грунта вблизи оси вращения ротора прямооточного роторного рыхлителя должен быть соосно установлен малый ротор с большей угловой скоростью. Направление вращения малого ротора должно быть противоположным по отношению к направлению вращения большого ротора для частичной компенсации реактивного момента, создаваемого большим ротором.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Николаев В. А. Определение затрат энергии, необходимой для воздействия поверхности ножа и нижней части отвала бульдозера на грунт в начале прохода // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 4 (86). С. 484–499. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-484-499>
2. Зыков Б. И. Теория рабочих процессов строительных машин. Ярославль: Изд. ЯГТУ, 2003. 114 с.
3. Попов Г. Ф. Рабочие органы фрез. М.: Материалы НТС ВИСХОМ. Вып. 27. ОНТИ ВИСХОМ, 1970. С. 490–497.
4. Карасёв Г. Н. Определение силы резания грунта с учётом упругих деформаций при разрушении // Строительные и дорожные машины. 2008. № 4. С. 36–42.
5. Карнаухов А. И., Орловский С. Н. Определение затрат удельной энергии на процесс резания лесных почв торцевыми фрезами // Строительные и дорожные машины. 2010. № 1. С. 20–22.
6. Кравец И. М. Определение критической глубины резания при комбинированном резании грунтов гидрофрезой // Строительные и дорожные машины. 2010. № 5. С. 47–49.
7. Кириллов Ф. Ф. Детерминированная математическая модель временного распределения тягового усилия для многорезцовых рабочих органов землеройных машин // Строительные и дорожные машины. 2010. № 11. С. 44–48.
8. Берестов Е. И. Влияние трения грунта по поверхности ножа на сопротивление резанию // Строительные и дорожные машины. 2010. № 11. С. 34–38.
9. Баловнев В. И., Нгуен З. Ш. Определение сопротивлений при разработке грунтов рыхлителем по интегральному показателю прочности // Строительные и дорожные машины. 2005. № 3. С. 38–40.
10. Ryabets N., Kurzhner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy // Cold Regions Science and Technology. 2003. Vol. 36. P. 115–128.
11. Liu X., Liu P. Experimental research on the compressive fracture toughness of wing fracture of frozen soil // Cold Regions Science and Technology. 2011. Vol. 65. P. 421–428.
12. Talalay P.G. Subglacial till and Bedrock drilling. // Cold Regions Science and Technology. 2013. Vol. 86. P. 142–166.
13. Li Q. Development of Frozen Soil Model // Advances in Earth Science. 2006. №12. P. 96–103.
14. Atkinson J. The Mechanics of Soils and Foundations. CRC. Press. 2007. 448 p.
15. Баловнев В. И., Данилов Р. Г., Улитич О. Ю. Исследование управляемых ножевых систем землеройно-транспортных машин // Строительные и дорожные машины. 2017. № 2. С. 12–15.
16. Нилов В. А., Фёдоров Е. В. Разработка грунта скрепером в условиях свободного резания // Строительные и дорожные машины. 2016. № 2. С. 7–10.
17. Чмиль В. П. Насосно-аккумулятивный привод рыхлителя с автоматическим выбором угла резания // Строительные и дорожные машины. 2016. № 11. С. 18–20.
18. Кабашев Р. А., Тургумбаев С. Д. Экспериментальные исследования процесса копания грунтов роторно-дисковыми рабочими органами под гидростатическим давлением // Вестник СибАДИ. 2016. № 4. С. 23–28.
19. Сёмкин Д. С. О влиянии скорости рабочего органа на силу сопротивления резанию грунта // Вестник СибАДИ. 2017. № 1. С. 37–43.
20. Константинов Ю. В. Методика расчёта сопротивления и момента сопротивления резанию почвы прямым пластинчатым ножом фрезы // Тракторы и сельхозмашины. 2019. № 5. С. 31–39.
21. Сыромятников Ю. Н., Храмов И. С., Войнаш С. А. Гибкий элемент в составе рабочих органов роторной почвообрабатывающей рыхлительно-сепарирующей машины // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 5. С. 32–39.
22. Пархоменко Г. Г., Пархоменко С. Г. Силовой анализ механизмов перемещения рабочих органов почвообрабатывающих машин по заданной траектории // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 1. С. 47–54.
23. 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.
24. Николаев В. А. Машины для обработки почвы. Теория и расчёт / В. А. Николаев. Ярославль: Изд-во ФГБОУ ВПО ЯГСХА, 2014. 358 с.
25. Николаев В. А. Расчёт скорости прямооточного роторного рыхлителя // Дороги и мосты. Сборник, выпуск 41/1. Москва. 2019 г. С. 35–39.

REFERENCES

1. Nikolayev V. A. Determination of the energy required to expose the surface of the knife and the bottom of the bulldozer blade to the ground at the beginning of the pass. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (4): 484–499. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-484-499>
2. Zykov B. I. Teoriya rabochih processov stroitel'nyh mashin [Workflow theory of construction machinery]. Ja-roslavl': Izd. JaGTU, 2003. 114 p. (in Russ.)
3. Popov G. F. Rabochie organy frez [Working bodies of the cutters]. Moscow: Materialy NTS VISHOM. Vyp. 27. ONTI VISHOM, 1970: 490–497. (in Russ)
4. Karasjov G. N. Opredelenie sily rezanija grunta s uchjotom uprugih deformacij pri razrushenii [Definition of the cutting force of soil considering elastic deformation at fracture]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2008; 4: 36–42. (in Russ)
5. Karnauhov A. I., Orlovskij S. N. Opredelenie zatat udel'noj jenergii na process rezanija lesnyh pochv torcevyimi frezami [Costing of specific energy on the cutting process of forest soils end mills]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 1: 20–22. (in Russ)
6. Kravec I. M. Opredelenie kriticheskoj glubiny rezanija pri kombinirovannom rezanii gruntov gidrofrezoj [Determine critical cutting depth when combined cutting soils gidrofrezoj]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 5: 47–49. (in Russ)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

18. Kabashev R. A., Turgumbaev S. D. Jeksperimental'nye issledovanija processa kopanija gruntov rotno-diskovymi rabochimi organami pod gidrostaticheskim davleniem [Experimental studies of the process

of digging soils by rotary-disk working organs under hydrostatic pressure]. *Vestnik SibADI*. 2016; 4: 23-28. (in Russ.)

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

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

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

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

23. Dranjaev S. B., Chatkin M. N., Korjavin S. M. Modelirovanie raboty vintovogo G-obraznogo nozha pochvoobrabatyvajushhej frezy [Simulation of the work of a screw G-shaped knife soil cutter]. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2017; 7: 13-19. (in Russ.)

24. Nikolaev V. A. *Mashiny dlja obrabotki pochvy. Teorija i raschjot* [Soil processing machines. Theory and calculation]. Jaroslavl': Izd-vo FGBOU VPO JaG-SHA, 2014: 358. (in Russ.)

25. Nikolaev V. A. *Rezanie grunta passivnymi rabochimi organami. Teorija i raschjot* [Cutting the soil by passive working organs. Theory and Calculation]. Jaroslavl': Izd-vo FGBOU VO JaGTU, 2022: 388. (in Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Николаев Владимир Анатольевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные и дорожные машины».

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir A. Nikolayev. Dr. of Sci., Professor of the Construction and Road Machinery Department.

УДК 621.869

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-814-827>

EDN: PVZIOO

Научная статья



РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗЕМЛЕРОЙНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН ОТВАЛЬНОГО ТИПА

Н. Т. Сурашов^{1*}, Д. Н. Толымбек²¹Казахский университет путей сообщения,
г. Алматы, Республика Казахстан,²СП «Аруна-Сай»,

г. Астана, Республика Казахстан

nurgalisurashov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1798-2253>damirinvest@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1612-2171>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. В современных рыночных условиях землеройно-транспортные машины отвального типа особенно нуждаются в анализе маркетинга. Поэтому некоторые приобретенные землеройно-транспортные машины из зарубежных стран при разработке грунтов с каменистыми включениями (характерно для РК) быстро изнашиваются, особенно их режущие кромки ножа, затем постепенно выходят из строя сами машины, тем самым не оправдывая свою себестоимость, т.е. эксплуатируются на практике неэффективно. Целью данной работы является из множества типов машин выбрать самые эффективные модели землеройно-транспортных машин отвального типа, адаптированных к условиям грунтового фона и климатических зон РК с помощью разработанных комплексных оценочных показателей.

Методы и материалы. В качестве материалов использовались широко известные 6-удельные, обобщенные параметры и дополнительно разработанные авторами 20-оценочные показатели (удельные, обобщенные, дифференциальные и интегральные) для оценки конкурентоспособности проектируемой новой конструкции рабочего органа землеройно-транспортной машины отвального типа, а также эксплуатируемых этих машин в РК.

Результаты. В результате анализа взаимодействия рабочего органа бульдозера с разрабатываемым грунтом и исследования их параметров были сформированы оценочные показатели для оценки эффективности бульдозера. Провели полевые испытания два базовых и предложенных четыре перспективных конструктивных решений бульдозера с различными отвалами для сравнения конструкций между собой и оценили их в количественном виде. По высчитанным оценочным показателям произведена оценка эффективности бульдозерного отвала для шести вариантов исполнений конструкций, и по их численным значениям построены графики изменения оценочных показателей по экспериментальным данным, позволяющим оценить технико-экономическую эффективность для различных конструкций отвалов бульдозера.

Обсуждение и заключение. Анализ оценочных показателей: материалоемкости G_{po}/G_{np} и G_{po}/Π показывают, что с совершенствованием конструкции отвала (срез двух боковых верхних частей отвала и добавление к отвалу двух нижних боковых ножей-уширителей) уменьшается металлоемкость, а объем максимального набора призм волочения увеличивается, соответственно возрастает производительность бульдозера; энергоемкости, N/Π , N/G_{np} и показывают, что с совершенствованием конструкции отвала бульдозера улучшаются энергетические показатели, т.е. расход энергии, затраченной на разработку единичного объема грунта уменьшается; показатели удельного усилия, приходящегося на единицу ширины ножа R/B и удельной мощности, приходящейся на единицу ширины ножа N/B , уменьшаются. Обобщенный показатель экономии мощности и силовых нагрузок $R \cdot N/B^2$ показывает, что с улучшением конструкции отвала их значения почти не изменяются (отвал конструкции типа и отвалы с оснащением – выступающим средним ножом и боковыми косынками – резко (скачкообразно) увеличивают объем призм волочения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бульдозер, рабочий орган, оценочные показатели, удельные, дифференциальное, интегральное, уровень технического состояния.

© Сурашов Н. Т., Толымбек Д. Н., 2022

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают искреннюю благодарность и признательность анонимным рецензентам за нелегкий тяжелый труд по глубокому анализу работы и ценные замечания, которые взяты в работу и учтены полностью.

Статья поступила в редакцию 16.09.2022; одобрена после рецензирования 08.11.2022; принята к публикации 19.12.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Сурашов Н. Т., Толымбек Д. Н. Разработка комплексных показателей и оценка эффективности землеройно-транспортных машин отвального типа // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 6 (88). С. 814-827. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-814-827>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-814-827>

EDN: PVZIYO

DEVELOPMENT OF COMPLEX INDICATORS AND EVALUATION OF EFFICIENCY FOR DUMP-TYPE EARTHMOVING AND TRANSPORT MACHINES

Nurgali T. Surashov ^{1*}, Damir N. Tolymbek ²

¹Kazakh University of Railway Engineering,
Almaty, Republic Kazakhstan,

²SP Aruna-Sai,
Astana, the Republic of Kazakhstan

nurgalisurashov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1798-2253>

damirinvest@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1612-2171>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. In modern market conditions, dump-type earth-moving transport machines especially need to analyse the marketing of these machines. Therefore, some acquired earth-moving machines during the development of soils with stony inclusions (typical for the RK) quickly wear out their cutting edges of the knife, then gradually fail the machines themselves, thereby not justifying their cost, i.e. are not operated effectively in practice. The goal is to choose from a variety of types of machines the most effective models of earth-moving and transport machines of the dump type, adapted to the conditions of the ground background of the Republic of Kazakhstan with the help of developed complex evaluative indicators.

Methods and materials. As materials, the well-known 6 specific, generalized parameters and additionally developed by the authors of 20 assessment indicators (specific, generalized, differential and integral) were used to evaluate the competitiveness of the projected new design of the working body of the earth-moving transport machine of the dump type, as well as the operated these machines.

Outcomes. As a result of the analysis of the interaction of the working body of the bulldozer with the developed soil and the study of their parameters, the estimates were developed and formed to assess the effectiveness of the bulldozer. The field tests of the proposed six promising design solutions for a bulldozer with different blades were carried out to compare the structures with each other and evaluated them in quantitative form. According to the calculated estimates, the efficiency of the bulldozer blade was evaluated for six variants of structural executions and graphs of changes in the estimated indicators from experimental data were built on their numerical values, allowing to evaluate the technical and economic efficiency for various designs of bulldozer blades.

Discussion and conclusion. The analysis of the estimated indicators: material consumption G/G_{np} and G/P show, that with the improvement of the blade design (cutting off the two lateral upper parts of the blade and adding the two lower side - extension knives), the metal intensity decreases, and the volume of the maximum set of drawing prisms increases, respectively, the productivity of the bulldozer increases; energy intensities, N/Π , N/G_{np} and $G \cdot N/P^2$ show, that with the improvement of the design of the bulldozer blade, energy performance improves, i.e. the energy consumption spent on the development of a single volume of soil decreases; the specific force per unit width of the R/B knife and the specific power per unit width of the N/B knife are reduced. Generalized power savings and power

© Surashov N. T., Tolymbek D. N., 2022



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

loads $R \cdot N/B^2$ shows that, with the improvement of the blade design, their values almost do not change (the blade of the type design and the blades with equipment - a protruding middle knife and side scarves sharply (jumpingly) increase the volume of the prism drawing.

KEYWORDS: bulldozer, working body, evaluation indicators, specific, differential, integral, level of technical condition.

ACKNOWLEDGEMENTS: the authors express their sincere gratitude and appreciation to anonymous reviewers for the hard work of in-depth analysis of the work and valuable comments that are taken into account and taken into account in full.

The article was submitted 16.09.2022; approved after reviewing 08.11.2022; accepted for publication 19.12.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Surashov N. T., Tolymbek D. N. Development of complex indicators and evaluation of effectiveness for dump-type earth-moving and transport machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (6): 814-827. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-814-827>

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1) разработаны комплексные оценочные показатели (удельные, обобщенные, дифференциальные и интегральные) для технико-экономического уровня машин, т.е. перспективности ЗТМ отвального типа;

2) изготовлены новые конструкции отвалов и ножей бульдозера, которые были установлены на бульдозер марки ДТ-75М для проведения полевых испытаний;

3) проведены полевые испытания на шести моделях отвалов бульдозера и определены их оценочные показатели;

4) анализированы на каждую модель отвала численные значения оценочных показателей и построены по ним сравнительные графики и определены перспективные модели отвала.

ВВЕДЕНИЕ

Казахстан на сегодняшний день приобретает землеройно-транспортные машины (ЗТМ)

из зарубежных стран и СНГ для выполнения поставленной задачи перед дорожными строителями РК Президентом Казахстана – «Создать единую автодорожную компанию Казахстана»¹.

На сегодняшний день отсутствуют комплексные методики определения оценки технико-экономических показателей и, соответственно, технического уровня перспективности ЗТМ с учетом климатических условий и грунтового фона РК, что привело к разработке методики оценки эффективности использования ЗТМ в РК² [1].

По данной тематике написан ряд научных работ зарубежными учеными и стран СНГ^{3,4,5,6,7}. В работе профессоров Л. А. Хмары и В. А. Перова [2, 3, 4, 7] приведен ряд удельных и обобщенных параметров и коэффициентов оценочных критериев для определения новых технических решений (конструкций отвала и ножей) для ЗТМ. Однако эти оценочные показатели недостаточно комплексно оценивают технико-экономический уровень ЗТМ.

¹ Поручение президента РК Касым-Жомарта Токаева на расширенном заседании правительства «Создать единую автодорожную компанию Казахстана» // Деловой Казахстан, от 17.07.22. <https://dknews.kz/ru/politika/245092-prezident-poruchil-pravitelstvu-sozdat-edinuyu>.

² Кабашев Р. А. Дорожные и строительные машины: абразивный износ рабочих органов землеройных машин. Алматы: Фалым, 1997. 434 с.

³ Баловнев В. И., Хмара Л. А. Интенсификация земляных работ в дорожном строительстве. М.: Транспорт, 1983. 183 с.

⁴ Холодов А. М., Ничке В. В. Землеройно-транспортные машины. Харьков: Вища школа, 1982. 192 с.

⁵ Захарчук Б. З., Телушкин В. Д., Шлойдо Г. А., Яркин А. А. Бульдозеры и рыхлители. М.: Машиностроение, 1987. 240 с.

⁶ Завьялов А. М. Основы теории взаимодействия рабочих органов дорожно-строительных машин со средой. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Омск: СибАДИ, 1999. 240 с.

⁷ Dotsenko A. I., Mandrovskiy K. P. Indicators of the efficiency for using of road-building machines at various levels of management decisions // International Scientific Conference Interstroyemeh - 2019 (ISM - 2019) / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 786 (2020) 012005 doi:10.1088/1757-899X/786/1/012005 IOP Publishing.

В работе Х. Х. Хабибуллозода, Н. К. Горяева [5] проводилось исследование зависимости расхода топлива от массы перевозимого груза при междугородных перевозках, и в результате установлены оптимальные расходы топлива в зависимости от скорости транспортирования, нагрузки, приходящейся на одну ось, от качества и рельефа дороги. Для установления ими зависимости расхода топлива от грузоподъемного транспорта исследование проводилось по статистическим данным на седельных тягачах Мерседес Бенс Actross-1840, оборудованными приборами контроля расхода топлива за 237 рейсов. Все данные о скорости, рельеф трассы, расход топлива, нагрузки по осям и другие показатели передавались на сервер FleetBoard. На основе анализа этих данных с помощью программы Excel и STATISTICA была установлена корреляционная зависимость в виде уравнения регрессии, а коэффициент корреляции считает неучтенные факторы. В данной статье рассматриваются только два важных параметра, которые не представляют полные эксплуатационные характеристики машины.

В статье С. А. Пестрикова, А. Г. Шумкова [6] представлена методика оценки организации технического обслуживания и ремонта (ТОиР) на примере транспортного предприятия ОАО «МРСК Урал»-«Пермэнерго», в которой учитываются два типа параметров: организационные и технические. Выведен интегральный показатель и уровень управленческого процесса, позволяющий оценить эффективность работы транспортного подразделения. Однако в статье все показательные параметры приведены в виде коэффициентов и сведены к одному интегральному показателю оценки эффективности организации. Поэтому данная статья не может определить уровень перспективности рассматриваемых комплексных машин.

В статье A. I. Dotsenko and K. P. Mandrovskiy⁸ рассмотрены методики для выявления перспективности типа строительно-дорожных машин (СДМ) и адаптированности этих машин в данных климатических районах. Описаны методики оценки СДМ с помощью технико-э-

кономических показателей на основе мониторинга. Установлена иерархию оценочных показателей. Однако в данной статье не указаны конкретные методики оценки эффективности ЗТМ с помощью комплексных оценочных показателей.

В работе Т. М. Бочкарева⁹ отражены в основном экономические расчеты и обоснования параметров ЗТМ экономических преобразований и разработаны удельные трудоемкости, себестоимости разработки планировочных работ, стоимости машино-смен и себестоимости разработки и транспортировки грунта, продукции удельных капиталовложений, экономическая эффективность разработки и транспортировки грунта. Однако конкретно не даны сравнительные и оценочные параметры ЗТМ.

В работе Н. Н. Симонова¹⁰ показаны результаты анализа рабочего процесса бульдозера на основе энергетических затрат при выполнении основных элементов рабочего цикла; математические модели технической и эксплуатационной производительности бульдозера. Связи между параметрами найдены путем аппроксимации их общими уравнениями регрессии, которые позволяют определять средние значения основных параметров по величине главного параметра. Однако эти параметры бульдозеров в виде корреляционной зависимости не позволяют оценить их эффективность в целом.

В работе Копфера указывается, что по общепринятой в Германии методике расход топлива на транспортную работу (в литрах на 100 т-км) существенно зависит от полной массы транспортного средства. Он обычно описывается линейной функцией либо степенными моделями на основе корреляционной функции. Однако оценка эффективности транспортировки грузов не полностью раскрыта.

Целью настоящего исследования является разработка системы показателей (удельные, обобщенные, дифференциальные и интегральные) для объективной оценки технического уровня разрабатываемых перспективных конструкций, а также эксплуатируемых на практике ЗТМ отвального типа в РК. Вычисле-

⁸ Dotsenko A. I., Mandrovskiy K. P. Indicators of the efficiency for using of road-building machines at various levels of management decisions // International Scientific Conference Interstroyemeh - 2019 (ISM - 2019) / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 786 (2020) 012005 doi:10.1088/1757-899X/786/1/012005 IOP Publishing.

⁹ Бочкарева Т. М. Технология планировочных и землеройных работ: учебно-метод. пособие. Пермь: Изд-во Перм.нац. исслед.политехн. ун-та, 2015. 132 с.

¹⁰ Симонов Н. Н. Прогнозирование эффективности выполнения бульдозерами земляных работ. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: ОАО ЦНИИС, 2005. 24 с.

на комплексная оценка ЗТМ отвального типа с помощью компьютерной программы и практические оценки новых конструкций отвала ЗТМ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общая последовательность существующих и разработанных авторами систем показателей и их пояснения приведены в таблице 1. Наряду с широко известными показателями

[2, 3, 4, 5, 6, 7] оценки эффективности ЗТМ авторами предлагаются дополнительно новые показатели (№ 6...26, см. таблицу 1) для оценки эффективности рабочего органа (РО) ЗТМ отвального типа.

Для оценки эффективности РО ЗТМ отвального типа создана система оценочных показателей, позволяющих объективно оценить технический уровень разработанных перспективных РО машин (см. таблицу 1).

Таблица 1
Система показателей для оценки РО ЗТМ
Источник: составлено авторами.

Table 1
System of indicators for assessing RO ZTM.
Source: compiled by the authors.

№	Показатель	Размерность	Наименование показателей
1	2	3	4
1.	B	м	Ширина отвала, ножа
2.	R	Н, кН	Усилие на лезвие РО, ножа
3.	G_{po}	кг	Масса отвала бульдозера
4.	N	кВт	Мощность бульдозера
5.	$G_{пр}$	кг	Масса призмы волочения грунтов при максимальном наборе перед отвалом
6.	R/B	(Н/м); кН/м	Удельное усилие, приходящееся на единицу ширины отвала, ножа
7.	N/B	кВт/м	Удельная мощность, приходящаяся на единицу ширины отвала, ножа
8.	RN/B^2	$((Н)кН \cdot кВт)/м^2$	Обобщенный показатель экономии мощности и силовых нагрузок, приходящихся на квадрат ширины отвала
9.	$G_{po}/G_{пр}$	кг/кг	Удельное соотношение масс: РО (бульдозера) и призмы волочения
10.	$N/G_{пр}$	кВт/кг	Удельное соотношение мощности бульдозера и массы призмы волочения
11.	$N/G_{пр}^2$	$\frac{кВт}{кг^2}$	Обобщенный показатель экономии мощности, приходящийся на квадрат массы призмы волочения
12.	$G_{po}/П$	$(кг \cdot ч)/м^3$	Удельная масса РО, приходящаяся на единицу производительности
13.	N/П	$(кВт \cdot ч)/м^3$	Удельная мощность, приходящаяся на единицу производительности
14.	$NG_{po}/П^2$	$(кг \cdot кВт)/(м^3/ч)^2$	Обобщенный показатель экономии мощности и массы РО, приходящийся на квадрат производительности бульдозера

№	Показатель	Размерность	Наименование показателей
15.	$\frac{G_{po}^2 \cdot N^2}{\Pi^2 \cdot G_{np}^2}$	$\frac{кг^2 \cdot кВт^2}{(м^3/ч)^2 \cdot (кг)^2}$	Дифференциальный показатель экономии затраченной энергии, квадратов массы РО и мощности бульдозера, приходящиеся на квадраты производительности и массы призмы волочения
16.	G_{po}/B	кг/м	Удельная масса РО, приходящаяся на единицу ширины отвала, ножа
17.	N/G_{po}	кВт/кг	Удельная мощность бульдозера, затраченная на единицу массы РО
18.	$T/F_{отв}$	кН/м ²	Удельная сила тяги, приходящаяся на единицу площади лобовой поверхности отвала
19.	G_{po}/N	кг/кВт	Удельная масса РО, приходящаяся на единицу мощности бульдозера
20.	$T/N; q/N$	кН/кВт; (м ³ /кВт)	Удельная сила тяги (вместимости), приходящаяся на единицу мощности
21.	$(G_{po} \cdot T)/N^2$	(кг·кН)/кВт ²	Обобщенный показатель экономии массы РО и силы тяги, приходящийся на квадрат мощности
22.	Z/Π	тенге · час/м ³	Приведенные удельные затраты, приходящиеся на единицу производительности
23.	$(G_{po} \cdot Z)/\Pi^2$	тенге·кг/(м ³ /ч) ²	Обобщенный показатель экономии массы РО и затрат, приходящийся на квадрат производительности
24.	$Q_{час} = \frac{Q_T}{T_{ц}}$	кг/час	Часовой расход топлива, приходящийся на 1 цикл времени работы бульдозера
25.	$Q_{уд} = Q_T/\Pi$	кг/м ³	Удельный расход топлива, приходящийся на единицу расхода топлива и производительности
26.	$(Z \cdot Q_T)/\Pi^2$	$\frac{(тенге \cdot кг)}{(м^3/ч)^2}$	Обобщенный показатель экономии затрат и расхода топлива, приходящийся на квадрат производительности
27.	$i_k = \Delta/T_n$	мм/(мото·час)	Удельная интенсивность изнашивания режущей кромки, приходящаяся на единицу наработки ножа ²
28.	$K_{эф} = \frac{P_K^T - P_K^H}{P_K^T}$	кН/кН	Коэффициент эффективности новой конструкции по снижению сил сопротивления копанью грунта [2]
29.	$K_{нд} = t_{сп}/(t_{сп} + t_{устр} + t_{проф})$	ч/ч	Показатель надежности, отражающий качество изготовления машины [2]
30.	$K_{кфт} = K_R + K_V + K_{кдц} + K_{отп}$		Обобщенный показатель качественной оценки комфортабельности машины [2]

Наряду с широко известными показателями и оценками эффективности ЗТМ [2, 4, 7] авторами предлагаются более 20 новых показателей для оценки эффективности РО ЗТМ отвального типа [1, 8, 9]. Общая последовательность определения новых показателей и пояснения к ним приведены в таблице 1.

По степени сложности формирования оценочные показатели подразделяются на: 1 –

частные показатели (теоретические, опытно-экспериментальные, эксплуатационные, геометрические, физические, экономические, технические, силовые и скоростные, основные и производные и т.п.); 2 – *удельные показатели* (формируются делением или умножением одного частного показателя с главным параметром, например, энергоёмкость $N_{уд} = \frac{N}{\Pi} \left(\frac{кВт \cdot час}{м^3} \right)$,

материалоемкость $N_{уд} = \frac{N}{\Pi} \left(\frac{\text{кВт} \cdot \text{час}}{\text{м}^3} \right)$ и т.д.; 3 – *обобщенный показатель* (формируется умножением или делением одноименных удельных

показателей, например, $\frac{N}{\Pi} \cdot \frac{G_{po}}{\Pi} = \frac{N \cdot G_{po}}{\Pi^2} \left(\frac{\text{кВт} \cdot \text{кг}}{(\text{м}^3/\text{ч})^2} \right)$;
 $\frac{R}{B} \cdot \frac{N}{B} = \frac{R \cdot N}{B^2} \left(\frac{\text{кН} \cdot \text{кВт}}{\text{м}^2} \right)$; $\frac{N}{\Pi} \cdot \frac{G_{po}}{\Pi} \cdot \frac{n}{\Pi} = \frac{N \cdot G_{po} \cdot n}{\Pi^3} \left[\frac{\text{кВт} \cdot \text{кг} \cdot 1 \text{ раб}}{(\frac{\text{м}^3}{\text{час}})} \right]$;

4 – *дифференциальный показатель* (формируется умножением или делением одноименных обобщенных показателей, например, $\frac{N \cdot G_{po}}{\Pi^2} \cdot \frac{N \cdot G_{po}}{G_{np}^2} = \frac{N^2 \cdot G_{po}^2}{\Pi^2 \cdot G_{np}^2} \left[\frac{\text{кг}^2 \cdot \text{кВт}^2}{(\text{м}^3/\text{ч})^2 \cdot (\text{кг})^2} \right]$ и т.д. [1].

Согласно представленной в таблице 1 системе показателей и проведенных полевых исследовательских испытаниях на этих моделях произведена оценка эффективности бульдозерного отвала с шестью вариантами (рисунок 1).

Согласно таблице 1 приведенные в пунктах 1–5 параметры РО и бульдозера замерялись по известному методу [1, 2], а производительность – Π подсчитывалась с помощью известной формулы на основе замеренных параметров, остальные оценочные показатели также по отношению (таблица 2, п.6–26) к компьютерной программе. Их вычисленные значения приведены в таблице 2, соответственно по графе к шести вариантам исполнения отвалов (см. графы 4–9, таблица 2).

На одном из бульдозеров на базе трактора ДТ-75М для копания глинистого грунта был установлен традиционный отвал с серийными ножами (ножи изготовлены из марки стали Ст65Г) (см. рисунок 1, а, б), а на другом бульдозере – модернизированный отвал с опытными ножами (см. рисунок 1, в, г, д, е), изготовленными из горячекатанной прокатной износостойкой легированной стали 36Г2СР, разработанной и выпускаемой УкрНИИметом [1].

Новые модернизированные отвалы согласно патентам КЗ: №13578, №13576; №15852 были изготовлены на Челябинском заводе

Дормаш им. Колющенко и комплект ножей из стали 36Г2СР с термообработкой ТВЧ, а также крепежные элементы (согласно договору № 90237/12 от 20.06.1998 г.).

Для определения оценочных показателей опытным путем определены следующие параметры бульдозера: потребляемая им мощность N , кВт; ширина B и высота $H_{отв}$ отвала, м; усилие на лезвии рабочего органа R , Н; масса отвала G_{po} , кг; масса призмы волочения (максимальная) G_{np} , кг; тяговое усилие бульдозера T , кН; часовой расход топлива G_r , кг(л); интенсивность изнашивания режущих кромок i_k , (мм·мото)/час; скорость перемещения разработанного грунта u , м/с; площадь поперечного сечения траншеи S , м² и т.д. по ГОСТ 4.122–87 «Бульдозеры. Номенклатура показателей» и ГОСТ 10792–97 «Бульдозеры. Правила приемки и методы испытаний».

Эксперименты проводились на полевой установке по разработанной методике на глинистых грунтах с каменистыми включениями в летнее время при температуре окружающей среды от 20 °С до 36 °С. Каждый вариант модели отвала испытывался 4–6 раз на пути разработки грунта 250 м. Средняя удельная интенсивность изнашивания ножей определялась по среднему значению весового износа образца на 1 км пути трения с 1 кв. см. площадки износа ножа. Грунт естественного залегания – влажность – 18...22%, число ударов ударником ДорНИИ – 50...55, число пластичности – 12...14 [1].

По экспериментальным данным вычислены оценочные показатели с помощью компьютерной программы для различных конструкций отвалов^{11, 12, 13, 14, 15} и их значения приведены в таблице 2. Построены графики изменения оценочных показателей по экспериментальным данным, позволяющие оценить технико-экономическую эффективность для различных конструкций отвалов бульдозера (см. рисунок 1, таблицу 2) [1].

¹¹ Баловнев В. И., Хмара Л. А. Интенсификация разработки грунтов в дорожном строительстве. М.: Транспорт, 1993. 384 с.

¹² Кабашев Р. А., Сурашов Н. Т., Гудович М. И. Анализ и оценка перспективных конструкций рабочих органов землеройно-транспортных машин // Механизация и автоматизация земляных работ / Сборник докладов. Киев: КИСИ, 1991. С. 24–27.

¹³ Инновационный патент №15852 от 04.04.2005 г. Сурашов Н. Т., Толымбек Д. Н. Отвал бульдозера. Опубликовано в бил. № 6 от 15.06.2005 г. 3 с.

¹⁴ Инновационный патент №13578 от 14.08.2003 г. Сурашов Н. Т., Толымбек Д. Н. Отвал с выступающим ножом бульдозера. Опубликовано в бил. №10 от 15.10.2003 г. 2 с.

¹⁵ Инновационный патент №13576 от 14.08.2003 г. Сурашов Н. Т., Толымбек Д. Н. Ковш скрепера. Опубликовано в бил. №10 от 15.10.2003 г. 3 с.

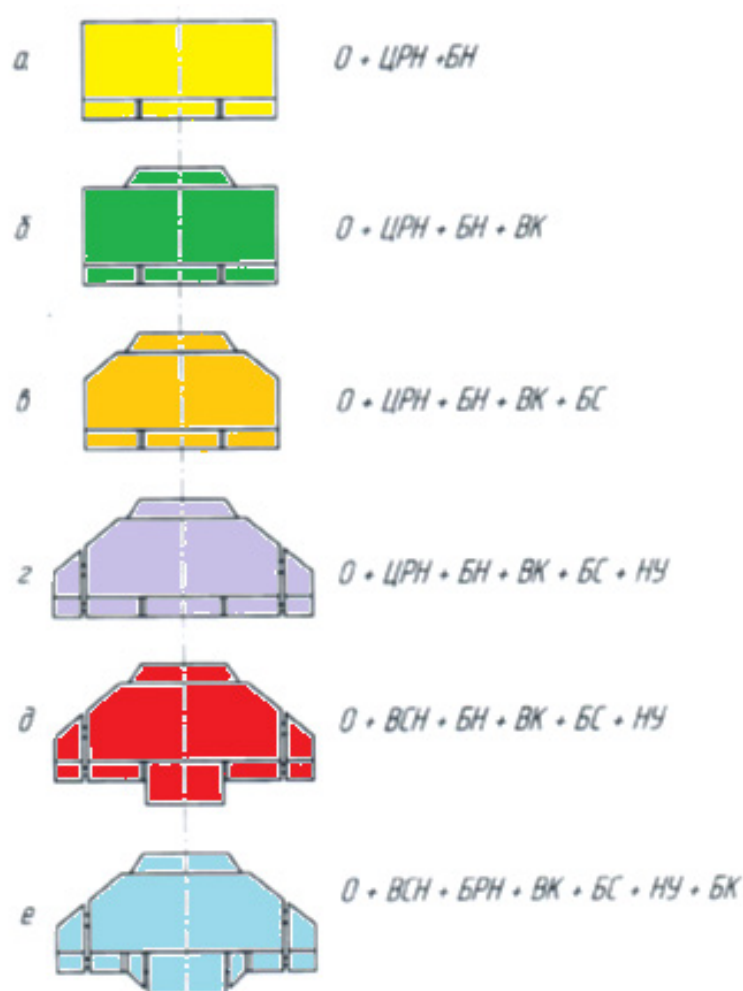


Рисунок 1 – Формирование РО бульдозера в зависимости от категории разрабатываемых грунтов:
 а – традиционный отвал без козырька; б – традиционный отвал с козырьком; в – отвал с верхними боковыми скосами (БС); г – то же, отвал с ножами-уширителями (НУ); д – то же, отвал, оснащенный выступающим средним ножом (ВСН); е – то же, отвал, оснащенный ВСН и боковыми косынками (БК)
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Formation of the RO for a bulldozer depending on the category of developed soils
 а) – traditional blade without a visor; б) – traditional blade with a visor; в) – blade with upper side bevels (SB);
 г) – the same, blade with knives-extenders (KE); д) – the same, a blade equipped with a (PMK);
 е) – the same, blade equipped with a PMK and a SB;
 Source: compiled by the authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Таблица 2
Результаты оценки эффективности сформированных бульдозерных отвалов
Источник: составлено авторами.

Table 2
Results of evaluation of the effectiveness of the formed bulldozer blades
Source: compiled by the authors.

№ п/п	Обозначения (показатели)	Размерность	Значение показателей (шесть вариантов изготовления отвала)					
								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	B	м	2,52	2,52	2,52	2,93	2,93	2,93
2.	R	Н (кН)	25,1	25,1	25,1	25,1	25,1	25,1
3.	G_{po}	кг	1070	1092	1062	1112	1126	1134
4.	N	кВт	70	70	70	70	70	70
5.	G_{np}	кг	3420	3591	3591	3762	3864	3933
6.	$\frac{R}{B}$	$\frac{H}{M} \left(\frac{кН}{м} \right)$	9,96	9,96	9,96	8,56	25,1	25,1
7.	$\frac{B}{R}$	$\frac{кВт}{м}$	27,77	27,77	27,77	23,89	70,0	70,0
8.	$\frac{R \cdot N}{B^2}$	$\frac{H(кН) \cdot кВт}{м^2}$	276,58	276,58	276,58	204,49	1757	1757
9.	$\frac{G_{po}}{G_{np}}$	$\frac{кг}{кг}$	0,312	0,304	0,295	0,295	0,291	0,288
10.	$\frac{N}{G_{np}}$	$\frac{кВт}{кг}$	0,0204	0,0194	0,0194	0,0186	0,0181	0,0177
11.	$\frac{N \cdot G_{po}}{G_{np}^2}$	$\frac{кВт \cdot кг}{кг^2}$	0,0063	0,0058	0,0057	0,0054	0,0052	0,005
12.	$\frac{G_{po}}{\Pi}$	$\frac{кг}{м^3} / ч$	0,0312	0,0304	0,0295	0,0215	0,0291	0,0288
13.	$\frac{N}{\Pi}$	$\frac{кВт}{м^3} / ч$	0,002	0,0019	0,0019	0,0018	0,0018	0,0017

№ п/п	Обозначения (показатели)	Размерность	Значение показателей (шесть вариантов изготовления отвала)					
								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
14.	$\frac{G_{po} \cdot N}{\Pi^2}$	$\frac{кг \cdot кВт}{(\frac{м^3}{ч})^2}$	6,24·10-5	5,77·10-5	5,6·10-5	5,31·10-5	5,25·10-5	4,89·10-5
15.	$\frac{G_{po}^2 \cdot N^2}{\Pi^2 \cdot G_{np}^2}$	$\frac{кг^2 \cdot кВт^2}{(\frac{м^3}{ч})^2 \cdot кг^2}$	3·10-7	3·10-7	3·10-7	2·10-7	2·10-7	2·10-7
16.	G_{po}/B	кг/м	424,6	433,3	421,4	379,5	384,3	387,0
17.	N/G_{po}	кВт/кг	0,065	0,064	0,066	0,063	0,062	0,062
18.	$T/F_{отв}$	кН/м ²	30,2	27,6	30,3	26,0	25,4	25,2
19.	G_{po}/N	кг/кВт	15,3	15,6	15,2	15,9	16,1	16,2
20.	T/N	кН/кВт	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
21.	$G_{po} \cdot T/N^2$	кг·кН/кВт ²	13,3	13,6	13,2	13,8	14,0	14,1
22.	Z/Π	тенге/м ³ /ч	505,8	481,8	483,6	465,5	458,8	458,1
23.	$G_{po} \cdot Z/\Pi^2$	тенге·кг/(м ³ /ч) ²	5203,6	4800	4685,8	4521	4438	4440
24.		кг/м ³ /ч	0,115	0,107	0,107	0,105	0,103	0,102
25.		тенге·кг/(м ³ /ч) ²	58,36	52,75	52,95	48,8	47,3	46,99
26.	Δ/T_n	Мм/мото·час	0,1	0,094	0,093	0,091	0,3	0,28
27.	$P_k - P_k/P_k$	кН/кН	0,012	0,012	0,012	1,125	1,37	1,41
28.	T	кН	60,9	60,9	60,9	60,9	60,9	60,9
29.	$F_{отв}$	м ²	2,016	2,205	2,01	2,338	2,4	2,42
30.	V	м ³ /ч	104	109,6	109,6	114,5	116,4	117,0
31.	T_u	час	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
32.	$\frac{T}{P_k}$	кН	57,2	57,2	57,2	57,2	57,2	57,2

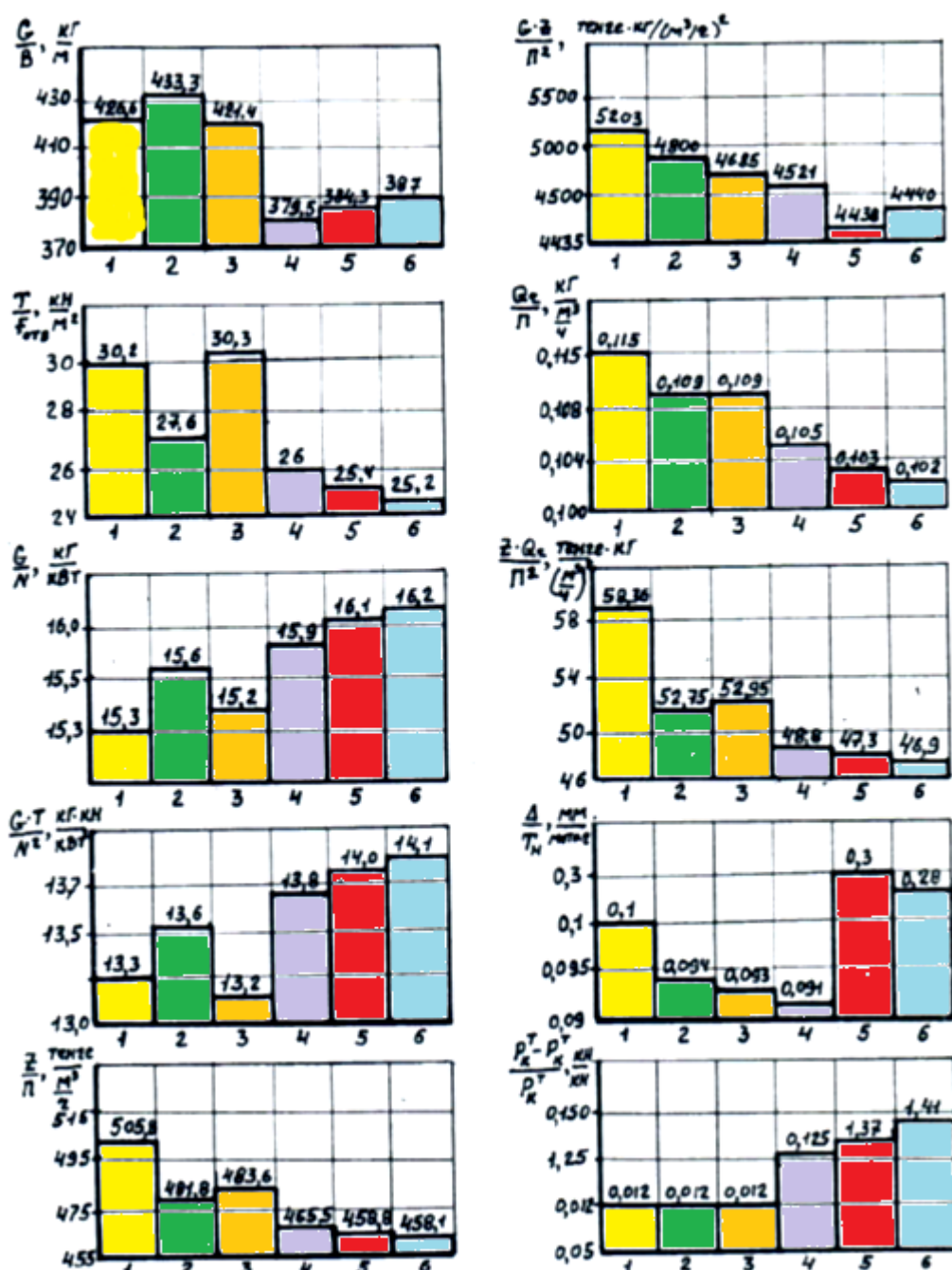


Рисунок 2 – Изменения оценочных показателей технико-экономической эффективности различных конструкций бульдозерных отвалов:

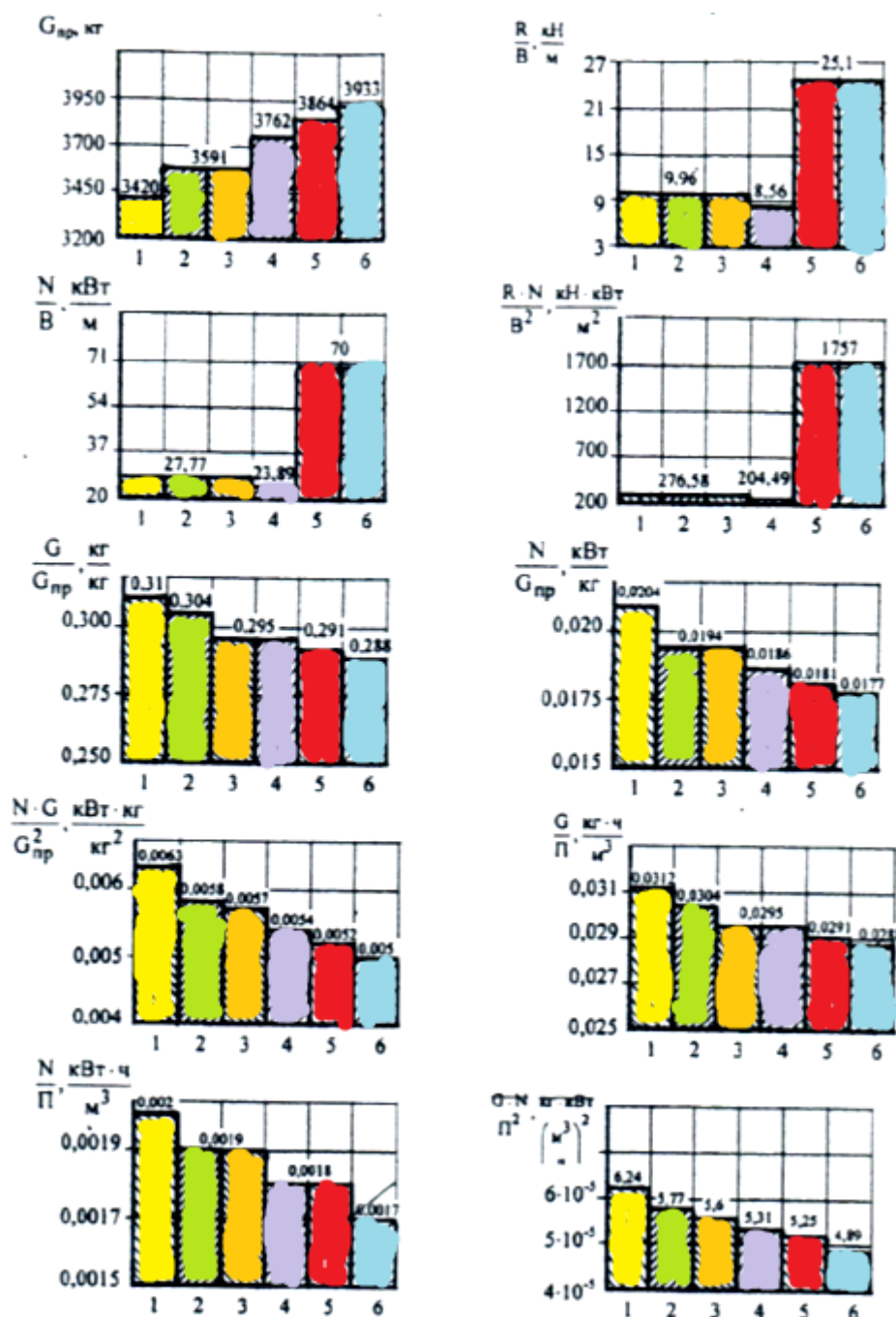
1 – традиционный отвал без козырька; 2 – традиционный отвал с козырьком; 3 – отвал с боковыми скосами; 4 – то же, отвал с ножами-уширителями; 5 – то же, отвал с ВСН и ножами-уширителями; 6 – то же, отвал с ВСН и БК, ножами-уширителями

Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Changes in the estimated indicators of technical and economic efficiency of various designs of bulldozer dumps. Source: compiled by the authors.

1 – traditional blade without a visor; 2 – traditional blade with a visor; 3 – blade with side bevels; 4 – the same, blade with knives-extendors; 5 – the same, a blade with PMK and knives-extendors; 6 – the same, blade with PMK and BC, knives-extendors;

Source: compiled by the authors.



- 1 – традиционный отвал без козырька; 2 – традиционный отвал с козырьком;
 3 – отвал с боковыми скосами; 4 – то же, отвал с ножами-уширителями;
 5 – то же, отвал с BCH и ножами-уширителями;
 6 – то же, отвал с BCH и БК, ножами-уширителями
 1 – traditional blade without a visor; 2 – traditional blade with a visor; 3 – blade with side bevels;
 4 – the same, blade with knives-extenders; 5 – the same, a blade with PMK and knives-extenders;
 6 – the same, blade with PMK and BC, knives-extenders;

Продолжение рисунка 2 – Изменения оценочных показателей технико-экономической эффективности различных конструкций бульдозерных отвалов:
 Continued Figure 2 – Changes in the estimated indicators of technical and economic efficiency of various designs of bulldozer dumps.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ оценочных показателей: материалоемкости G_{po}/G_{np} и G_{po}/P (см. таблицы 1, 2, пункты 9 и 12) показывают, что с совершенствованием конструкции РО уменьшается металлоемкость, а объем набора призмы волочения увеличивается, соответственно возрастает производительность бульдозера (см. рисунок 1 и таблицу 2); энергоемкости, N/P , N/G_{np} и показывают, что с совершенствованием конструкции отвала ЗТМ отвального типа улучшаются энергетические показатели, т. е. расход энергии, затраченной на разработку единичного объема грунта уменьшается; показатели удельного усилия, приходящегося на единицу ширины ножа R/B , удельной мощности, приходящейся на единицу ширины ножа N/B ; обобщенный показатель экономии мощности и силовых нагрузок $R N / B^2$ показывают, что с улучшением конструкции отвала (отвалы 1, 2, 3, типы исполнения, см. рисунок 1, 2) их значения почти не изменяются, отвал конструкции типа 4 (см. рисунок 1, 2) уменьшается, а отвалы с оснащением ВСН и БК резко (скачкообразно) увеличиваются (см. рисунок 1, конструкции типа 5 и 6) (см. таблицу 2) [1].

Таким образом, теоретически и экспериментально произведена оценка технического уровня предлагаемых перспективных типов конструкции отвалов бульдозера и выявлены наиболее эффективные по оценочным показателям (по ранжированному весу):

- отвал с верхними боковыми скосами и ножами-уширителями, оснащенный выступающим средним ножом и боковыми косынками (см. рисунок 1, е), патент KZN№13578;

- тот же отвал, только без ножей с боковыми косынками (см. рисунок 1, д);

- тот же отвал, только без выступающего ножа и боковых косынок (см. рисунок 1, г), патент KZN№13576 и 15852.

Отвал с верхними боковыми скосами и ножами-уширителями, оснащенный выступающим средним ножом и боковыми косынками (см. рисунок 1, е), является самым перспективным конструктивным решением, затем конструкции отвала (см. рисунок 1, д), потом – конструкции (см. рисунок 1, г) и т.д., то есть по сравнению с базовыми отвалами (рисунок 1, а) – производительность увеличивается на 8–10%, экономия топлива и энергоемкость на 3% и, наоборот, металлоемкость РО уменьшается на 5%. Тяговое усилие бульдозера используется на 5–6% (см. рисунок 1, е). Ранжированные последовательности перспективной конструкции отвалов с ножами расположены

на основе анализа и сопоставления их по оценочным показателям приведены на рисунке 1 (снизу вверх).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сурашов Н. Т. Научные основы создания перспективных рабочих органов землеройно-транспортных машин: монография. Алматы: КазГАСА, 2004. 263 с.

2. Хмара Л. А., Голубченко А. И. Определение показателей эффективности строительных машин, манипуляторов и машин с рабочими органами многоцелевого назначения: Сб. тр. / МАДИ. М., 1987. С. 23–28.

3. Перов В. А. Методика изучения динамики землеройной машины при учете действия случайных нагрузок // Технологии и средства механизации. 2012. № 3. С. 108–110.

4. Хмара Л. А., Басий В. В., Деревянчук М. И., Максук Ю. А. Исследование накопительной способности отвала бульдозера с боковыми ограничивающими элементами // Вестник Харьковского национального автомобильного дорожного университета. 2005. № 2. С. 80–84.

5. Хабибуллозова Х. Х., Горяев Н. К. Исследование зависимости расхода топлива от массы перевозимого груза при междугородных перевозках // Вестник СибАДИ. 2021;18(3):264–273. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-3-264-273>

6. Пестриков С. А., Шумков А. Г. Методика оценки эффективности организации технического обслуживания и ремонта на примере транспортного подразделения филиала ОАО «МРСК Урала» – «ПермЭнерго» – Пермь // Вестник ПНИПУ. Социально-экономические науки. 2019. № 1. С. 233–245.

7. Хмара Л. А. Научное сопровождение строительных и дорожных машин: исследование, расчет, создание, выбор, использование // Вестник Приднепровский государственной академии строительства и архитектуры. Приднепровск: 2015. № 7–8 (209). С. 11–30.

8. Сурашов Н. Т., Асмагулаев Р. Б., Толымбек Д. Н. Определение рациональной формы отвала бульдозера с учетом грунтового фона Республики Казахстан // Вестник СибАДИ. Том 18, № 6 (2021). С. 662–677. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-662-677>.

9. Сурашов Н. Т., Асмагулаев Р. Б., Толымбек Д. Н. Определение оптимальных конструктивных параметров отвала бульдозера // Вестник СибАДИ. Том 19, № 4 (2022). DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-500-513>.

REFERENCES

1. Surashov N. T. [Scientific foundations of the creation of promising working bodies of earth-moving machines]. Monograph. Almaty: KazGASA, 2004. 263 p. (in Russ.)

2. Khmara L. A., Golubchenko A. I. *Opredelenie pokazatelej jeffektivnosti stroitel'nyh mashin, manipulatorov i mashin s rabochimi organami mnogocелеvogo naznachenija: Sb. tr. / MADI*. [Determination of perfor-

mance indicators of construction machines, manipulators and machines with working bodies of multi-purpose purpose: Sb. Tr. / MADI]. Moscow, 1987: 23-28. (in Russ.)

3. Perov V. A. [Methods of studying the dynamics of the earth-moving machine when taking into account the action of random loads]. *Tehnologii i sredstva mehanizatsii*. 2012; 3: 108-110. (in Russ.)

4. Khmara L. A., Basiy V. V., Derevyanchuk M. I., Maksyuk Yu. A. [Study of the accumulative ability of the blade of a bulldozer with lateral limiting elements]. *Vestnik Kharkivskogo natsional'nogo avtomobil'nogo universiteta*. 2005; 2: 80-84. (in Russ.)

5. Khabibullozoda K. K., Goriaev N. K. Research on dependence of fuel consumption on cargo weight in long-distance transport. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;18(3):264-273. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-3-264-273>

6. Pestrikov S. A., Shumkov A. G. [Methods of assessing the effectiveness of the organization of maintenance and repair on the example of the transport unit of the branch of JSC "IDGC of Urals" - "PermEnerg" - Perm]. *Vestnik PNPU. Socio-Economic Sciences*. 2019; 1: 233-245. (in Russ.)

7. Khmara L. A. Nauchnoe soprovozhdenie stroitel'nykh i dorozhnykh mashin: issledovanie, raschet, sozdanie, vybor, ispol'zovanie [Scientific support of construction and road machines: research, calculation, creation, selection, use]. *Vestnik Pridneprovskij gosudarstvennoj akademii stroitel'stva i arhitektury. Pridneprovsk*. 2015; 7-8 (209):11-30. (in Russ.)

8. Surashov N.T., Asmatulaev R.B., Tolymbek D.N. Determination of a rational shape of a bulldozer blade considering the soil background of the Republic of Kazakhstan. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;18(6):662-677. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-662-677>.

9. Surashov N. T., Asmatulaev R. B., Tolymbek D. N. Blade optimal design parameters determination. *The*

Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2022;19(4):500-513. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-500-513>

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Сурашов Н. Т. Формулировка направления, темы исследования и исследование научной гипотезы. Формулирование проблемы исследования. Разработка теоретических исследований, выбор методологии и методов исследований (50%).

Толымбек Д. Н. Проверка теоретических предположений, анализ результатов исследования, редактирования, формирование выводов. Рецензирование результатов, корреспонденция данных с иностранными авторами (50%).

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Nurgali T. Surashov. Formulation of direction, research topic, scientific hypothesis. Formulation of research problem. Development of theoretical studies, selection of methodology and methods of research (50%).

Damir N. Tolymbek. Verification of theoretical assumptions, analysis of research results, editing, formation of conclusions. Review of results, correspondence of data with foreign authors (50%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сурашов Нургали Толымбекович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Организация движения, управление на транспорте и логистика».

Толымбек Дамир Нургаливич – канд. техн. наук, доц., директор.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nurgali T. Surashov – Dr. of Sci., Professor, Traffic and Transport Management and Logistics Department.

Damir N. Tolymbek – Cand. of Sci., Associate Professor.

УДК 625.084: 534.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-828-840>

EDN: QCIOYG

Научная статья



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО УПЛОТНЕНИЮ ГРУНТА ВИБРАЦИОННЫМ КАТКОМ НАММ 3411

И. С. Тюремнов, А. С. Краюшкин, Д. А. Шорохов**Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия**tyuremnovis@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2261-4153>**senya1257@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-5078-4179>**dogpop150@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-1825-0676>***ответственный автор*

АННОТАЦИЯ

Введение. Для оценки влияния различных факторов на результат уплотнения грунта вибрационным катком используется математическое моделирование. Верификация математической модели осуществляется сравнением её с результатами экспериментальных исследований. Расширение перечня моделей катков в экспериментальных исследованиях позволяет расширить диапазон условий для верификации математической модели. В статье представлены результаты полевых экспериментальных исследований уплотнения грунта вибрационным катком НАММ 3411. Получены данные по изменению значения динамического модуля деформации грунта E_{vd} от количества проходов катка при уплотнении песчано-гравийной смеси толщиной слоя 0,5 м. Выявлены особенности, которые целесообразно учитывать при проведении дальнейших экспериментальных исследований.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования размаха вертикальных перемещений вальца, а также вертикальных ускорений вальца и его рамы выполнялись на вибрационном катке НАММ 3411 при уплотнении песчано-гравийной смеси. Результат уплотнения грунта после каждого прохода оценивался значением динамического модуля деформации E_{vd} , измеряемым при помощи установки динамического нагружения ZORN ZFG 3.0. В эксперименте вертикальные перемещения вибрационного вальца регистрировались при помощи лазерного датчика BAUMER OADM 13U6480/S35A. Ускорения колебаний вибрационного вальца и рамы вальца регистрировались пьезоэлектрическими акселерометрами моделей AP2099-100 и AP99-100. При обработке показаний датчиков использовалась технология цифровой обработки сигналов – фильтры низких частот с граничной частотой 200 Гц.

Результаты. Исследования выполнялись на двух участках с различной влажностью грунта. На участке с переувлажненным грунтом в диапазоне значений $E_{vd} = 10...13$ МПа, амплитудные значения вертикальных ускорений вальца находились в диапазоне от +20...+45 до -25...-43 м/с², а рамы в диапазоне от +2,5...+5 до -2...-5 м/с². Размах колебаний вибровальца на участке с переувлажнённым грунтом составил 3,3...4,8 мм. На участке с грунтом с близкой к оптимальной влажности, в диапазоне значений $E_{vd} = 18...28$ МПа, амплитудные значения вертикальных ускорений вальца находились в диапазоне от +36...+48 до -35...-40 м/с², а рамы в диапазоне от +3,5...+6 до -2...-4,5 м/с².

Обсуждение и заключение. Полученные результаты показывают, что размах колебаний вальца, а также амплитудные значения вертикальных ускорений вальца и рамы вальца незначительно возрастают при увеличении модуля деформации грунта E_{vd} . Результаты проведённого эксперимента коррелируют с исследованиями проводимых на моделях катков. При измерении значений E_{vd} в одном поперечнике разница между измеренными значениями по оси движения катка и на следе от пневмоколеса достигала 30%. При анализе полученных результатов необходимо учитывать, что в эксперименте фактическая частота колебаний вальца составила 18 Гц, а не 27 Гц, как заявлено в технических характеристиках катка. При таком снижении частоты вынуждающая сила колебаний уменьшится приблизительно в 2,25 раза. Результаты эксперимента помогут в дальнейшей верификации математической модели катка и при проведении экспериментальных исследований аналогичного характера.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грунт, уплотнение, вибрация, каток вибрационный, исследование экспериментальное, динамический модуль деформации, ускорения колебаний.

© Тюремнов И. С., Краюшкин А. С., Шорохов Д. А., 2022

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы данной статьи выражают благодарность директору ООО «АКТОР» Одинцову Александру Игоревичу за организационную помощь в проведении экспериментальных исследований, а также студенту кафедры «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета Ефимову Сергею Сергеевичу за помощь в проведении экспериментальных работ.

Статья поступила в редакцию 11.11.2022; одобрена после рецензирования 29.11.2022; принята к публикации 19.12.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Тюремнов И. С., Краюшкин А. С., Шорохов Д. А. Экспериментальные исследования по уплотнению грунта вибрационным катком HAMM 3411 // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 6 (88). С. 828-840. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-828-840>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-828-840>

EDN: QCIOYG

EXPERIMENTAL STUDIES ON COMPACTION OF SOIL WITH HAMM 3411 VIBRATING ROLLER

Ivan S. Tyuremnov, Arseniy S. Krayushkin, Dmitry A. Shorokhov*

Yaroslavl State Technical University,

Yaroslavl, Russia

tyuremnovis@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2261-4153>

senya1257@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-5078-4179>

dogpop150@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-1825-0676>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Mathematical modelling is used to assess the influence of various factors on the result of soil compaction by a vibratory roller. The verification of the mathematical model is carried out by comparing it with the results of the experimental studies. Expanding the list of the roller models in the experimental studies allows expanding the range of conditions for verification of the mathematical model. The article presents the results of field experimental studies of soil compaction by HAMM 3411 vibrating roller. The data on the change in the value of the dynamic soil deformation modulus E_{vd} depending on the number of passes of the roller during compaction of sand-gravel mixture with a layer thickness of 0.5 m have been obtained. The peculiarities that are reasonable to take into account when carrying out further experimental research are revealed.

Materials and methods. The experimental studies of the scope of vertical movements of the roller, as well as vertical accelerations of the roller and its frame were carried out on a HAMM 3411 vibrating roller during compaction of a sand-gravel mixture. The result of compaction of the soil after each pass was estimated by the value of the dynamic deformation modulus E_{vd} measured using the ZORN ZFG 3.0 dynamic loading unit. In the experiment, vertical movements of the vibrating roller were recorded using a BAUMER OADM 13U6480/S35A laser sensor. Accelerations of vibrations of the vibrating roller and the roller frame were recorded by piezoelectric accelerometers of the AR2099-100 and AR99-100 models. When processing sensor readings, digital signal processing technology was used – low-pass filters with a limit frequency of 200 Hz.

Results. The studies were carried out on two sites with different soil moisture. On a site with waterlogged soil in the range of E_{vd} values = 10 ... 13 MPa, the amplitude values of the vertical accelerations of the roller were in the range from +20 ... +45 to -25 ... -43 m/s², and the frames in the range from +2.5 ... +5 to -2 ... -5 m/s². The range of vibrations of the vibrating roller in the area with waterlogged soil was 3.3...4.8 mm. On a site with soil with close to optimal importance, in the range of values E_{vd} = 18...28 MPa, the amplitude values of vertical accelerations of the roller were in the range from +36 ... +48 to -35 ... -40 m/s², and frames in the range from +3.5 ... +6 to -2...-4.5 m/s².

© Tyuremnov I. S., Krayushkin A. S., Shorokhov D. A., 2022



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

Discussion and conclusion. The results show that the range of oscillations of the drum, as well as the amplitude values of vertical accelerations of the drum and the drum frame slightly increase with increasing soil deformation modulus E_{vd} . The results of the experiment correlate with the studies conducted on the models of rollers DM-614 and DM-617. When measuring values of E_{vd} in one cross-section, the difference between measured values along the axis of roller's movement and on the pneumatic wheel track reached 30%. When analyzing obtained results, it is necessary to take into account that in the experiment the actual frequency of oscillation of the roller was 18 Hz, instead of 27 Hz as stated in the technical specifications. With such reduction of frequency, the forced force of oscillations will decrease approximately 2.25 times. Results of the experiment will help in further verification of mathematical model of the roller and in carrying out experimental researches of similar character.

KEYWORDS: soil, compaction, vibration, vibratory roller, experimental study, dynamic strain modulus, vibration acceleration.

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors of this article express gratitude to Alexander I. Odintsov, the director of OOO AKTOR for organizational assistance in conducting experimental research, as well as to Sergey S. Efimov, the student of the Construction and Road Machines Department of Yaroslavl State Technical University for assistance in conducting experimental work.

The article was submitted 11.11.2022; approved after reviewing 29.11.2022; accepted for publication 19.12.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Tyuremnov I. S., Krayushkin A. S., Shorohov D. A. Experimental studies on compaction of soil with Hamm 3411 vibrating roller. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (6): 828-840. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-828-840>

ВВЕДЕНИЕ

Процесс уплотнения – это одна из наиболее распространённых технологий повышения прочности, несущей способности и устойчивости к погоднo-климатическим факторам всех инженерных сооружений, возводимых на грунтах. Несмотря на большое количество исследований и опыт отечественных и зарубежных специалистов, вопросы взаимодействия уплотняющих машин с грунтом изучены недостаточно, что приводит к преждевременному разрушению дорог и строительных конструкций, возведенных на грунтах.

На сегодняшний день существует три основных способа уплотнения – статическое, вибрационное и ударное^{1, 2}. Наибольшую популярность получило вибрационное уплотнение с помощью вибрационных катков. При вибрационном уплотнении рабочий орган машины совершает колебательные движения и происходит передача колебаний на уплотняемый слой³. При вибрации достигается более высо-

кая плотность, большая глубина уплотнения и, соответственно, более высокая производительность. Благодаря таким преимуществам вибрационное оборудование занимает сейчас около 70% рынка.

Основная цель процесса уплотнения – увеличение числа контактов между частицами уплотняемого материала путем вытеснения жидкостей и газов, а также перераспределения частиц в уплотняемом объёме материала. Благодаря этому грунт приобретает остаточную деформацию, которая выражает степень уплотнения грунта.

Схематически уплотнение можно представить как процесс увеличения числа контактов между минеральными частицами грунта за счет их перераспределения и проникновения более мелких частиц в промежутки между крупными под действием прикладываемых к грунту извне усилий. При этом грунт приобретает остаточную деформацию, оцениваемую коэффициентом уплотнения, определяемым в соответствии с СП 34.13330.2012.

¹ Комплексная автоматизация технологических процессов устройства дорожных покрытий: учебное пособие / Р. Т. Емельянов, В. И. Жаданов, Г. В. Игнатьев, И. С. Инжутов, А. П. Прокопьев. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. 132 с.

² Пиковский Я. М., Полосин-Никитин С. М., Вошинин Н. П., Баловнев В. И. Дорожные машины и оборудование / Учебник для студентов автомобильно-дорожных вузов; редактор инж. Никитин А. Г. М.: «Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы», 1960. 604 с.

³ Машины для дорожного строительства CAT. Руководство по уплотнению грунта [Электронный ресурс] (дата обращения: 10.05.2021). URL: https://www.cat.com/ru_RU/articles/support/paving-application-guides1.html

В соответствии с СП 34.13330.2021 результат уплотнения грунта оценивается коэффициентом уплотнения. Однако определение коэффициента уплотнения грунта сопряжено с влиянием большого количества факторов, снижающих достоверность результатов. К тому же коэффициент уплотнения не отражает прочностные характеристики грунта и его способность воспринимать механические нагрузки [1, 2]. Более перспективно применение для оценки результатов уплотнения грунтов динамического и статического модуля деформации в соответствии с ГОСТ Р 59866–2022⁴.

Для совершенствования техники и технологии уплотнения грунтов необходимо разработать математическую модель влияния режимов нагружения и характеристик рабочего органа на результат уплотнения грунта в конкретных условиях. Традиционно для задач моделирования процессов уплотнения грунта применялись методы реологического моделирования, полуэмпирические методы и методы на основе уравнений механики сплошной среды. Анализ работ различных авторов по математическому моделированию [3, 4, 5, 6, 7, 8] показал, что математическая модель взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом должна описывать особенности колебаний элементов вибрационного катка (вальца и рамы вальца). Помимо этого, математическая модель должна описывать процессы изменения напряженно-деформированного состояния грунта. Поскольку грунт является сложной многофазной средой, а вибрационный каток является многомассной колебательной системой с нелинейными связями, то для упрощения разрабатываемых математических моделей вводят различные допущения. Это приводит к необходимости последующей верификации математической модели посредством сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными. Эксперименты желательно проводить в полевых условиях на серийно выпускаемых машинах при уплотнении различных строи-

тельных материалов. Для верификации можно использовать характеристики колебаний элементов вибрационного катка (перемещения и ускорения вальца и рамы вальца), напряжения на различных глубинах грунта, значения коэффициента уплотнения и динамического или статического модуля деформации грунта. Проанализировав существующие результаты экспериментальных исследований уплотнения грунта вибрационным катком [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15], сделали вывод, что в большинстве случаев исследователи указывают только модель вибрационного катка, без уточнения массы вальца, массы рамы, количества и характеристики амортизаторов и других параметров, необходимых для верификации математической модели⁵. В связи с этим следует расширять перечень моделей катков и диапазоны условий, в которых проводятся экспериментальные исследования.

В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований с вибрационным катком HAMM 3411. Эксперимент осуществлялся в полевых условиях для использования при верификации математических моделей взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования проводились в августе 2021 г. на одной из строительных площадок г. Ярославля.

В исследованиях использовался вибрационный каток HAMM 3411 с характеристиками⁶: масса катка эксплуатационная – 12830 кг; мощность двигателя – 100 кВт; частота колебаний вибратора – 27/37 Гц; уплотняющее усилие – 246/144 кН; линейное статическое давление вальца – 29,2 кг/см; амплитуда колебаний вальца – 1,9/0,8 мм; диаметр/ширина вальца – 1504/2140 мм; колеса AW 23.1-26 12 PR; амортизаторы вальца (модели HAMM 1487116) установлены в количестве 14 шт.

⁴ ГОСТ Р 59866–2022 Дороги автомобильные общего пользования. Показатели деформативности конструктивных слоев дорожной одежды из несвязных материалов и грунтов земляного полотна. Технические требования и методы определения [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/775/77552.pdf> (дата обращения: 10.09.2022).

⁵ Тюремнов И. С., Морев А. С., Фурманов Д. В. Экспериментальные исследования вертикальных перемещений и ускорений колебаний вальца вибрационного катка DM-617 при уплотнении грунта // В сборнике: Проблемы машиноведения. Материалы IV Международной научно-технической конференции. Научный редактор П. Д. Балакин. 2020 С. 121–128.

⁶ HAMM3411 Грунтовые катки Серия 3000. Модельный ряд H179 https://www.modernmachinery.ru/images/HAMM/3411_TCD2012L04_W_V4_ru_RU.pdf (дата обращения: 06.07.2022).



Рисунок 1 – Расположение акселерометров: на вальце катка (левый рисунок) и на раме вальца (правый рисунок)
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The location of accelerometers: on the roller (left picture) and on the roller frame (right picture)
Source: compiled by the authors.

Уплотняемый грунт – природная песчано-гравийная смесь (содержание гравия не менее 30%, глинистых частиц 3...4%), отсыпался слоем толщиной 0,5 м на специально отведенном участке строительной площадки.

Ускорения колебаний вибрационного вальца и рамы вальца регистрировались при помощи пьезоэлектрических акселерометров со встроенной электроникой моделей AP2099-100 (вальец катка) и AP99-100 (рама катка) производства ООО «Глобал-Тест» (г. Саров, Россия)⁷. Крепления датчиков осуществлялось при помощи магнитов, усилие которых составляет 220 Н. С учётом массы датчиков (45 г) и массы магнитов (28 г) обеспечивалась надёжная фиксация. Установка датчика на раму катка осуществлялась непосредственно на раме, а на вибровальце – на кронштейне. Оба датчика устанавливались вертикально в плоскости, проходящей через продольную ось вращения вибровальца (рисунок 1).

В эксперименте измерялись также вертикальные перемещения вибрационного вальца. Данные измерения осуществлялись при помощи лазерного датчика BAUMER OADM

13U6480/S35A с характеристиками⁸: диапазон измерений 50...550 мм; разрешение 0,01...1,1 мм; линейная ошибка $\pm 0,08... \pm 3,5$ мм; время отклика <0,9 мс; ошибка линейности при диапазоне измерений 100–150 мм от верхней точки обечайки вальца составляет не более 0,3 мм. В процессе измерений налипший грунт счищался скребком для исключения его влияния на результаты измерений (рисунок 2).

Показания акселерометров и датчика перемещений фиксировались с помощью анализатора спектра ZET 017-U8 производства компании ZETLAB (г. Зеленоград, Россия)⁹. Измерения проводились при частоте дискретизации 5000 Гц. Всё оборудование, в том числе анализатор спектра, было запитано от автономного аккумулятора и располагалось в кабине оператора катка.

Во время испытаний за один проход катка принималось движение по участку вперёд с включенным вибратором. Движение назад осуществлялось без вибрации. При работе катков HAMM 3411 использовал только один режим работы с максимальным вынуждающим усилием.

⁷ Вибропреобразователь AP2099-100 [Электронный ресурс]. URL: <https://globaltest.ru/product/vibropreobrazovatel-ar2099-100/> (дата обращения: 06.07.2022).

⁸ Лазерный датчик BAUMER OADM 13U6480/S35A [Электронный ресурс]. URL: <https://www.datasheets360.com/pdf/-1124803611755666485> (дата обращения: 07.07.2022).

⁹ Анализатор спектра ZET 017-U8 [Электронный ресурс]. URL: <https://zetlab.com/shop/izmeritelnoe-oborudovanie/analizatory/analizator-spektra-zet017-u8/> (дата обращения: 07.07.2022).



Рисунок 2 – Измерения вертикальных перемещений вальца катка HAMM 3411 лазерным датчиком BAUMEROADM 13U6480/S35A
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – The measurement for the vertical displacement of HAMM 3411 roller with BAUMER OADM 13U6480/S35A laser sensor
Source: compiled by the authors.



Рисунок 3 – Измерение модуля динамического нагружения грунта установкой ZORN ZFG3.0
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – The measurement of the dynamic loading modulus of soil with ZORN ZFG 3.0
Source: compiled by the authors.

Результат уплотнения грунта после каждого прохода оценивался значением динамического модуля деформации E_{vd} , измеряемым при помощи установки динамического нагружения ZORN ZFG 3.0 (рисунок 3)¹⁰.

Измерение значений E_{vd} осуществлялось после окончания каждого прохода катка в трех точках следа вальца, поперёк направления движения (посередине следа и на расстоянии 0,4...0,5 м от правой и левой границы следа) и

затем усреднялось. Каждая серия измерений значений E_{vd} выполнялась со смещением вперёд на 1–2 м по отношению к участку предыдущих измерений.

Регистрация показаний датчиков включалась при приближении вибрационного катка к месту экспериментального участка за несколько метров и останавливалась, когда каток съезжал с исследуемого участка.

¹⁰ Установки динамического нагружения ZORN ZFG 3.0. [Электронный ресурс]. URL: <https://zfg-3000.ru/catalog/4/> (дата обращения: 07.07.2022).

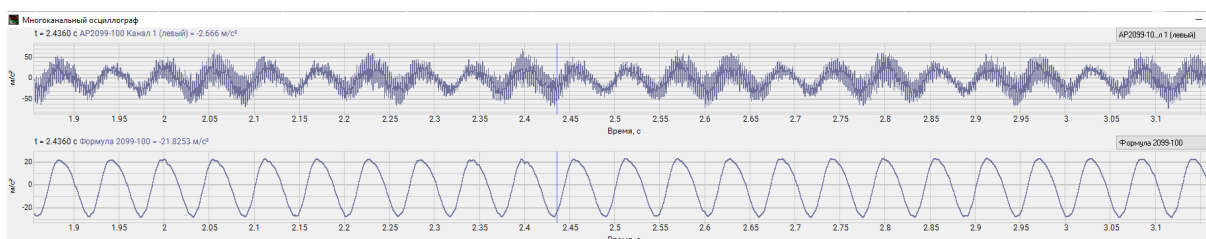


Рисунок 4 – Осциллограммы исходных показаний датчика ускорений вальца катка AP2099-100 и с применением цифровой фильтрации сигнала
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – An oscillograms of the initial readings of the acceleration sensor of the roller AP2099-100 and using digital signal filtering
Source: compiled by the authors.

Анализ показаний датчиков показывает наличие в них значительных шумов, существенно затрудняющих определение амплитудных значений сигналов (рисунок 4). Поэтому применялась технология цифровой фильтрации сигналов датчиков. На рисунке 4 приведен пример результатов обработки исходного сигнала датчика виброускорений с использованием фильтров низкой частоты. Верхняя осциллограмма (см. рисунок 4) показывает сигнал, получаемый с датчика AP2099-100. Можно заметить, что на сигнал накладываются искажающие шумы. Источниками искажений могут являться различные узлы механизмов и систем катка, а также электрические помехи на записывающее оборудование. Из опыта прошлых исследований [13,14] было принято решение для цифровой обработки сигнала использовать фильтр низких частот с граничной частотой 200 Гц в составе инструмента «Формула» программного комплекса ZETLAB ANALIZ. На представленном рисунке (см. рисунок 4) нижняя осциллограмма показывает результат фильтрации исходного сигнала.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе экспериментальных исследований работы выполнялись на двух участках с одинаковым видом грунта. На участке №1 выполнялись работы во время затяжного дождя и на переувлажнённом грунте, а на участке №2 на грунте с влажностью, близкой к оптимальной.

Данный анализ показал волнообразный характер изменения динамического модуля деформации грунта E_{vd} на участке №2 (рисунок 5). Выявлено, что меньшие значения E_{vd} наблюдались посередине следа вальца катка, а у краёв значения возрастали. Данное явление может быть объяснено дополнительным уплотнением от пневмоколес катка.

На участке №1 значения модуля деформации грунта E_{vd} оказались значительно меньше и в течение всех проходов практически не возрастали (см. рисунок 5). Связано это с тем, что когда грунт переувлажнен, уплотнение не осуществляется. Результаты измерений вертикальных перемещений вибровальца катка НАММ 3411 в процессе установившихся колебаний на участке №1 приведены на рисунке 6.

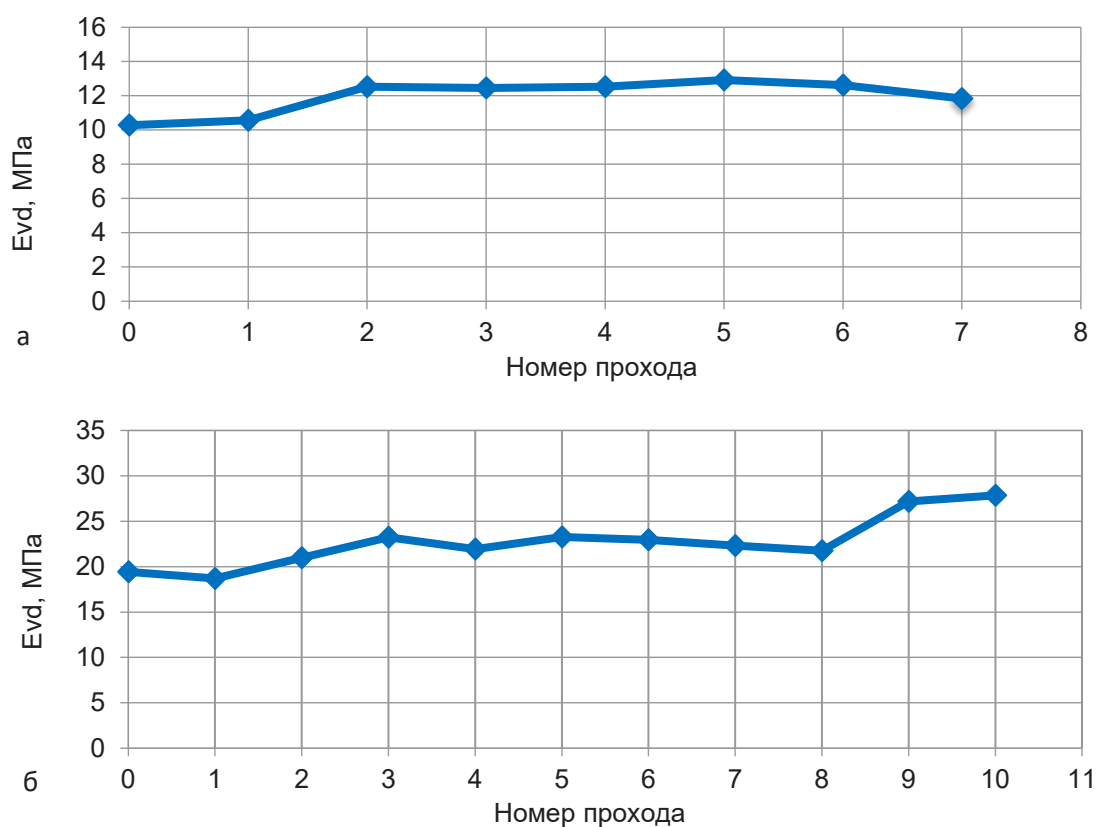


Рисунок 5 – Графики изменения динамического модуля деформации грунта E_{vd} по проходам катка HAMM 3411: а – на участке №1; б – на участке №2
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Graphs of changes in the dynamic modulus of soil deformation E_{vd} along the passages of the HAMM 3411 skating rink: а – on site No. 1; б – on site No. 2
Source: compiled by the authors.

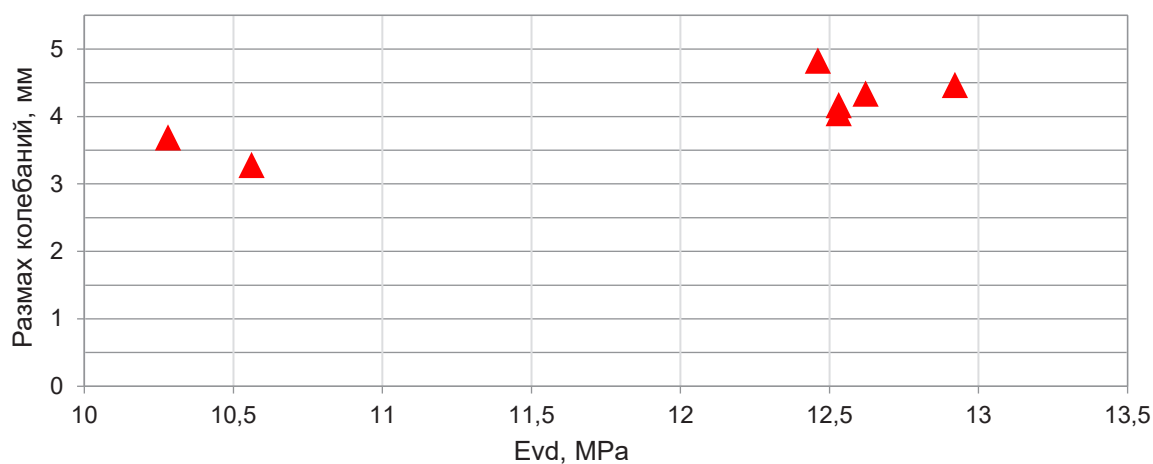


Рисунок 6 – Результаты измерения размаха вертикальных колебаний вальца катка HAMM 3411 в процессе установившейся вибрации при уплотнении грунта участка №1
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – The results of measuring the range of vertical vibrations of HAMM 3411 roller in the process of steady-state vibration during soil compaction in section No. 1
Source: compiled by the authors.

Результаты измерений вертикальных ускорений вибровальца и вертикальных ускорений рамы катка HAMM 3411 в процессе уплот-

нения грунта на участке №1, при движении с установившейся вибрацией, приведены на рисунках 7, 8.

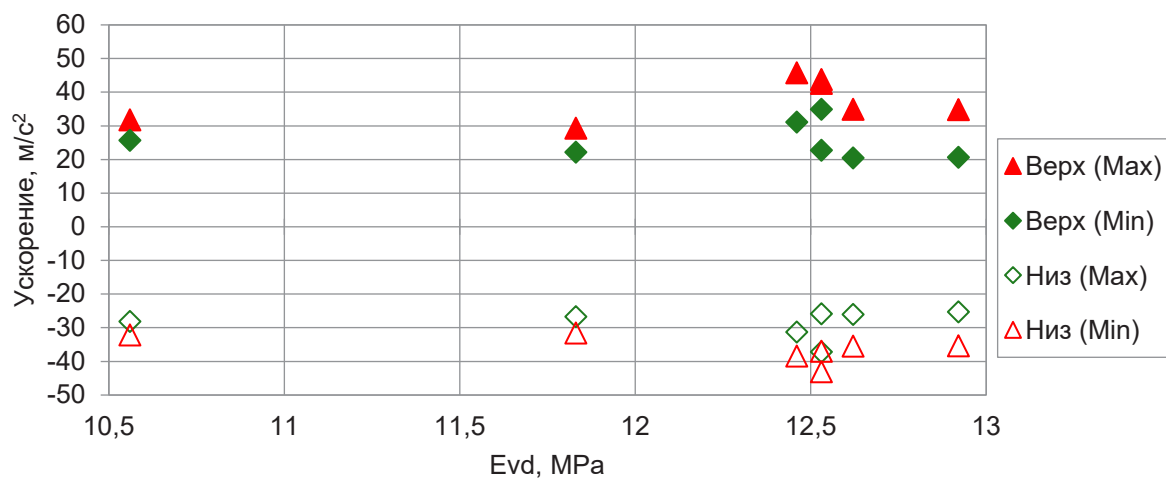


Рисунок 7 – Результаты измерений амплитудных значений вертикальных ускорений вибровальца катка HAMM 3411 в процессе установившейся вибрации при уплотнении участка №1
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – The results of measurements of the amplitude values of vertical accelerations of the vibrating roller of HAMM 3411 roller in the process of steady vibration during the compaction of section No. 1
Source: compiled by the authors.

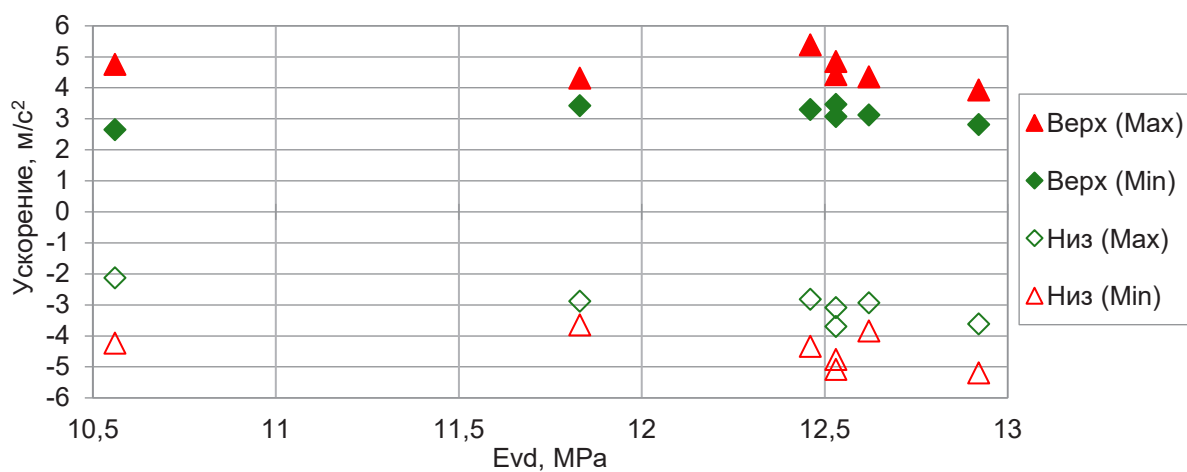


Рисунок 8 – Результаты измерений амплитудных значений вертикальных ускорений рамы вальца катка HAMM 3411 в процессе установившейся вибрации при уплотнении на участке №1
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Results of measurements of the amplitude values of vertical accelerations of the roller frame of HAMM 3411 roller in the process of steady vibration during compaction in section No. 1
Source: compiled by the authors.

Результаты измерений вертикальных ускорений вибровальца и вертикальных ускорений рамы катка HAMM 3411 в процессе уплот-

нения грунта на участке №2, при движении с установившейся вибрацией, приведены на рисунках 9, 10.

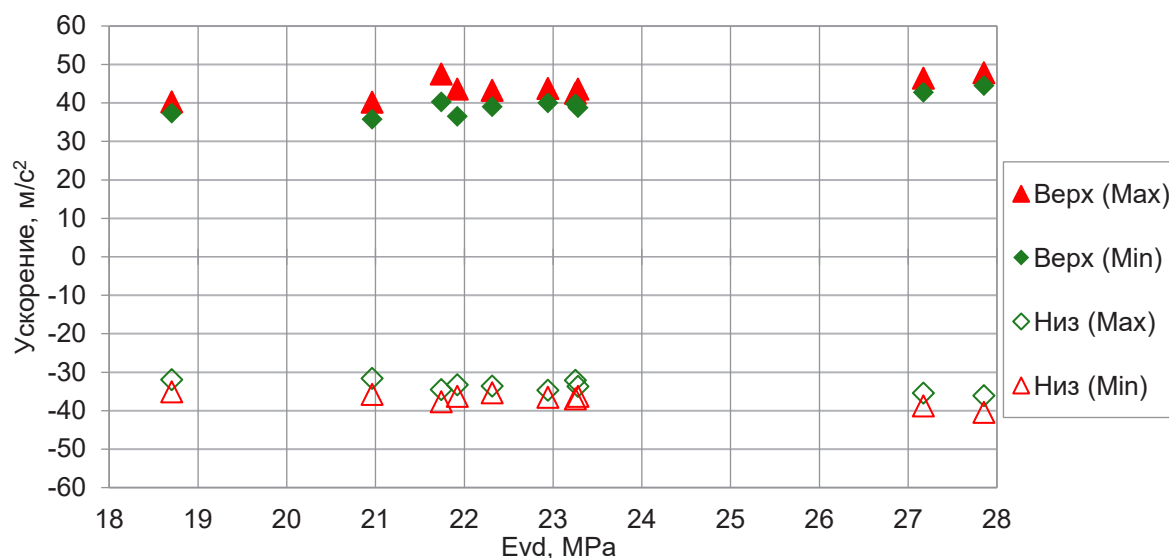


Рисунок 9 – Результаты измерений амплитудных значений вертикальных ускорений вибровального вальца катка HAMM 3411 в процессе установившейся вибрации при уплотнении участка №2
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – The results of measurements of the amplitude values of vertical accelerations of HAMM 3411 vibrating roller in the process of steady vibration during compaction of section No. 2
Source: compiled by the authors.

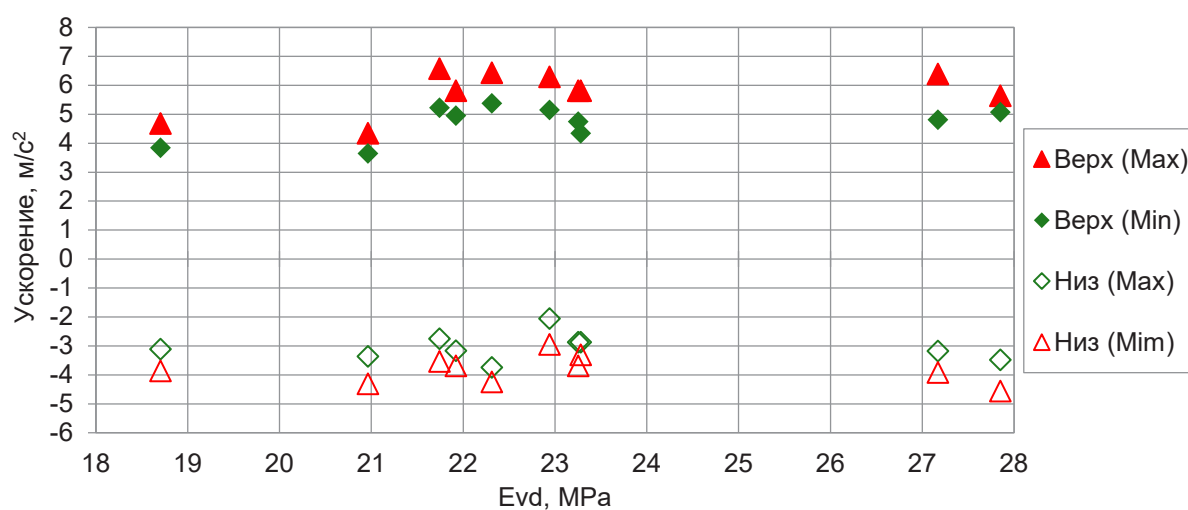


Рисунок 10 – Результаты измерений амплитудных значений вертикальных ускорений рамы вальца катка HAMM 3411 в процессе установившейся вибрации при уплотнении участка №2
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – The results of measurements of the amplitude values of vertical accelerations of the roller frame of the HAMM 3411 roller in the process of steady vibration during compaction of section No. 2
Source: compiled by the authors.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что размах колебаний и амплитудные значения вертикальных ускорений вибрационного вальца и рамы вальца незначительно возрастают при увеличении модуля деформации грунта E_{vd} . Результаты проведенного эксперимента коррелируются с исследованиями проводимых на других моделях катков [14, 15].

При измерении значений E_{vd} в одном перечнике разница между измеренными значениями по оси движения катка и на следе от пневмоколеса могла достигать 30%, поэтому в дальнейших исследованиях целесообразно значения E_{vd} измерять не на следе от пневмоколеса катка. Дополнительное уплотнение грунта пневмоколесами будет в этом случае работать в запас несущей способности грунта.

Динамический модуль деформации грунта при переувлажненном грунте находился в диапазоне $E_{vd} = 10...13$ МПа, а при грунте оптимальной влажности $E_{vd} = 18...28$ МПа. Размах вертикальных перемещений вибрационного вальца при уплотнении переувлажненного грунта составил 3,3...4,8 мм. Вертикальные ускорения вибрационного вальца при уплотнении переувлажненного грунта находились в диапазоне от +20...+45 до -25...-43 м/с², а у оптимального влажного грунта +36...+48 до -35...-40 м/с². При уплотнении переувлажненного грунта вертикальные ускорения рамы вальца находятся в диапазоне от +2,5...+5 до -2...-5 м/с², а у оптимального влажного грунта +3,5...+6 до -2...-4,5 м/с².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При анализе полученных результатов необходимо учитывать, что в эксперименте фактическая частота колебаний составила 18 Гц, а не 27 Гц, как заявлено в технических характеристиках катка НАММ 3411. При таком снижении частоты, вынуждающая сила колебаний уменьшится приблизительно 2,25 раза. В последующих работах целесообразно перед экспериментом сначала убедиться, что машина исправна и работает на заданных частотах колебаний вальца, и только после этого проводить эксперимент.

Полученные результаты могут быть использованы для верификации математической модели взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым грунтом и при проведении экс-

периментальных исследований аналогичного характера.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Костельов М. П. Опять о качестве и эффективности уплотнения различных грунтов современными виброкатками // Каталог-справочник «Дорожная техника и технологии». 2008. С. 12–19.
2. Тюремнов И. С., Игнатьев А. А. О совершенствовании критериев уплотнения дорожно-строительных материалов // Автомобильные дороги. 2010. № 5. С. 67–69.
3. Dobrescu C. The Dynamic Response of the Vibrating Compactor Roller, Depending on the Viscoelastic Properties of the Soil // Applied System Innovation. 2020. Т. 3. №. 2. С. 25.
4. Шабанова Г. И., Савельев С. В., Бурый Г. Г. Математическое описание колебательной системы «вибрационный рабочий орган – грунт» // Вестник СибАДИ. 2013. № 3 (31). С. 101–207.
5. Тюремнов И. С., Игнатов А. А. Математическая модель процесса уплотнения грунта вибрационным катком в режиме постоянного контакта // Современное машиностроение. Наука и образование. 2017. № 6. С. 794–803. DOI 10.1872/MMF-2017-71. EDNYSZWPP.
6. Kenneally B., Musimbi O. M., Wang J., Mooney M. A. Finite element analysis of vibratory roller response on layered soil systems Comput. Geotech. 2015. 67. pp. 73–82
7. Saberi M., C.-D. Annan, J.-M. Konrad Three-dimensional constitutive model for cyclic behavior of soil-structure interfaces. Soil Dyn. Earthq Eng. Times, 134 (2020), Article 106162
8. Fathi A., C. Tirado, S. Rocha, M. Mazari, S. Nazarian Assessing depth of influence of intelligent compaction rollers by integrating laboratory testing and field measurements Transp. Geotech., 28 (2021), Article 100509
9. Facas N.W., van Susante P.J., Mooney M.A. Influence of rocking motion on vibratory roller-based measurement of soil stiffness // Journal of engineering mechanics (American Society of Civil Engineers). 2010. 136 (7). pp. 898–905.
10. Савельев С.В., Бурый Г.Г. Экспериментальные исследования «активной области» деформируемой среды при вибрационном уплотнении // Вестник СибАДИ. 2012. № 5 (27). С. 88–94.
11. Q. Xu, G.K. Chang, V.L. Gallivan Development of a systematic method for intelligent compaction data analysis and management Construct. Build. Mater., 37 (2012), pp. 470–480.
12. Liu D.H., Li, Z.L., Lian, Z.H.: Compaction quality assessment of earth-rock dam materials using roller integrated compaction monitoring technology. Automat. Constr. 44, 234–246. (2014).
13. Han, Yixuan et al. "Study on Intelligent Compaction-Equipment Logistics Scheduling and Propagation Characteristics of Vibration Wave in

Nonlinear Systems with Multistability Based on Field Test." *Complex*. 2020 (2020).

14. Тюремнов И. С., Иванов С. Н., Краюшкин А. С. Результаты экспериментальных исследований ускорений колебаний вибровальца катка DM-617 с использованием технологии цифровой обработки сигнала // Вестник СибАДИ. 2020. Т. 17, № 2(72). С. 182–195. DOI 10.26518/2071-7296-2020-17-2-182-195.

15. T. Pei, X. Yang Compaction-induced stress in geosynthetic-reinforced granular base course—A discrete element model. *J. Rock Mech. GeotechEng. Times*, 10 (4) (2018), pp. 669-677.

REFERENCES

1. Kostel'ov M. P. Opjat' o kachestve i effektivnosti uplotneniya razlichnykh gruntov sovremennymi vibrokatkami [Again about the quality and efficiency of compaction of various soils with modern vibratory rollers]. *Katalog-spravochnik «Dorozhnaya tekhnika i tekhnologii»*. 2008:12-19. (In Russ.).

2. Tyuremnov I. S., Ignat'ev A. A. O sovershenstvovani ikriteriev uplotneniya dorozhno-stroitel'nykh materialov [On improving the criteria for compaction of road-building materials]. *Avtomobil'nye dorogi*. 2010; 5: 67- 69. (in Russ.).

3. Dobrescu C. The Dynamic Response of the Vibrating Compactor Roller, Depending on the Viscoelastic Properties of the Soil. *Applied System Innovation*. 2020; T. 3. №. 2: 25.

4. Shabanova G. I., Savel'ev S. V., Buryj G. G. Matematicheskoe opisanie kolebatel'noy sistemy «vibratsionnyy rabochiy organ – grunt» [Mathematical description of the oscillatory system "vibrating working organ – ground"]. *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-dorozhnoy akademii*. 2013; 3 (31):1–01207. (in Russ.).

5. Tyuremnov I. S., Ignat'ev A. A. Matematicheskaya model' processa uplotneniya grunta vibratsionnym katkom v rezhime postojannogo kontakta [Mathematical model of the process of compaction of soil by a vibrating roller in the mode of constant contact]. *Sovremennoe mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye*. 2017; 6: 794-803. DOI 10.1872/MMF-2017-71. EDN YSZWPP.

6. Kenneally B., Musimbi O. M., J. Wang, M.A. Mooney Finite element analysis of vibratory roller response on layered soil systems *Comput. Geotech.*, 67 (2015). pp. 73-82.

7. M. Saberi, C.-D. Annan, J.-M. Konrad Three-dimensional constitutive model for cyclic behavior of soil-structure interfaces. *Soil Dyn. Earthq Eng. Times*, 134 (2020), Article 106162.

8. Fathi C. Tirado, S. Rocha, M. Mazari, S. Nazarian Assessing depth of influence of intelligent compaction rollers by integrating laboratory testing and field measurements *Transp. Geotech.*, 28 (2021), Article 100509.

9. Facas N.W., van Susante P.J., Mooney M.A. Influence of rocking motion on vibratory roller-based measurement of soil stiffness. *Journal of engineering mechanics (American Society of Civil Engineers)*. 2010; 136 (7): 898–905.

10. Savel'ev S. V., Buryj G. G. Jeksperimental'nye issledovaniya «aktivnoy oblasti» deformiruemoj sredy pri vibratsionnom uplotnenii [Experimental studies of the "active region" of a deformable medium under vibration compaction]. *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-dorozhnoy akademii*. 2012; 5 (27):88–94. (In Russ.).

11. Q. Xu, G.K. Chang, V.L. Gallivan Development of a systematic method for intelligent compaction data analysis and management *Construct. Build. Mater.*, 37 (2012), pp. 470-480.

12. Liu, D.H., Li, Z.L., Lian, Z.H.: Compaction quality assessment of earth-rock dam materials using roller integrated compaction monitoring technology. *Automat. Constr.* 44, 234–246. (2014).

13. Han, Yixuan et al. "Study on Intelligent Compaction-Equipment Logistics Scheduling and Propagation Characteristics of Vibration Wave in Nonlinear Systems with Multistability Based on Field Test." *Complex*. 2020 (2020).

14. Tyuremnov I.S., Ivanov S.N., Kraiushkin A.S. Results of experimental studies of accelerations of the dm-617 vibratory roller using digital signal processing technology. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020;17(2):182-195. (In Russ.).

15. T. Pei, X. Yang Compaction-induced stress in geosynthetic-reinforced granular base course—A discrete element model. *J. Rock Mech. Geotech Eng. Times*. 10 (4) (2018): 669-677.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Тюремнов И. С. Общая организация работы авторского коллектива, формулирование цели и задач исследования, разработка методики проведения исследования, организация и проведение экспериментальных исследований, написание текста статьи.

Краюшкин А. С. Обработка экспериментальных данных, подготовка материала для статьи.

Шорохов Д. А. Обработка экспериментальных данных, подготовка материала для статьи.

COAUTHOR'S CONTRIBUTION

Ivan S. Tyuremnov— general organization of work of the author 's team, formulation of the purpose and objectives of the study, formulation of the purpose and objectives of the exploration, organization and carrying out of the experimental exploration, writing the text of article.

Arseniy S. Krayushkin— processing the experimental findings, preparing material for the paper.

Dmitry A. Shorohov— processing the experimental findings, preparing material for the paper.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тюремнов Иван Сергеевич – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины».

Краюшкин Арсений Сергеевич – ассистент кафедры «Строительные и дорожные машины».

Шорохов Дмитрий Александрович – студент кафедры «Строительные и дорожные машины».

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Ivan S. Tyuremnov – Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Construction and Road Machines Department.

Arseniy S. Krayushkin – Assistant of the Construction and Road Machines Department.

Dmitry A. Shorohov – Student of the Construction and Road Machines Department.

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

УДК 621.43
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-842-857>
EDN: WWGTJJ
Научная статья



ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ФОРСУНОК С ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

А. П. Жигадло, Ю. П. Макушев*

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

ap_zhigadlo@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8883-3167>

makushev321@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6043-8624>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время часть дизельных двигателей автомобилей КамАЗ-740 работают с топливной аппаратурой, у которой форсунки имеют гидромеханическое управление. Основным их недостатком является низкое давление топлива перед сопловыми отверстиями (менее 60 МПа) и отсутствие управления подачей топлива.

Применение форсунок с электрогидравлическим управлением (ЭГУ) позволяет повысить давление в полости форсунки до 250 МПа и управлять процессом впрыска топлива. Недостатком форсунок с ЭГУ является сложность конструкции клапана управления, трудность его регулирования и кодирования. Объектом исследования являются форсунки дизеля КамАЗ -740 с электрогидравлическим управлением хода иглы распылителя.

Целью данной работы является выполнение теоретических исследований и совершенствование методики технического обслуживания форсунок с электрогидравлическим управлением (регулирование клапана управления и кодирование), что позволит повысить их надежность, долговечность и обеспечит снижение расхода топлива дизелей.

Методика исследования. Исследования клапана управления форсункой являются теоретическими, расчетными. В работе предложена методика расчета и выполнены теоретические исследования влияния давления (50–250 МПа) на величину эффективного проходного сечения и диаметра сопловых отверстий распылителя.

Для форсунок с ЭГУ уточнена методика регулирования клапана управления, которая заключается в том, что в начале регулирования выполняется расчет главной силы, действующий на шарик со стороны максимального давления в камере управления (например, 200 МПа), равной 76 Н (рисунок 4). Затем определяется необходимая сила пружины 100 Н (больше на 20–40%, рисунок 5). Далее оценивается сила электромагнита 140 Н (больше на 20–40% силы пружины, рисунок 6).

Результаты теоретических исследований. Представлены результаты расчетных (теоретических) исследований эффективного проходного сечения распылителя и диаметра сопловых отверстий в зависимости от величины давления P перед сопловыми отверстиями.

В работе определены. 1. Силы, действующие на шарик (57–105 Н) в зависимости от величины давления в камере управления (150–275 МПа). 2. Силы пружины (40–140 Н) жесткостью 40 Н/мм в зависимости от ее сжатия до 3,5 мм. 3. Силы электромагнита (140–20 Н) в зависимости от зазора между якорем и сердечником (0,2–0,5 мм).

Рассмотрен способ восстановления требуемой (паспортной) цикловой подачи топлива при ее изменении в результате замены клапана управления или его регулировки. Приведены расчетные значения подачи топлива за цикл (мм³/цикл) от времени активации.

Закключение. Результаты исследования предназначены для организаций и предприятий, занимающихся диагностикой, восстановлением, регулировкой и кодированием форсунок с электрогидравлическим управлением хода иглы распылителей.

Результаты расчетных исследований могут быть использованы для уточнения методики технического обслуживания топливных систем с электронным управлением (Common Rail).

© Жигадло А. П., Макушев Ю. П., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: теоретические исследования, форсунка с электрогидравлическим управлением, методика, техническое обслуживание, регулирование, давление, герметичность, клапан управления, электромагнит, кодирование.

Статья поступила в редакцию 02.11.2022; одобрена после рецензирования 08.12.2022; принята к публикации 19.12.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Жигadlo А. П., Макушев Ю. П. Теоретические исследования и техническое обслуживание форсунок с электрогидравлическим управлением // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 6 (88). С. 842-857. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-842-857>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-842-857>

EDN: WWGTJJ

THEORETICAL RESEARCH AND MAINTENANCE OF ELECTRO HYDRAULICALLY CONTROLLED INJECTORS

Aleksandr P. Zhigadlo, Yuri P. Makushev*

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)

Omsk, Russia

ap_zhigadlo@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8883-3167>

makushev321@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6043-8624>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Nowadays the part of the diesel engines for KamAZ-740 cars are operated with fuel equipment, in which the injectors have hydro mechanical control. Their main disadvantage is the low fuel pressure in front of the injector openings (less than 60 MPa) and the lack of fuel supply control.

The use of injectors with electro hydraulic control (EHC) increases the pressure in the injector cavity up to 250 MPa and control the fuel injection process. The disadvantage of the injectors with EHC is a structural complexity of a control valve, the difficulty of its regulation and coding. The object of the study is the injectors of KamAZ-740 diesel engine with electro hydraulic control of the atomizer needle stroke.

The purpose of this work is to carry out theoretical research and improve the methods of maintenance of injectors with electro hydraulic control (control valve regulation and coding), which will increase their reliability, durability and ensure a reduction in diesel fuel consumption.

Research methods. The study of the nozzle control valve is theoretical and calculated. The paper proposes a calculation method and performs theoretical studies for the influence of pressure (50 – 250 MPa) on the value of the effective flow section and the diameter of the nozzle holes of the sprayer.

For the injectors with EHC, the control valve regulation procedure has been clarified, which consists in the fact that at the beginning of regulation, the main force acting on the ball from the side of the maximum pressure in the control chamber (for example, 200 MPa) equal to 76 N is calculated (see Figure 4). Then the required spring force of 100 N is determined (20-40% more, see Figure 5). Next, the strength of the electromagnet is estimated at 140 N (20 – 40% more of the spring force, see Figure 6).

The results of theoretical research. The results of computational (theoretical) studies for the effective flow section of the sprayer and the diameter of the nozzle holes, depending on the pressure P in front of the nozzle holes, are presented.

The paper defines. 1. The forces acting on the ball (57 – 105 N) depending on the pressure in the control chamber (150 – 275 MPa). 2. Spring forces (40 – 140 N) with a stiffness of 40 N/mm, depending on its compression up to 3.5 mm. 3. The forces of the electromagnet (140 – 20 N) depending on the gap between the anchor and the core (0.2 – 0.5 mm).

The method of restoring the required (rated) cyclic fuel supply when it changes as a result of replacing the control valve or adjusting is considered. The calculated values of fuel supply per cycle (mm³/cycle) from the activation time are given.

© Zhigadlo A. P., Makushev Y. P., 2022



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

Conclusion. The results of the study are intended for organizations and enterprises engaged in diagnostics, restoration, adjustment and coding of injectors with electro hydraulic control for the needle stroke of sprayers. The results of computational studies can be used to refine the methodology of maintenance of fuel systems with electronic control (Common Rail).

KEYWORDS: theoretical research, electro hydraulic controlled injectors, methodology, maintenance, regulation, pressure, tightness, control valve, electromagnet, coding.

The article was submitted 02.11.2022; approved after reviewing 08.12.2022; accepted for publication 19.12.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Aleksandr P. Zhigadlo, Yuri P. Makushev. Theoretical research and maintenance of electro hydraulically controlled injectors. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (6): 842-857. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-842-857>

ВВЕДЕНИЕ

Система питания дизельного двигателя топливом является главной, от ее технического состояния зависит надежность, долговечность, экономичность и токсичность отработавших газов. Техничко-экономические показатели дизеля, токсичность отработавших газов зависят в основном от способа смесеобразования, совершенства топливной аппаратуры, ее состояния и регулировки¹.

Система питания дизеля топливом в общем случае состоит из подкачивающего насоса, насоса высокого давления, трубопроводов и форсунок. К топливным системам предъявляются высокие требования, которые заключаются в следующем:

- дозировать порции топлива в соответствии с нагрузочными и скоростными режимами работы дизеля;
- обеспечивать равное количество дизельного топлива по отдельным цилиндрам;
- обеспечивать высокое давление дизельного топлива, необходимую мелкоствольность распыливания и дальноточность;
- соотношение распыленного топлива и поступившего воздуха в цилиндр двигателя должно быть оптимальным, при котором обеспечивается его полное сгорание при минимальной токсичности отработавших газов;
- обеспечивать стабильность регулировочных и конструктивных параметров насоса и форсунок в течение длительного периода эксплуатации.

Эффективность эксплуатации, надежности и долговечности работы топливной аппаратуры зависит от качества диагностирования, технического обслуживания, восстановления, регулировки и ремонта.

По конструктивному исполнению форсунки могут быть с механическим и электронным управлением. В настоящее время часть дизельных двигателей автомобилей КамАЗ-740 работают с топливной аппаратурой, у которой форсунки имеют гидромеханическое управление.

На рисунке 1 показан разрез форсунки дизеля КамАЗ-740 с гидромеханическим управлением хода иглы. Преимуществом данных форсунок является простота конструкции. Основным недостатком их является низкое давление топлива перед сопловыми отверстиями (менее 60 МПа) и отсутствие управления подачей топлива. Повысить давление топлива возможно путем увеличения силы пружины форсунки, но это приведет к росту контактных напряжений и разрушению посадочного конуса иглы и запорного конуса корпуса распылителя² [1]. Применение в насосах высокого давления кулачков вогнутого профиля увеличивает скорость толкателя плунжера на 50% [2] по сравнению с кулачками выпуклого и тангенциального профиля, но это не позволит существенно повысить давление топлива.

Главным регулировочным параметром форсунки с механическим управлением является давление начала открытия иглы, величина

¹ Макушев Ю. П. Системы подачи топлива и воздуха дизелей: учебное пособие / Ю. П. Макушев, А. П. Жигadlo, Л. Ю. Волкова. Омск: СибАДИ, 2017. 208 с.

² Расчёт контактных напряжений в посадочном конусе распылителей форсунок дизелей /Л. Ю. Волкова, Ю. П. Макушев, Р. Ф. Салихов, Т. А. Полякова // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: Материалы XI-й Международной научно-технической конференции, Омск, 24–27 февраля 2021 года / Редколлегия: В. А. Лихолобов [и др.]. Омск: Омский государственный технический университет, 2021. С. 194–195.

ну которого устанавливают на специальном стенде.

В процессе длительной эксплуатации дизеля давление открытия иглы уменьшается в результате износа контактных поверхностей, что ухудшает его технико-экономические параметры и требует регулярного контроля, регулирования и восстановления распылителей³ [3].

Все распылители для конкретного двигателя должны иметь одинаковое давление начала открытия иглы, эффективное проходное сечение, ход иглы и необходимую гидравлическую плотность посадочного конуса распылителя. Углы расположения сопловых отверстий в плане и шатре должны соответствовать техническим условиям. Если комплект распылителей для двигателя будет иметь различные параметры, то подача топлива по отдельным цилиндрам будет неравномерной [4] и это может привести к ухудшению его технико-экономических показателей.

При замене форсунок с механическим управлением на электрогидравлическое управление повышается давление впрыскиваемого топлива (до 250 МПа), впрыск топлива становится управляемым (например, двухфазным), неравномерность подачи топлива резко снижается. Поэтому в настоящее время применяют системы подачи топлива с электронным управлением, которые способны обеспечить высокое давление и управлять процессом впрыска топлива.

Техническое обслуживание форсунок с электрогидравлическим управлением хода иглы требует сложное электронное оборудование и квалифицированных специалистов. На рисунке 2 показан разрез форсунки с электрогидравлическим управлением^{4,5} [5, 6].

Сила пружины 17 через якорь 13 действует на клапан (шарик) 12, закрывая жиклёр 11 диаметром 0,2–0,3 мм. Максимальный ход шарика диаметром, равным 1,3–1,6 мм, зависит от конструкции форсунок, может быть равен от 0,04 до 0,06 мм.

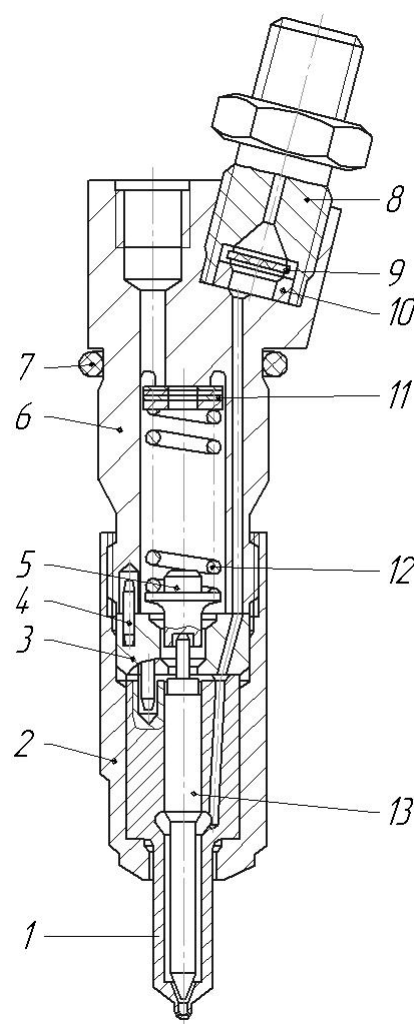


Рисунок 1 – Форсунка дизеля КамАЗ-740:

- 1 – корпус распылителя;
- 2 – гайка; 3 – проставка; 4 – штифт установочный;
- 5 – штанга укороченная; 6 – корпус форсунки;
- 7 – кольцо уплотнительное; 8 – штуцер;
- 9 – фильтр сетчатый;
- 10 – прокладка уплотнительная;
- 11 – регулировочные прокладки;
- 12 – пружина; 13 – игла диаметром 5 мм

Источник: составлено авторами.

Figure 1 – KamAZ-740 diesel nozzle: 1 – spray body; 2 – nut; 3 – spacer; 4 – mounting pin; 5 – shortened rod; 6 – nozzle body; 7 – sealing ring; 8 – fitting; 9 – mesh filter; 10 – sealing gasket; 11 – adjusting gaskets; 12 – spring; 13 – needle with a diameter of 5 mm

Source: compiled by the authors.

³ Макушев Ю. П. Диагностика форсунок дизелей, их регулировка и восстановление / Ю. П. Макушев, Л. Ю. Михайлова // Актуальные проблемы создания, проектирования и эксплуатации современных двигателей внутреннего сгорания: сб. науч. тр. / под ред. проф. В. А. Лашко. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2012. Вып. 5. С. 125–132.

⁴ Конструктивные особенности систем подачи топлива современных дизелей: учебное пособие / Ю. П. Макушев, А. П. Жигadlo, Л. Ю. Волкова. Омск: СибАДИ, 2020. 201 с.

⁵ Якимов И. В. Метод диагностики электрогидравлических форсунок автомобилей с дизельными двигателями по параметрам давления и расхода топлива в общей обратной магистрали: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.22.10 / Якимов Игорь Владимирович. Иркутск, 2020. 20 с.

Рассмотрим принцип действия клапана управления⁶ [7], когда сливное отверстие 11 закрыто шариком 12. Из аккумулятора через штуцер 22 топливо входит в форсунку под давлением, например, 200 МПа. Через каналы 23 и 24 топливо под одинаковым давлением поступает в камеру управления и в полость под иглой 2. Диаметр управляющего поршня 10 больше на 0,2–0,4 мм, чем диаметр иглы 2. Сила, возникающая на торце поршня, будет больше, чем со стороны дифференциальной площадки иглы 2, и она, двигаясь к запорному конусу, закроет сопловые отверстия распылителя.

При подаче напряжения в катушке электромагнита в ней создается магнитное поле, под действием которого якорь 13 притянется к сердечнику 18. Шариковый клапан 12 откроется под действием давления топлива, и через сливное отверстие 11 из объема камеры управления будет вытекать топливо, резко снижая давление над поршнем 10. Сила над поршнем станет меньше, чем сила со стороны иглы.

Игла распылителя 2 под действием высокого постоянного давления (200 МПа) переместится вверх, откроет сопловые отверстия и начнется подача топлива. Продолжительность подачи топлива и цикловая подача зависят от длительности сигнала (напряжения), подаваемого на катушку 16. При отключении напряжения магнитное поле катушки убывает, а пружина якоря 17, разжимаясь, переместит клапан 12, закрывая сливное отверстие 11.

В процессе длительной эксплуатации топливной аппаратуры дизелей параметры распылителей изменяются и могут достичь значений, при которых их техническое состояние считается «допустимым» или «отказом». При техническом обслуживании (диагностирование, регулирование) важно знать, что параметр распылителя может находиться в исправном, предельном, неисправном состоянии или в состоянии отказа. Максимальный ход иглы и эффективное проходное сечение распылителя определяется при помощи специального устройства и стенда, описание которых дано в работе⁷. Распылитель с потерей подвижности иглы (заклиниванием) считается аварийным и заменяется новым. Зажемление иглы 2 может быть в результате температурной деформации

корпуса распылителя 1 или наличия в зазоре между иглой корпусом распылителя (2–4 мкм) твердых частиц. Образование кокса в сопловых отверстиях распылителя может произойти в результате потери подвижности иглы и проникновения в его полость горячих газов из цилиндра. Закоксовывание сопловых отверстий приводит к уменьшению их проходного сечения и нарушению процесса подачи топлива. Если эффективное проходное сечение распылителя в результате образования кокса или износа уменьшилось или увеличилось на 15%, то его необходимо заменить.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ПРОХОДНОГО СЕЧЕНИЯ РАСПЫЛИТЕЛЯ

Разделим конструкцию форсунки условно на две основные части. Первой частью является зона распылителя, в которой давление постоянно и равно давлению в аккумуляторе (например, 200 МПа), а второй – клапан управления. Для распылителя важным является расчетное или экспериментальное определение эффективного проходного сечения и диаметра сопловых отверстий.

Определим расчетным путем суммарное значение проходного сечения сопловых отверстий распылителя, их число и диаметр для подачи топлива в КС дизеля КамАЗ-740. 60-360 мощностью 360 л с или 265 кВт при частоте вращения вала двигателя 1900 мин⁻¹. Среднее давление перед сопловыми отверстиями принимаем 200 МПа, а плотность топлива – 850 кг/м³.

1. В начале расчета определим цикловую подачу топлива (см³/цикл) для режима номинальной мощности из выражения

$$q_u = \frac{G_u}{i \cdot n_n \cdot 60 \cdot \rho_t}, \quad (1)$$

где G_u – часовой расход топлива, г/ч, равный $q_e \cdot N_e$; q_e – удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч); N_e – эффективная номинальная мощность, кВт; i – число цилиндров; n_n – частота вращения вала насоса, мин⁻¹; ρ_t – плотность топлива.

⁶ Конструктивные особенности систем подачи топлива современных дизелей: учебное пособие. Там же.

⁷ Макушев Ю.П. Системы подачи топлива и воздуха дизелей: учебное пособие / Ю.П. Макушев, А.П. Жигадло, Л.Ю. Волкова. Омск: СибАДИ, 2017. 208 с.

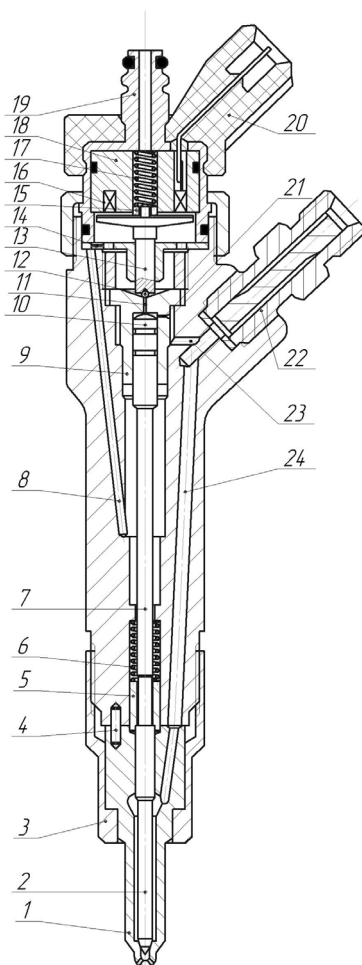


Рисунок 2 – Форсунка с электрогидравлическим управлением:

- 1 – корпус распылителя; 2 – игла распылителя диаметром 4 мм; 3 – гайка;
 4 – штифт; 5 – втулка направляющая; 6 – пружина;
 7 – шток; 8 – канал отвода утечек;
 9 – втулка с посадочным седлом; 10 – поршень управляющий; 11 – сливное отверстие ($d_2 = 0,26$ мм);
 12 – шариковый запорный клапан;
 13 – якорь электромагнита;
 14 – отверстие для отвода утечек топлива;
 15 – втулка; 16 – катушка электромагнита;
 17 – пружина якоря; 18 – сердечник электромагнита;
 19 – штуцер для отвода утечек;
 20 – разъем питания катушки электромагнита;
 21 – жиклёр впускной; 22 – штуцер с фильтром;
 23 и 24 – каналы

Источник: составлено авторами.

- Figure 2 – Electro hydraulically controlled injector:
 1 – spray body; 2 – spray needle with a diameter of 4 mm;
 3 – nut; 4 – pin; 5 – guide bushing; 6 – spring; 7 – stock;
 8 – leakage drain channel; 9 – bushing with landing seat;
 10 – control piston; 11 – drain hole ($d_2 = 0.26$ mm);
 12 – ball locking valve; 13 – armature of the electromagnet;
 14 – fuel leak outlet; 15 – bushing; 16 – electromagnet coil;
 17 – anchor spring; 18 – electromagnet core;
 19 – drain fitting;
 20 – the power connector of the electromagnet coil;
 21 – intake jet; 22 – fitting with filter; 23 and 24 – channels

Source: compiled by the authors.

Для дизеля КамАЗ-740. 60-360 при $q_e = 220$ г/(кВт·ч), $N_e = 265$ кВт, $i = 8$, $n_n = 950$ мин $\rho_t = 0,85$ г/см³, расчетная величина $q_{ц} = 0,150$ см³/цикл или 150 мм³/цикл.

2. Для оценки расчетного значения μF определим действительную скорость истечения дизельного топлива через сопловые отверстия

$$g_d = \varphi \sqrt{2 \cdot \Delta P / \rho_t} \quad \text{м/с}, \quad (2)$$

где ΔP – средний перепад давления топлива перед сопловыми отверстиями, Н/м²; φ – коэффициент скорости, 0,8–0,9.

$$g_d = 0,85 \sqrt{2 \cdot 2000 \cdot 10^5 / 850} = 580 \text{ м/с}.$$

3. Расход топлива объемный Q , м³/с, определяется по формуле

$$Q = \mu F \cdot g_d, \quad (3)$$

где μF – эффективное проходное сечение распылителя, м².

4. Расход топлива объемный за цикл, мм³/с, можем определить и по величине цикловой подачи $q_{ц}$, поданной в КС за время впрыска t :

$$Q = q_{ц} / t. \quad (4)$$

5. Зная продолжительность впрыска φ_v в градусах (например, 10°), частоту вращения вала насоса n_n в мин⁻¹, время впрыска топлива через сопловые отверстия распылителя определим по формуле

$$\tau = \frac{\varphi_v}{6 \cdot n_n} = \frac{10}{6 \cdot 950} = 0,00175 \text{ с}. \quad (5)$$

6. Значение объемного расхода топлива через распылитель составит $Q = 150 / 0,00175 = 85714$ мм³/с = 0,000857 м³/с, откуда

$$\mu F = 0,000857 / 580 = 0,0000026 \text{ м}^2 = 0,15 \text{ мм}^2. \quad (6)$$

7. При коэффициенте расхода, равном 0,8, суммарная площадь сопловых отверстий составит 0,187 мм². При числе сопловых отверстий 5 площадь сечения одного сопла F_c составит 0,0375 мм². По площади соплового отверстия определим его диаметр [8]

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot F_c}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0375}{3,14}} = 0,22 \text{ мм}. \quad (7)$$

Результаты расчета показали, что величина эффективного проходного сечения распылителя не отличается от действительного значения $\mu F = 0,15 \text{ мм}^2$ форсунки КамАЗ -740⁸.

Экспериментальное определение эффективного проходного сечения распылителя выполняют на стенде с постоянным давлением⁹. Если эффективное проходное сечение распылителя в результате образования кокса уменьшилось на 15%, то его необходимо заменить.

В таблице 1 представлены результаты расчетных (теоретических) исследований эффективного проходного сечения распылителя μF и диаметра соплового отверстия d_c (их 5) в зависимости от величины давления P перед сопловыми отверстиями. Расчеты выполнены для постоянного времени впрыска топлива $0,00175 \text{ с}$ (10^0) и одинаковой цикловой подачи топлива, равной $150 \text{ мм}^3/\text{цикл}$.

Анализ результатов исследования, приведенных в таблице 1, показывает, что для постоянного времени впрыска топлива $0,00175 \text{ с}$ (10^0) и одинаковой цикловой подачи топлива $150 \text{ мм}^3/\text{цикл}$ с увеличением давления топлива от 50 до 250 МПа можно уменьшить величину μF распылителя от 0,3 до $0,13 \text{ мм}^2$ и диаметр d_c от 0,3 до 0,2 мм. Уменьшение диаметра сопловых отверстий при высоком давлении впрыска улучшит процесс распыливания топлива, что снизит расход топлива и уменьшит токсичность отработавших газов.

2. МЕТОДИКА РЕГУЛИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ КЛАПАНА УПРАВЛЕНИЯ ФОРСУНКОЙ

На рисунке 3 показан разрез электрогидравлического клапана управления иглой распылителя форсунки. Сила электромагнита 11 открывает запорный клапан, а сила пружины 13 – закрывает. Рассмотрим основные неисправности (отказы) в работе клапана типа «шарик – седло втулки» и его методику регулирования и исследования¹⁰ [7, 9, 10]. Неисправность клапана управления или отказ может произойти в результате короткого замыкания катушки электромагнита 10, поломки пружины 13, увеличения зазора между тарелкой 9 и сердечником электромагнита 11, утечек топлива между шариком 4 и седлом втулки 3, увеличения хода шарика.

Процесс регулирования клапана управления целесообразно проводить после проверки герметичности шарика 4. Герметичность шарика 4 и посадочной поверхности втулки 3 определяется по допустимой величине объема сливаемого топлива управления клапаном всех форсунок на режиме холостого хода за одну минуту (например, 70 см^3)¹¹ [11, 12]. В случае потери герметичности в зоне шарика и втулки (например, утечки топлива одной форсункой более 100 см^3), изношенную втулку восстанавливают или заменяют.

Таблица 1

Зависимость эффективного проходного сечения распылителя и диаметра соплового отверстия от давления
Источник: составлено авторами.

Table 1

Dependence of the effective flow section for the sprayer and the diameter of the nozzle opening on pressure
Source: compiled by the by authors.

Давление P , МПа	50	100	150	200	250
Величина μF , мм^2	0,3	0,2	0,17	0,15	0,13
Диаметр d_c , мм	0,3	0,25	0,23	0,215	0,2

⁸ Макушев Ю. П. Системы подачи топлива и воздуха дизелей: учебное пособие / Ю. П. Макушев, А. П. Жигадло, Л. Ю. Волкова. Омск: СибАДИ, 2017. 208 с.

⁹ Там же.

¹⁰ Макушев Ю. П. Техническое обслуживание клапанов форсунки с электрогидравлическим управлением хода иглы / Ю. П. Макушев, Л. Ю. Волкова, Р. Ф. Салихов, Т. А. Полякова // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации [Электронный ресурс]: сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО «СибАДИ» 03 – 04 декабря 2020 г. Электрон. дан. Омск, СибАДИ 2021. С. 175–180. URL: http://bek.sibadi.org/cgi-bin/irbis64r_plus/cgiirbis_64_ft.exe.

¹¹ Конструктивные особенности систем подачи топлива современных дизелей: учебное пособие / Ю. П. Макушев, А. П. Жигадло, Л. Ю. Волкова. Омск: СибАДИ, 2020. 201 с.

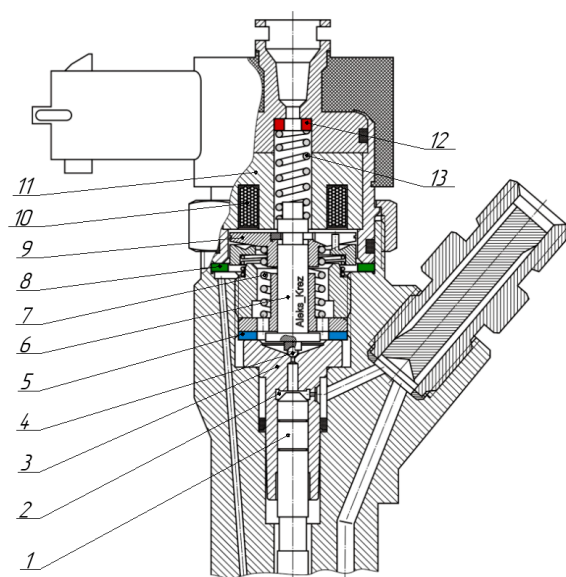


Рисунок 3 – Клапан управления: 1 – поршень; 2 – камера управления; 3 – втулка; 4 – шарик; 5 – нижняя шайба для регулирования хода шарика; 6 – якорь с тарелкой 9; 7 – пружина вспомогательная; 8 – средняя шайба для регулирования зазора между тарелкой 9 и сердечником электромагнита 11, где расположена катушка 10; 12 – верхняя регулировочная шайба, изменяющая усилие на главной пружине 13 и усилие на шарике 4
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Control valve: 1 – piston; 2 – control chamber; 3 – bushing; 4 – ball; 5 – lower washer for regulating the ball stroke; 6 – anchor with plate 9; 7 – auxiliary spring; 8 – middle washer for regulating the gap between plate 9 and the core of the electromagnet 11, where the coil 10 is located; 12 is the upper adjusting washer that changes the force on the main spring 13 and the force on the ball 4
Source: compiled by the by authors.

Для нормальной работы клапана управления необходимо соблюдать требуемое соотношение сил, действующих на его детали. Определение сил, действующих на запорный орган (шарик) 4 со стороны высокого давления в камере управления (150–250 МПа) и со стороны пружины 13 с жесткостью $C = 40$ Н/мм и их соотношение, необходимо знать для точной регулировки клапана. Втягивающая сила электромагнита 11 ($N_{эл}$) должна быть больше

силы сжатой пружины 13 ($N_{пр}$), а сила пружины должна быть больше силы от давления топлива, действующего на поверхность шарика 4 ($N_{ш}$). Определим силы, действующие на детали клапана управления.

1. Сила $N_{ш}$, действующая на шарик 4 диаметром 1,6 мм, который контактирует с посадочной конической поверхностью втулки 3 по диаметру 0,7 мм (площадь контакта $S_{ш} = 0,38 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$) определяется из выражения

$$N_{ш} = S_{ш} \times P = 0,38 \cdot 10^{-6} \times 200 \cdot 10^6 = 76 \text{ Н.} \quad (8)$$

2. Сила пружины, при её предварительном сжатии Δu на величину 2,0 мм, равна

$$N_{пр} = \Delta u \times C = 2,5 \times 40 = 100 \text{ Н.} \quad (9)$$

Из анализа формул (8) и (9) видно, что $N_{пр} > N_{ш}$ и клапан будет закрыт до того времени, пока электромагнит не притянет якорь 6 и не устранил действие силы пружины 13 на шарик 4. Сила электромагнита должна быть на 20–40% больше силы со стороны сжатой пружины.

3. Силу электромагнита определим из выражения^{12, 13}

$$N_{эл} = \mu_0 \times S_c \times (I \times n)^2 / 2x^2, \quad (10)$$

где μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость, $4 \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; S_c – активная площадь сердечника, $0,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; I – сила тока, 19 А; n – число витков катушки, 19; x – зазор между якорем и сердечником, м (при зазоре 0,2 мм $x = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$).

$$N_{эл} = 4 \pi \cdot 10^{-7} \times 0,7 \cdot 10^{-4} \times (19 \cdot 19)^2 / 2 (0,2 \cdot 10^{-3})^2 = 140 \text{ Н.} \quad (11)$$

Сила электромагнита $N_{эл} > N_{пр}$, что обеспечит надёжную работу клапана управления.

Для регулировки клапана управления используют набор шайб различной толщины. Начальный ход шарика клапана должен быть равен 0,04–0,05 мм, регулируется толщиной прокладок (шайб) 5 (см. рисунок 3) [10].

¹² Конструктивные особенности систем подачи топлива современных дизелей: учебное пособие / Ю. П. Макушев, А. П. Жигадло, Л. Ю. Волкова. Омск: СибАДИ, 2020. 201 с.

¹³ Макушев Ю. П. Расчетные исследования и диагностирование форсунок с электрогидравлическим управлением / Ю. П. Макушев, Л. Ю. Волкова, Р. Ф. Салихов, Т. А. Полякова // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации [Электронный ресурс]: сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО «СибАДИ» 03 – 04 декабря 2020 г. Электрон. дан. Омск, СибАДИ 2021. С.175–180. URL: http://bek.sibadi.org/cgi-bin/irbis64r_plus/cgiirbis_64_ft.exe.

Увеличение толщины шайбы 5 приводит к уменьшению давления шарика 4 на седло втулки 3 и увеличению хода шарика. Если увеличить толщину шайбы 8, то это уменьшит прижатие шарика 4 на седло втулки 3 и увеличит зазор между тарелкой 9 и сердечником электромагнита 11. При увеличении толщины шайбы 12 происходит увеличение силы главной пружины 13 на шарик 4 и на седло втулки 3.

В настоящее время системы питания дизелей выпускаются с электрогидравлическим управлением форсунок с давлением впрыска топлива от 160 до 250 МПа. Давление в аккумуляторе (рампе), например, 200 МПа, является начальным для расчета, диагностирования и технического обслуживания форсунок. Открытие или закрытие сопловых отверстий распылителей форсунки происходит в результате изменения давления в камере над управляющим поршнем, диаметр которого больше диаметра иглы распылителя. Максимальное давление в камере управления достигает давления топлива в аккумуляторе.

При расчете и техническом обслуживании форсунок с ЭГУ надо знать максимальную силу давления на закрытый орган управления (шарик) $N_{ш}$. Затем определяется сила пружины $N_{пр} = (1,2-1,4) N_{ш}$, которая должна быть больше на 20–40% силы $N_{ш}$. Далее определяют силу электромагнита $N_{эл} = (1,2-1,4) N_{пр}$, которая должна быть больше на 20–40% силы $N_{пр}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рисунке 4 показано изменение силы $N_{ш}$, действующей на запорный клапан типа «шарик» диаметром 1,6 мм (с диаметром контакта 0,7 мм и площадью $S_{ш} = 0,38 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$), в зависимости от величины максимального давления топлива в камере управления ($P_{уп}$). Из анализа рисунка 4 следует, что сила $N_{ш}$ прямо пропорциональна давлению топлива в камере управления $P_{уп}$. Следует отметить, что системы подачи топлива Common Rail (общий путь) могут иметь максимальное давление топлива в аккумуляторе 160, 200, 250 МПа.

На рисунке 5 показан график изменения силы $N_{пр}$ в зависимости от величины её предварительного сжатия Δu при жесткости пружины, равной 40 Н/мм. Из анализа рисунка 5 следует, что сила $N_{пр}$ прямо пропорциональна её сжатию и представляет собой уравнение прямой линии.

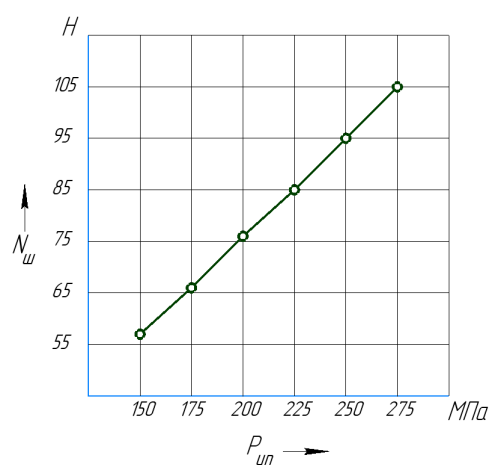


Рисунок 4 – Изменение силы на поверхности шарика ($N_{ш}$) от давления топлива в камере управления ($P_{уп}$)
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Change in force on the surface of the ball ($N_{ш}$) from the fuel pressure in the control chamber ($P_{уп}$)
Source: compiled by the by authors.

Воздушный зазор между якорем и сердечником электромагнита (0,1–0,2 мм) регулируют толщиной средней шайбы 8 (см. рисунок 3). Для контроля хода шарика и воздушного зазора между якорем и сердечником электромагнита применяют специальные приборы и оборудование (индикаторную головку и импульсный генератор) или выполняют необходимые измерения и расчеты.

Для определения воздушного зазора между электромагнитом и якорем возможно измерение деталей клапана с дальнейшим расчётом размерной цепи. Для этого откручивают верхнюю часть клапана (электромагнит) и измеряют при помощи точного прибора с индикаторной головкой глубину от торцевой поверхности до электромагнита (см. рисунок 3). Например, среднее значение шести измерений в различных точках по окружности (через 60°) равно 10,9 мм. Затем измеряем высоту от шайбы 8 до наружной поверхности тарелки якоря. Например, среднее значение шести измерений равно 10,8 мм. В собранном состоянии воздушный зазор между якорем и электромагнитом клапана будет равен 0,1 мм (10,9–10,8). При увеличении воздушного зазора между якорем и электромагнитом клапана уменьшается его втягивающая сила (формула 10), что может быть причиной его неисправности.

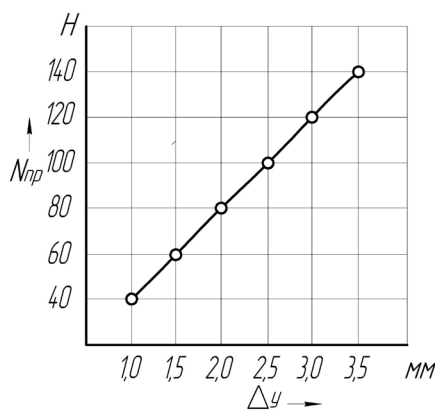


Рисунок 5 – Изменение силы пружины от её предварительного сжатия
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Change in spring force from its pre-compression
Source: compiled by the by authors.

На рисунке 6 показан график изменения силы электромагнита $N_{эл}$ в зависимости от воздушного зазора между якорем и сердечником Δx . При увеличении воздушного зазора между якорем и сердечником электромагнита его втягивающая сила уменьшается (см. формулу 10), что может быть одной из причин его неисправности.

При расчете и техническом обслуживании форсунок с ЭГУ надо знать максимальную силу давления на закрытый орган управления (шарик) $N_{ш}$. Затем определяется сила пружины $N_{пр} = (1,2-1,4) \cdot N_{ш}$, которая должна быть больше на 20–40% силы $N_{ш}$. Далее определяют силу электромагнита $N_{эл} = (1,2-1,4) \cdot N_{пр}$, которая должна быть больше на 20–40% силы $N_{пр}$.

Например, возьмем систему впрыска топлива с давлением в аккумуляторе 200 МПа с диаметром шарика 1,6 мм. Данное давление действует на поверхность шарика и с учетом рисунка 4 создает силу $N_{ш} = 76$ Н. Для обеспечения плотного закрытия шарика сила пружины $N_{пр}$ должна быть больше на 20–40% силы $N_{ш}$. Из рисунка 5 следует, что эта сила должна быть примерно равна 100 Н. При выбранной жесткости пружины в 40 Н/мм ее сжатие должно быть 2,5 мм. Сила электромагнита $N_{эл} = 1,4 \cdot 100 = 140$ Н (см. рисунок 6) достигает данного значения при воздушном зазоре 0,2 мм.

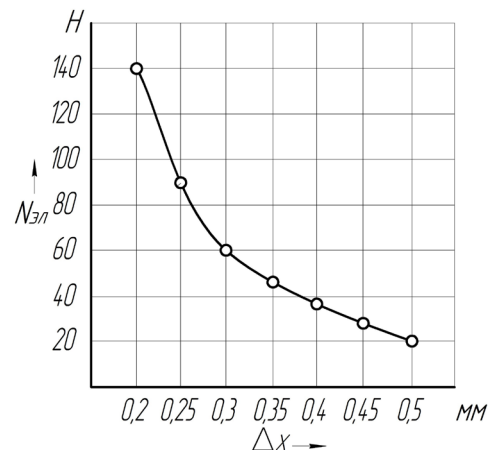


Рисунок 6 – Изменение силы электромагнита в зависимости от воздушного зазора между якорем и сердечником
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Change in the force of the electromagnet depending on the air gap between the anchor and the core
Source: compiled by the by authors.

На рисунках 4, 5 и 6 представлены графики изменения сил, действующих на шарик ($N_{ш}$) от давления топлива в камере управления ($P_{уп}$), силы пружины $N_{пр}$ в зависимости от её сжатия, силы электромагнита $N_{эл}$ в зависимости от величины зазора между якорем и сердечником. Полученные зависимости (зависимость функции от аргумента) проведенных теоретических исследований можно представить в виде $N_{ш} = \psi \cdot (P_{уп})$; $N_{пр} = \psi \cdot (\Delta y)$; $N_{эл} = \psi \cdot (\Delta x)$. Данные графики (зависимости) необходимы для расчета новых (модернизированных) систем питания дизелей с электрогидравлическим управлением форсунок и для проведения их технического обслуживания.

КОДИРОВКА ФОРСУНОК С ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

После регулировки или ремонта форсунки с электронным управлением необходима ее кодировка (прошивка) с целью изменения ее параметров (в основном времени активации). Измененное время активации (время впрыска топлива), при котором обеспечивается требуемая цикловая подача топлива, вносится в электронный блок управления (ЭБУ).

Цикловую подачу топлива из распылителя форсунки дизеля за впрыск в м³ можно вычислить из выражения^{14, 15}

$$q_u = \mu F \cdot \vartheta_T \cdot t_{впр} = \mu F \cdot \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho_T}} \cdot t_{впр}, \quad (12)$$

где μF – эффективное сечение распылителя, м²; ϑ_T – теоретическая скорость, с которой вытекает топливо из распылителя, м/с; ΔP – давление топлива перед сопловыми отверстиями, Н/м²; ρ_T – плотность топлива, кг/м³; $t_{впр}$ – время впрыска, с.

При $\Delta P = 160 \cdot 10^6$ Н/м² и $\rho_T = 850$ кг/м³ величина $\vartheta_T = 613$ м/с. Для $\mu F = 0,15 \cdot 10^{-6}$ м² и времени впрыска 0,001 с (1 мс) количество поданного топлива в КС за впрыск будет примерно равно $90 \cdot 10^{-9}$ м³, или 90 мм³.

Для дизельного двигателя КамАЗ 740-65-240 мощностью 240 л.с. (176 кВт) при частоте вращения коленчатого вала 1900 мин⁻¹ цикловая подача должна быть равна 95 мм³. Анализ формулы (12) показывает, что при постоянных значениях μF , ΔP , ρ_T подача q_u зависит от времени впрыска, $t_{впр}$ (времени активации).

Для кодировки форсунок применяют специальный стенд (рисунок 7, а), который оборудован компьютером с программным обеспечением (например, Diesel Ebsy olution для устройств Common Rail версии 11) [13]. Дополнительно стенд позволяет определять ход клапана (приспособление с индикатором видно на фото). Данное приспособление можно выполнить самостоятельно, используя чертежи устройства для определения хода иглы, представленного в работе [14]. Изменяется только конструкция штока. Выходная часть штока должна быть сплошной, диаметром 3 мм, длиной 70 мм.

Каждая форсунка Delphi Common Rail, новая или отремонтированная, должна иметь свой код. При установке форсунки на двигатель необходимо перепрограммировать ЭБУ, введя в него этот код. Это обеспечит надлежащую корректировку длительности и периодичности импульсов и подачу требуемого количества топлива.

Код форсунки – это условное обозначение допусков на требуемую подачу топлива (например, 95 ± 1 мм³/цикл) при работе форсунки на различных скоростных и нагрузочных режимах двигателя.

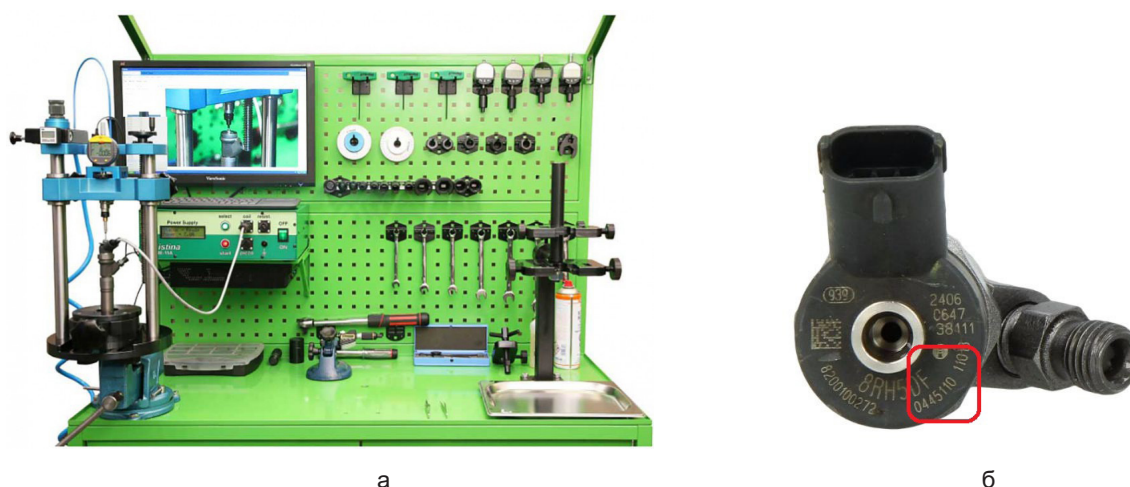


Рисунок 7 – Стенд для регулировки и кодировки (калибровки) форсунок: а – Common Rail; б – верхняя часть форсунки с заводским номером 0 445 110 110

Figure 7 – Stand for adjustment and coding (calibration) of Common Rail injectors (a), upper part of the nozzle with 0 445 110 110 factory number (b)

¹⁴ Конструктивные особенности систем подачи топлива современных дизелей: учебное пособие / Ю. П. Макушев, А. П. Жигadlo, Л. Ю. Волкова. Омск: СибАДИ, 2020. 201 с.

¹⁵ Макушев Ю. П. Расчетные исследования и диагностирование форсунок с электрогидравлическим управлением / Ю. П. Макушев, Л. Ю. Волкова, Р. Ф. Салихов, Т. А. Полякова // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации [Электронный ресурс]: сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО «СибАДИ» 03 – 04 декабря 2020 г. Электрон. дан. Омск, СибАДИ 2021. С. 175–180. URL: http://bek.sibadi.org/cgi-bin/irbis64r_plus/cgiirbis_64_ft.exe.

Электронный блок управления подачей топлива считывает данный код, проверяет, попадает ли значение цикловая подача топлива, которое выдает форсунка в указанный диапазон кода. Если да, то система подачи топлива будет хорошо работать, если нет, то ЭБУ может даже прекратить подачу топлива к данной форсунке.

На рисунке 7, б показана верхняя часть электрогидравлической форсунки с заводским номером 0 445 110 110. По данному номеру форсунки определяют ее характеристики.

Первые четыре цифры обозначают способ управления форсункой (электронный). В следующих трех цифрах закодирован тип ДВС (грузового или легкового автомобиля) и принцип действия исполнительного механизма форсунки (электромагнитный или пьезоэлектрический). Последние три цифры характеризуют исполнение форсунки, ее модель. По этим цифрам также можно определить производительность и рабочее давление форсунки.

Расшифруем форсунки БОШ на примерах:

0445 110 430 – с электромагнитным управлением, для легковых автомобилей;

0445 120 142 – для грузовых автомобилей, электромагнитная;

0445 115 077 – для легковых автомобилей с пьезоэлектрическим управлением (если вместо цифры 115 будет указана цифра 116, 117 или 118 – это форсунки 2, 3, 4-го поколений).

Количество впрыскиваемого форсункой топлива пропорционально времени впрыска (активации) и давлению в топливной системе.

В таблице 2 приведены результаты расчетного исследования (формула (12) изменения подачи топлива за цикл ($\text{мм}^3/\text{цикл}$) от времени активации (времени впрыска топлива). Расчеты выполнены для распылителя с $\mu F = 0,15 \text{ мм}^2$, $\Delta P = 160 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ и $\rho_T = 850 \text{ кг/м}^3$. Для семейства дизелей КамАЗ-740 с мощностью от

176 до 309 кВт на режиме номинальной мощности подача топлива за цикл лежит в пределах 95–167 мм^3 .

Анализ таблицы 2 показывает, что подача топлива за цикл пропорциональна времени активации, которое можно уточнить на контрольно-испытательном стенде или по формуле (12). Относительная погрешность расчетных и экспериментальных значений не превышает 5%.

Код форсунки с электрогидравлическим управлением вырабатывается с учетом результатов измерения цикловой подачи на характерных скоростных и нагрузочных режимах при давлении топлива от 20 до 160 МПа. Полученные результаты измерения подачи топлива корректируются до требуемых значений путем изменения длительности и периодичности подачи импульса (тока) на катушку электромагнита.

После испытания на стенде форсунки для двигателя конкретной марки и мощности проверяется и корректируется необходимая цикловая подача топлива для различных давлений в аккумуляторе с допустимым отклонением от среднего паспортного значения. Цикловая подача топлива корректируется (если она не соответствует заданному значению) длительностью подачи сигнала (тока) на катушку электромагнита. При достижении требуемой цикловой подачи через распылитель при различных давлениях на входе в форсунку составляется тест форсунки.

Результаты кодировки записываются в тест форсунки, уточняется ее шифр и данные заносятся в ЭБУ с использованием программного обеспечения. С этого момента присутствует вся информация, необходимая для корректировки управленияотрегулированной или отремонтированной форсунки.

Таблица 2

Зависимость подачи топлива за цикл от времени активации

Источник: составлено авторами.

Table 2

Dependence of fuel supply per cycle on activation time

Source: compiled by the by authors

Подача топлива, $\text{мм}^3/\text{цикл}$	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
Время активации, мс	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8

Таблица 3
Тест форсунки с электрогидравлическим управлением и положительными результатами
Источник: составлено авторами.

Table 3
The nozzle test with electro hydraulic control and positive results
Source: compiled by the authors

Форсунка Common Rail, номер 0445120142. КамАЗ-740. 65-240								
Этап проверки	Продолж. активации, мкс	Давл., МПа	Время измер. сек	Количество впрыскиваемого топлива, мм ³ /цикл		Количество возвращаемого топлива, мм ³ /цикл		Анализ
				задан. значение	фактич. значен.	задан. значен.	факт. значен.	
Leak test	0	160	200	-- ± --	----	40,0±40,0	7,16	+
VL	900	160	90	105,0±2,0	104,54	44,0±26,0	30,28	+
EM	600	120	40	95,0±2,0	96,56	-- ± --	----	+
LL	630	20	40	20,0±3,0	20,50	-- ± --	----	+
VE	275	60	40	12,0 ± 1,6	12,96	-- ± --	----	+

Этап проверки (режим работы двигателя, для которого диагностируется и регулируется форсунка) может быть таким^{16,17}:

LL – режим холостого хода (минимальная подача топлива); VL – режим максимальной нагрузки (наибольшая подача топлива при максимальном крутящем моменте); EM – режим средних нагрузок (это может быть режим, близкий к номинальному); VE – подвпрыск или дополнительный впрыск; LT – утечки топлива (подача – обратка); Leak test – тест на герметичность (утечки) форсунки.

Для любого режима проверки форсунки обязательным является указание величины давления топлива, в МПа; ширины (длительности) управляющего импульса (продолжительности активации, в мкс); времени измерения, в с; количества впрыскиваемого топлива распылителем форсунки (фактическое и заданное, в мм³/Н или мм³/цикл); количества возвращаемого фактического и заданного топлива, в мм³/Н, (мм³/цикл).

В таблице 3 приведен пример теста форсунки с электрогидравлическим управлением дизеля КамАЗ-740. 65-240 и положительными результатами.

Рассмотрим часть другого теста форсунки дизеля КамАЗ-740. 65-240 мощностью 240 л с (176 кВт) с частотой вращения коленчатого вала 1900 мин⁻¹, но с нарушенной подачей топлива на режиме номинальной мощности (EM).

Время активации равно 1000 мкс (0,001 с). Давление топлива перед распылителем форсунки 160 МПа. Время измерения пропускной способности распылителя форсунки примем равным 40 с. За один цикл под действием перепада давления 160 МПа из распылителя при заданной температуре вытекло объемное количество топлива 82 мм³/цикл (требуется 95±2 мм³/цикл¹⁸).

Чтобы повысить цикловую подачу топлива нужно увеличить время впрыска (время активации). Время активации со 1000 мкс необходимо увеличить до 1022 мкс и внести его в ЭБУ. Для внесения данных о форсунках в память ЭБУ необходим диагностический прибор HI-SCAN Pro.

Каждый производитель использует свой формат кодов коррекции: у BOSCH это IMA, у DENSO это QR, у DELPHI код C2I и C3I.

¹⁶ Конструктивные особенности систем подачи топлива современных дизелей: учебное пособие / Ю. П. Макушев, А. П. Жигадло, Л. Ю. Волкова. Омск: СибАДИ, 2020.

¹⁷ Диагностирование, восстановление, регулирование и кодирование клапана управления форсунок с электрогидравлическим управлением хода иглы / Ю. П. Макушев, Л. Ю. Волкова, Р. Ф. Салихов, Т. А. Полякова // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: Материалы XII-й Международной научно-технической конференции, Омск, 16–19 февраля 2022 года / Редколлегия: В. А. Лихолобов [и др.]. Омск: Омский государственный технический университет, 2022. С. 192–193. EDN BUVOFI. Режим доступа: <http://oge.omgtu.ru/2022/files/OGE2022.pdf>.

¹⁸ Макушев Ю. П. Системы подачи топлива и воздуха дизелей: учебное пособие / Ю. П. Макушев, А. П. Жигадло, Л. Ю. Волкова. Омск: СибАДИ, 2017. 208 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены недостатки форсунок дизеля КамАЗ-740 с механическим управлением хода иглы распылителя. Основным недостатком форсунок является низкое давление топлива перед сопловыми отверстиями (менее 60 МПа) и отсутствие управления подачи топлива.

Применение форсунок с электромеханическим управлением позволит повысить давление впрыскиваемого топлива (до 250 МПа), организовать управляемый впрыск топлива (например, двухфазным), снизить неравномерность подачи топлива по отдельным цилиндрам.

Представлены значения эффективного проходного сечения распылителя и диаметра сопловых отверстий в зависимости от величины давления топлива в распылителе. Анализ результатов расчета показывает, что для постоянного времени впрыска топлива 0,00175 с и одинаковой цикловой подачи топлива 150 мм³/цикл с увеличением давления топлива от 50 до 250 МПа можно уменьшить величину эффективного проходного сечения распылителя от 0,3 до 0,13 мм² и диаметр соплового отверстия от 0,3 до 0,2 мм. Уменьшение диаметра сопловых отверстий высоким давлением впрыска улучшит процесс распыливания топлива, что снизит расход топлива.

Рассмотрено устройство и принцип действия клапана с электрогидравлическим управлением хода иглы форсунки, выполнен его расчёт. Указаны неисправности в работе клапана управления, приведена методика его регулирования. Для регулирования клапана управления по предлагаемой методике в начале расчётным или экспериментальным путем определяют величины и соотношение сил, действующих на подвижные детали клапана, а далее проверяют и при необходимости при помощи прокладок различной толщины устанавливают в определенном порядке требуемый ход шарика, необходимое усилие пружины, зазор между якорем и сердечником.

Для эффективной работы клапана управления нужно соблюдать требуемое соотношение сил, действующих на его детали. Определение сил, действующих на запорный орган (шарик) со стороны высокого давления в камере управления (150–250 МПа) и со стороны пружины с жесткостью $C = 40$ Н/мм и их соотношение необходимо знать для точной регулировки клапана. Втягивающая сила электромагнита должна быть больше силы сжатой

пружины на 20–40%, а сила пружины должна быть больше силы от давления топлива, действующего на поверхность шарика на 20–40%.

Рассмотрен способ восстановления требуемой (паспортной) цикловой подачи топлива при ее изменении в результате замены клапана управления форсункой или его регулировки. Приведен пример теста форсунки с электрогидравлическим управлением. Установлено, что подача топлива за цикл пропорциональна времени активации, которое можно уточнить на контрольно-испытательном стенде или расчетным путем. Выполнены теоретические исследования влияния времени активации (продолжительности впрыска) на изменение подачи топлива за цикл. Относительная погрешность расчетных и экспериментальных результатов исследования не превышает 5%.

Результаты расчетных исследований могут быть использованы для уточнения методики технического обслуживания топливных систем с электронным управлением (Common Rail). Таблицы с расчетными данными сил от величины давления на орган управления (шарик), силы пружины от ее сжатия, силы электромагнита от зазора между якорем и сердечником могут быть использованы при совершенствовании методики технического обслуживания форсунок с электрогидравлическим управлением и сделать более эффективной работу специалистов по техническому обслуживанию данных форсунок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Calculation of contact stresses in the seating cone of diesel injectors sprayers /Y. P. Makushev, R. F. Salikhov, T. A. Polyakova, L. Y. Volkova // AIP Conference Proceedings, Omsk, 24–27 февраля 2021 года. Omsk, 2021. P. 060012. (1-9 с). DOI 10.1063/5.0075035.
2. Жигadlo А. П., Макушев Ю. П., Полякова Т. А., Рындин В. В. Выбор кулачковых механизмов для привода плунжера насоса высокого давления дизельных двигателей с применением программы MATHCAD // Омский научный вестник. 2022. № 4 (184). С. 18–24. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-184-18-24.
3. Diagnosis of fuel equipment of diesel engines in oil-and-gas machinery and facilities. AIP. R. F. Salikhov, Y. P. Makushev, G. N. Musagitova, L. U. Volkova, and R. S. Suleymanov Diagnosis of fuel equipment of diesel engines in oil-and-gas machinery and facilities. AIP Conference Proceedings 2141, 050009 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5122152>
4. Жигadlo А. П., Иванов А. Л., Саенко М. М. Влияние различных факторов на величину и равномерность подачи топлива в цилиндры дизеля // Вестник СибАДИ. Вып. 4 (32). 2013. С. 29–35.

5. Leonhard, R. Solenoid Common Rail Injector for 1800 Bar / R. Leonhard, J. Warga, T. Pauer, M. Ruckle, M. Schnell // *MTZ worldwide*. 2010. Vol. 71. № 2. P. 10-15.

6. Matsumoto S. The new Denso Common Rail diesel electromagnetic injector / S. Matsumoto, K. Date, T. Taguchi, O.E. Hermann // *MTZ worldwide*. 2013. Vol. 74. No.2. pp. 44-48. 136. R. Pairi, F.D.

7. Макушев Ю. П. Расчет электрогидравлического клапана управления ходом иглы форсунки и его диагностирование // Омский научный вестник. Серия «Приборы, машины и технологии». 2015. № 3 (143). С. 74–77.

8. Макушев Ю. П., Волкова Л. Ю. Выбор эффективного проходного сечения распылителей и дифференциальной характеристики впрыска топлива для дизелей с цилиндровой мощностью до 250 кВт // Омский научный вестник. Серия «Приборы, машины и технологии». 2015. № 2 (140). С. 76–79.

9. EP 2 453 1 24 A1 Frankl, Jason. A method for determining injection parameters for the injector. Publication date: 16.05.2012 Bulletin 2012/20 126. F. Yang, J. Wang Common rail fuel injection system Iterative control based on training calibration of parameters for precise control of the amount of fuel injection International Journal of Automotive Technology April 2011, volume 12, Warga // *MTZ worldwide*. 2012. Vol. 69. No. 10. P. 26-31.

10. Common Rail System (CRS) Service Manual: General Edition. Denso Corporation Service Department. Showa-cho, Kariya, Aichi Prefecture, 2018. 185 pp.

11. Yakimov I. V., Krivtsov S. N., Potapov A. S., Svirbutovich O. A. Fuel flow and pressure in common return line as a diagnostic parameter of electro-hydraulic injectors technical state IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 632 (2019) 012058 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/632/1/012058.

12. US 7,937,988 B2 Method and device for checking for leakage in a fuel injection valve of an internal combustion engine. 10, 2011.

13. Diesel Easy Solutions software for Common Rail devices, version 11. User Manual version 2016.2. DIESEL EASY SOLUTIONS Diesel Easy Solutions ttp://easydiesel.club 2. 40 p.

14. Волкова Л. Ю. Разработка универсального приспособления для определения хода иглы распылителей тепловозных и судовых дизелей // Омский научный вестник. 2022. № 1(181). С. 13–18. DOI 10.25206/1813-8225-2022-181 – 13–18.

REFERENCES

1. Calculation of contact stresses in the seating cone of diesel injectors sprayers /Y. P. Makushev, R. F. Salikhov, T. A. Polyakova, L. Y. Volkova. AIP Conference Proceedings, Omsk, Omsk, 2021. P. 060012. (1-9 p). DOI 10.1063/5.0075035.

2. Zhigadlo A. P., Makushev Ju. P., Poljakova T. A., Ryndin V. V. Vybor kulachkovykh mekhanizmov dlja pri-voda plunzhera nasosa vysokogo davlenija dizel'nyh dvigatelej s primeneniem programmy MATHCAD [Selecting the Cam Mechanisms to Drive the

High Pressure Pump Plunger of Diesel Engines Using MATHCAD]. *Omskij nauchnyj vestnik*. 2022; 4 (184): 18–24. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-184-18-24. (in Russ.)

3. Diagnosis of fuel equipment of diesel engines in oil-and-gas machinery and facilities. AIP. R. F. Salikhov, Y. P. Makushev, G. N. Musagitova, L. U. Volkova, and R. S. Suleymanov Diagnosis of fuel equipment of diesel engines in oil-and-gas machinery and facilities. AIP Conference Proceedings 2141, 050009 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5122152>

4. Zhigadlo A. P., Ivanov A. L., Saenko M. M. Vli-janie razlichnykh faktorov na velichinu i ravnomernost' podachi topliva v cilindry di-zelja [Influence of various factors on the value and uniformity of fuel supply to diesel cylinders]. *Vestnik SibADI*. 2013; 4 (32). 2013: 29 – 35. (in Russ.)

5. Leonhard, R. Solenoid Common Rail Injector for 1800 Bar / R. Leonhard, J. Warga, T. Pauer, M. Ruckle, M. Schnell. *MTZ worldwide*. 2010; Vol. 71. No 2:10-15.

6. Matsumoto S. The new Denso Common Rail diesel electromagnetic injector / S. Matsumoto, K. Date, T. Taguchi, O.E. Hermann. *MTZ worldwide*. 2013; Vol. 74. No.2: 44-48. 136. R. Pairi, F.D.

7. Makushev Ju. P. Raschet elektrogidravli-cheskogo klapana upravlenija hodom igly forsunki i ego diagnostirovanie [Calculation of electrohydraulic valve of nozzle needle travel control and its diagnostics]. *Omskij nauchnyj vestnik. Serija «Pribyry, mashiny i tehnologii»*. 2015; 3 (143). 2015: 74 – 77. (in Russ.)

8. Makushev Ju. P., Volkova L. Ju. Vybor jef-fektivnogo prohodnogo sechenija raspylitelej i dif-feren-cial'noj harakteristiki vpryska topliva dlja dizelej s cilindrovoj moshhnost'ju do 250 kVt [Selection of effective spray section and differential fuel injection characteristics for diesel engines with cylinder power up to 250 kW]. *Omskij nauchnyj vestnik. Serija «Pribyry, mashiny i tehnologii»*. 2015; no 2 (140). 2015^ 76 – 79. (in Russ.)

9. EP 2 453 1 24 A1 Frankl, Jason. A method for determining injection parameters for the injector. Publication date: 16.05.2012 Bulletin 2012/20 126. F. Yang, J. Wang Common rail fuel injection system Iterative control based on train-ing calibration of parameters for precise control of the amount of fuel in-jection International Journal of Automotive Technology April 2011, volume 12, Warga // *MTZ worldwide*. 2012. Vol. 69. No. 10. P. 26-31.

10. Common Rail System (CRS) Service Manual: General Edition. Denso Corporation Service Department. Showa-cho, Kariya, Aichi Prefecture, 2018. 185 pp.

11. Yakimov I. V., Krivtsov S. N., Potapov A. S., Svirbutovich O. A. Fuel flow and pressure in common return line as a diagnostic parameter of electro-hydraulic injectors technical state IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 632 (2019) 012058 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/632/1/012058.

12. US 7,937,988 B2 Method and device for checking for leakage in a fuel injection valve of an internal combustion engine. 10, 2011.

13. Diesel Easy Solutions software for Common Rail devices, version 11. User Manual version 2016.2. DIESEL EASY SOLUTIONS Diesel Easy Solutions <http://easydiesel.club> 2. 40 p.

14. Volkova L. Ju. Razrabotka universal'nogo prispособlenija dlja opredelenija hoda igly raspylitatej tep-lovoznih i sudovyh dizelej [Development of a universal device for determining the needle travel of diesel and marine diesel engines]. *Omskij nauchnyj vestnik*. 2022; 1(181): 13-18. DOI 10.25206/1813-8225-2022-181-13-18.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Жига́дло А. П. *Формулировка направления и темы исследования. Постановка задач исследования. Разработка теоретических исследований (50%).*

Макушев Ю. П. *Расчетные (теоретические) исследования и кодировка форсунок с электрогидравлическим управлением хода иглы распылителя. Анализ результатов исследования, формулирование выводов (50%).*

COAUTHORS' CONTRIBUTIONS

Aleksandr P. Zhigadlo. Research direction and topic formulation. Research objectives statement. Theoretical studies development (50%).

Makushev Yu. P. Calculated (theoretical) studies and coding of nozzles with electro-hydraulic control of the sprayer needle operation. Study results and formulation of conclusions analysis (50%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жига́дло Александр Петрович – канд. техн. наук, д-р пед. наук, доц., ректор.

Макушев Юрий Петрович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автоматизация и энергетическое машиностроение».

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Aleksandr P. Zhigadlo – Cand. of Sci., Dr. of Sci., Associate Professor, Rector.

Yuri P. Makushev – Cand. of Sci., Associate Professor, Automation and Energy Engineering Department.

УДК 656.13.073:66(470.45)
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-858-877>
EDN: QYMBMX
Научная статья



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК ХИМИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ ИЗ ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ В БЛИЖНЕЕ И ДАЛЬНЕЕ ЗАРУБЕЖЬЕ

А. В. Куликов^{1*}, П. А. Павлов^{1,2}, А. А. Куликов¹

¹Волгоградский государственный технический университет,
г. Волгоград, Россия

²ООО «Альфа Трейд»,
г. Москва, Россия

AlekseyKulikov2007@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4395-590X>

pavel-pavlov87@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3420-3909>

v2xoda@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5297-485X>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Промышленный сектор России является важнейшим сегментом экономики страны. До начала 21-го века крупные химические предприятия России были ориентированы на внутренний рынок. Существовала сформированная еще в СССР так называемая стратегия снабжения союзных социалистических республик. Продукция химической промышленности в основном перевозилась автомобильным транспортом по городу и в соседние области, основной грузопоток на более дальние расстояния осваивал железнодорожный и речной транспорт. В настоящее время крупнейшее предприятие химической отрасли Волгоградской области АО «Каустик» проводит активные экспортные поставки в страны Европы, Южной Америки и Азии. Для выполнения международных перевозок продукции предприятия используются наемные тягачи с полуприцепами, отвечающие всем современным стандартам экологической безопасности. Активно происходит взаимодействие автомобильного транспорта с железнодорожным, речным, морским, организуются эффективные логистические мультимодальные системы доставки химической продукции. Со странами Азии организуются автомобильные и железнодорожные перевозки продукции, со странами Европы – автомобильные, железнодорожные и морские, со странами Южной Америки – морские. Сегодня транспорт предприятия осуществляет международные мультимодальные перевозки в ближнее и дальнее зарубежье. Вопрос повышения эффективности работы автомобильного транспорта является актуальным. В работе рассмотрены звенья логистической системы перевозки химической продукции предприятия между странами по маршрутам «Россия – Нидерланды» и «Россия – Киргизия». Проведено сравнение автомобильных и железнодорожных перевозок по времени и стоимости на маршруте «Волгоград – Бишкек». Полная загрузка автотранспортного средства транспортными пакетами по расчету происходит с соблюдением нагрузок по осям тягача и полуприцепа. Повышение эффективности перевозок зависит от организации работы погрузочно-разгрузочных пунктов, пунктов таможенного контроля, движения по маршрутам, работы водителей. Исследованы статистические закономерности распределения времени выполнения элементов и операций в погрузочном пункте предприятия. Рассмотрены способы организации работы водителей автомобильного транспорта на международном маршруте «Волгоград – Бишкек – Волгоград», представлен расчет длительности выполнения элементов перевозочного процесса и их стоимости.

Материалы и методы. В работе используются методы статистического и экономического анализа данных функционирования химической промышленности региона. Применяются графо-аналитические методы для формирования транспортных пакетов и обеспечения полной загрузки автомобиля, методы определения кратчайших расстояний и составления маршрутов на транспортной сети. Используются методы организации работы водителей, обеспечивающие одиночную и турную работу на международном маршруте. Эффективность предложенных мероприятий оценивается экономическими методами.

Результаты. Выявлено, что химическая промышленность региона имеет устойчивое экономическое положение, позволяющее осваивать новые международные рынки. Исследованы звенья мультимодальной

© Куликов А. В., Павлов П. А., Куликов А. А., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

логистической системы доставки продукции предприятия по международным маршрутам «Волгоград – Бишкек» и «Волгоград – Нидерланды». Повышение эффективности перевозок зависит от организации погрузочно-разгрузочных пунктов. Проведен статистический анализ элементов и этапов перевозочного процесса каустической соды. Разработана схема размещения транспортных пакетов с мешками каустической соды в полуприцепе автотранспортного средства. Разработаны международные маршруты перевозки продукции АО «Каустик» с использованием автомобильного транспорта: «Волгоград – Бишкек» и «Волгоград – Нидерланды». Рассчитан режим работы автомобильного транспорта при выполнении международных перевозок с использованием турной и одиночной организации работы водителей. Рекомендована турная поездка как наиболее эффективный способ организации работы водителей при организации международных перевозок в ближайшее и дальнее зарубежье. Определена окончательная цена 1 т перевезенной продукции по маршруту «Волгоград – Бишкек». Эффективное функционирование автомобильного транспорта в международной логистической системе доставки каустической соды позволяет сократить транспортное время, транспортные затраты и уменьшить стоимость единицы продукции у конечного потребителя.

Выводы. В статье разработаны мероприятия, позволяющие совершенствовать организацию международных перевозок продукции АО «Каустик» с использованием автомобильного транспорта. Конечная цена 1 т продукции на складе г. Бишкека с учетом начальной стоимости гранулированной каустической соды и затрат на перевозку в случае организации одиночной езды водителя составит – 83246 руб./т, а при турной езде, соответственно, – 81355 руб./т.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: химическая продукция, каустическая сода, международные мультимодальные перевозки, эффективность мультимодальных перевозок, международная логистическая система, транспортный пакет, автотранспортное средство, одиночная езда, турная езда.

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за рассмотрение данной статьи.

Статья поступила в редакцию 12.05.2022; одобрена после рецензирования 06.12.2022; принята к публикации 19.12.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Куликов А. В., Павлов П. А., Куликов А. А. Повышение эффективности мультимодальных перевозок химической продукции из Волгоградской области в ближнее и дальнее зарубежье // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 6 (88). С. 858-877. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-858-877>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-858-877>

EDN: QYMBMX

IMPROVING THE EFFICIENCY OF MULTIMODAL TRANSPORTATION OF CHEMICAL PRODUCTS FROM THE VOLGOGRAD REGION TO THE NEAR AND FAR ABROAD

Alexey V. Kulikov^{1*}, Pavel A. Pavlov^{1,2}, Andrey A. Kulikov¹

¹Volgograd State Technical University,
Volgograd, Russia

²ALFA TRADE LLC, Moscow, Russia

AlekseyKulikov2007@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4395-590X>

pavel-pavlov87@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3420-3909>

v2xoda@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5297-485X>

*corresponding author

© Kulikov A. V., Pavlov P. A., Kulikov A. A., 2022



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

ABSTRACT

Introduction. The industrial sector of Russia is the most important segment of the country's economy. Until the beginning of the 21st century, large chemical enterprises in Russia were focused on the domestic market. There was a so-called supply strategy formed back in the USSR for the Union Socialist republics. The products of the chemical industry were mainly transported by road around the city and to neighboring regions, the main cargo traffic for longer distances was mastered by rail and river transport. Currently, the largest chemical industry enterprise in the Volgograd region, AO Kaustik, is actively exporting to Europe, South America and Asia. To carry out international transportation of the company's products, hired tractors with semi-trailers that meet all modern standards of environmental safety are used. The interaction of road transport with rail, river, and sea is actively taking place, effective logistics multimodal systems for the delivery of chemical products are being organized. Road and rail transportation of products is organized with Asian countries, with European countries – by road, rail and sea, with South American countries - by sea. Today, the company's transport carries out international multimodal transportation to the near and far abroad. The issue of improving the efficiency of road transport is relevant. The paper considers the links of the logistics system of transportation of chemical products of the enterprise between the countries, along the routes: Russia – Netherlands and Russia – Kyrgyzstan. The comparison of road and rail transportation by time and cost on Volgograd – Bishkek route is carried out. The full loading of the vehicle with transport packages according to the calculation takes place in compliance with the loads on the axles of the tractor and semi-trailer. Improving the efficiency of transportation depends on the organization of loading and unloading points, customs control points, movement along routes, and the work of drivers. The statistical regularities of the distribution of the execution time of elements and operations in the loading point of the enterprise are investigated. The ways of organizing the work of motor transport drivers on the international Volgograd – Bishkek – Volgograd route are considered, the calculation of the duration of the elements of the transportation process and their cost is presented.

Materials and methods. The paper uses methods of statistical and economic analysis of data on the functioning of the chemical industry in the region. Graph-analytical methods are used to form transport packages and ensure that the car is fully loaded. Methods for determining the shortest distances and drawing up routes on the transport network are used. Methods of organizing the work of drivers are used to ensure single and tour work on the international route. The effectiveness of the proposed measures is evaluated by economic methods.

Results. It is revealed that the chemical industry of the region has a stable economic situation that allows it to develop new international markets. The links of the multimodal logistics system for the delivery of the company's products along Volgograd – Bishkek and Volgograd – Netherlands international routes are investigated. Improving the efficiency of transportation depends on the organization of loading and unloading points. A statistical analysis of the elements and stages of the transportation process of caustic soda was carried out. A scheme for placing transport packages with bags of caustic soda in a semi-trailer of a motor vehicle has been developed. International routes of transportation of products of AO Kaustik using road transport have been developed: Volgograd – Bishkek and Volgograd – Netherlands routes. The mode of operation of motor transport when performing international transportation using tour and single organization of drivers' work is calculated. We recommend a tour trip as the most effective way to organize the work of drivers. Tour riding is recommended as the most effective way of organizing the work of road transport in the organization of international transportation to near and far abroad. The final price of 1 ton of transported products on the Volgograd – Bishkek route has been determined. The effective functioning of road transport in the international logistics system for the delivery of caustic soda allows you to reduce transport time, transport costs and reduce the cost of a unit of production for the end user.

Conclusions. The article develops measures to improve the organization of international transportation of products of JSC "Caustic" using road transport. The final price of 1 ton of products in the Bishkek warehouse, taking into account the initial cost of granular caustic soda and transportation costs in the case of organizing a single driver's ride, will be 83246 rubles/ton, and for tour driving, respectively, 81355 rubles/ton.

KEYWORDS: Chemical products, caustic soda, international multimodal transportation, multimodal transportation efficiency, international logistics system, transport package, motor vehicle, single ride, tour ride.

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors express their gratitude to the anonymous reviewers for reviewing this article.

The article was submitted 12.05.2022; approved after reviewing 06.12.2022; accepted for publication 19.12.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Kulikov A.I. V., Pavlo P. A., Kulikov A. A. Improving the efficiency of multimodal transportation of chemical products from the Volgograd region to the near and far abroad. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (6): 858-877. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-858-877>

ВВЕДЕНИЕ

Промышленный сектор России является важнейшим сегментом экономики страны. До начала 21-го века крупные химические предприятия России были ориентированы на внутренний рынок. Существовала сформированная еще в СССР так называемая стратегия снабжения союзных социалистических республик. Химическая промышленность России считается одним из перспективных направлений производства страны. Без продукции нефтехимического и химического сектора не может обойтись практически ни одна отрасль производства. Е. В. Кулясова в своей статье «Химическая промышленность в России: современное состояние и проблемы развития» отмечает, что химическая промышленность является одной из тех немногих отраслей промышленности, которая производит не только бытовые изделия и товары, но и продукцию для машиностроения, металлургии, нефтехимии и нефтепереработки, агропромышленного и оборонного комплексов, медицины и фармакологии, для разведки и добычи полезных ископаемых и т. д. [1].

Химическая отрасль России включает два десятка подотраслей, производя при этом примерно 16 тыс. видов продукции. На территории Российской Федерации насчитывается 1038 крупных предприятий химической промышленности.

На рисунке 1 представлен товарооборот России в секторе «Продукция химической промышленности»^{1,2} за 2017–2020 гг.

По данным статистики рисунка 1 товарооборот России в секторе «Продукция химической промышленности» за 2020 г. составил 45,5 млрд долл., уменьшившись с аналогичным периодом 2019 г. на 14,4%. Экспорт из России за 2020 г. составил 16,1 млрд долл., уменьшившись на 16,5% в соответствии с предыдущим 2019 г. В основном экспортировались: удобрения – 43% (поставки в Бразилию, Эстонию, Китай) [2]; продукты неорганической химии – 17% (поставки на Украину (8%), в Эстонию (7%), Турцию (7%)); органические химические соединения – 15% (поставки в Финляндию (19%), Нидерланды (14%), Беларусь (9%)). Импорт в Россию за 2020 г. составил 29,4 млрд долл., уменьшившись на 13,26% в соответствии с предыдущим 2019 г.

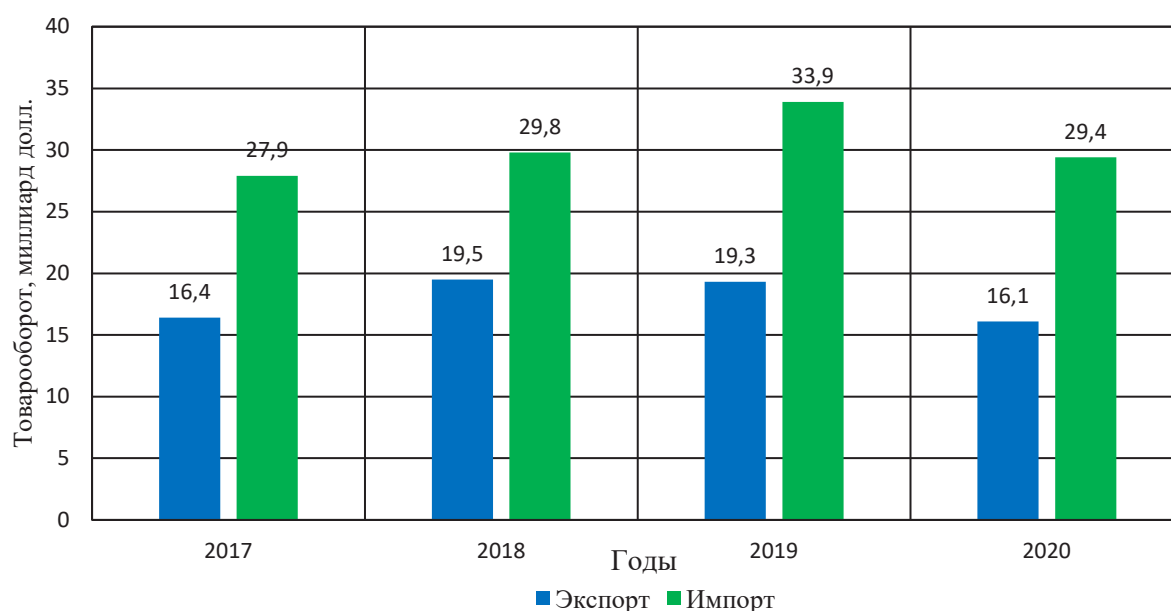


Рисунок 1 – Товарооборот России в секторе «Продукция химической промышленности» за 2017–2020 гг.
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Russia's trade turnover in the Chemical Industry Products sector for 2017-2020
Source: compiled by the authors.

¹ Официальная статистика // Федеральная служба государственной статистики: офиц. сайт. Режим доступа : <https://rosstat.gov.ru>. (дата обращения: 12.05.22)

² АО «Каустик»: офиц. сайт. Режим доступа : <https://www.kaustik.ru/ru/> (дата обращения: 12.05.22)

В основном импортировались: фармацевтическая продукция – 37% (поставки из Германии, США, Италии); органические химические соединения – 16% (поставки из Китая (39%), Германии (11%), Индии (8%)); прочие химические продукты – 12% (поставки из Германии (18%), США (13%), Китая (12%)); продукты неорганической химии – 10% (поставки из Украины (21%), Казахстана (20%), Австралии (15%)); эфирные масла и резиноиды, парфюмерные, косметические, туалетные средства – 10% (поставки из Франции, Германии, Италии); краски, лаки, мастики и др. – 6% (поставки из Германии, Италии, Китая); мыло, ПАВ, моющие средства, смазочные материалы, воски, свечи, пасты, пластилин – 5% (поставки из Германии, Франции, Китая); белковые вещества, модифицированные крахмалы, клеи, ферменты – 3% (поставки из Германии, Китая, Франции)^{2,3}.

Продукция химической промышленности в основном перевозилась автомобильным транспортом по городу и в соседние области, основной грузопоток на более дальние расстояния осваивал железнодорожный и речной транспорт. В настоящее время крупнейшее предприятие химической отрасли Волгоградской области АО «Каустик» проводит активные экспортные поставки в стран Европы, Южной Америки и Азии. Современная политическая ситуация дает возможность бурному развитию торговых отношений со странами Азии. Перспективные направления развития транспортно-логистических систем с устойчивыми связями России и стран Азии проанализированы в современных научно-исследовательских работах^{3,4,5,6}.

Для выполнения международных перевозок продукции предприятия используются наемные тягачи с полуприцепами, отвечающие

всем современным стандартам экологической безопасности. Активно происходит взаимодействие автомобильного транспорта с железнодорожным, речным, морским, организуются эффективные логистические мультимодальные системы доставки химической продукции. Со странами Азии организуются автомобильные и железнодорожные перевозки продукции, со странами Европы – автомобильные, железнодорожные и морские, со странами Южной Америки – морские. Сегодня транспорт предприятия осуществляет международные мультимодальные перевозки в ближнее и дальнее зарубежье. Вопрос повышения эффективности работы автомобильного транспорта является актуальным. В работе рассмотрены звенья логистической системы, перевозки химической продукции предприятия между странами по маршрутам «Россия – Нидерланды» и «Россия – Киргизия». Проведено сравнение автомобильных и железнодорожных перевозок по времени и стоимости на маршруте «Волгоград – Бишкек». Полная загрузка автотранспортного средства транспортными пакетами по расчету происходит с соблюдением нагрузок по осям тягача и полуприцепа. Повышение эффективности перевозок зависит от организации работы погрузочно-разгрузочных пунктов, пунктов таможенного контроля, движения по маршрутам, работы водителей. Исследованы статистические закономерности распределения времени выполнения элементов и операций в погрузочном пункте предприятия. Рассмотрены способы организации работы водителей автомобильного транспорта на международном маршруте «Волгоград – Бишкек – Волгоград», представлен расчет длительности выполнения элементов перевозочного процесса и их стоимости.

³ Суханов Д. Д. Анализ транспортно-логистических связей России и Киргизии / Д. Д. Суханов // Конкурс научно-исследовательских работ студентов Волгоградского государственного технического университета (г. Волгоград, 26–30 апреля 2021 г.): тез. докл. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.]; ВолгГТУ, Отд. координации науч. исследований молодых ученых УНИИ, Общество молодых ученых. Волгоград, 2021. 163 с.

⁴ Чикалов Е. С. Анализ состояния развития транспортно-логистических систем России и Казахстана / Е. С. Чикалов // Конкурс научно-исследовательских работ студентов Волгоградского государственного технического университета (г. Волгоград, 26–30 апреля 2021 г.): тез. докл. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.]; ВолгГТУ, Отд. координации науч. исследований молодых ученых УНИИ, Общество молодых ученых. Волгоград, 2021. 155 с.

⁵ Петрова М. В. Анализ транспортно-логистических систем России и Китая / М. В. Петрова // Конкурс научно-исследовательских работ студентов Волгоградского государственного технического университета (г. Волгоград, 26–30 апреля 2021 г.): тез. докл. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.]; ВолгГТУ, Отд. координации науч. исследований молодых ученых УНИИ, Общество молодых ученых. Волгоград, 2021. 161 с.

⁶ Вальковская А. А. Совершенствование организации перевозок продукции АО «Каустик» автомобильным транспортом / А. А. Вальковская, Ю. С. Солтанов // Конкурс научно-исследовательских работ студентов Волгоградского государственного технического университета (г. Волгоград, 25–29 апреля 2022 г.): тез. докл. / редкол.: С. В. Кузьмин; ВолгГТУ, Отд. координации науч. исследований молодых ученых УНИИ. Волгоград, 2022. С. 95–96.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе используются методы статистического и экономического анализа данных функционирования химической промышленности региона. Применяются графоаналитические методы для формирования транспортных пакетов и обеспечения полной загрузки автомобиля. Методы определения кратчайших расстояний и составления маршрутов на транспортной сети. Применяются методы организации работы водителей, обеспечивающие одиночную и турную работу на международном маршруте. Эффективность предложенных мероприятий оценивается экономическими методами.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Химическая промышленность Волгоградской области занимает лидирующие позиции в химической отрасли РФ по выпуску синтетической соляной кислоты, товарного хлора, жидкой и твердой каустической соды и др.

Производство продукции АО «Каустик» в Волгоградской области увеличивается с каждым годом, так как спрос на продукцию химической промышленности постоянно растет. За

последние 24 года объем перевозок выпускаемой продукции предприятия увеличился на 62%, это связано с постоянным увеличением потребности в химической продукции³.

Основными зарубежными клиентами предприятия являются: Киргизия, Казахстан, Бразилия, Беларусь, Нидерланды, Азербайджан и Китай.

На рисунке 2 представлены данные по объемам перевозок химической продукции основным зарубежным потребителям за 2020 г. (годовой объем составил более 79,9 тыс. т)³.

Анализ данных рисунка 2 показывает, что наибольший объем перевозок продукции (основным международным потребителям в 2020 г.) пришелся на Нидерланды (46 тыс. т). Нидерланды при населении 17,7 млн чел. потребляют продукции в 3,5 раза больше, чем Китай (в котором проживает 1443 млн чел.), то есть возможно сделать вывод, что Нидерланды не являются конечным потребителем, а представляют собой посредника в дальнейшей цепочке продвижения химической продукции волгоградского предприятия. Поставки продукции организуются международными мультимодальными логистическими системами и международными логистическими системами.

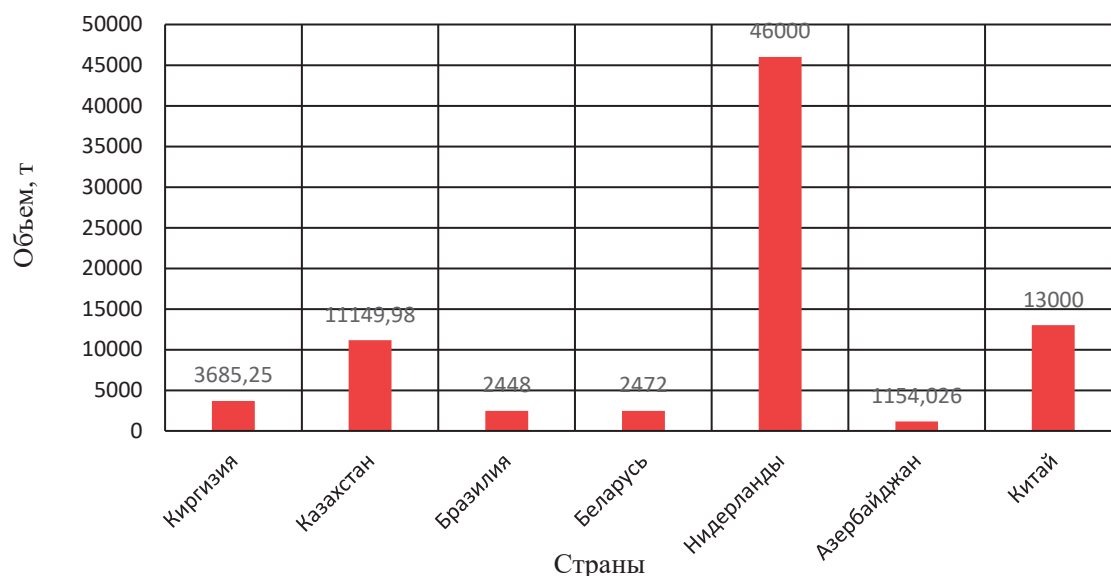


Рисунок 2 – Объем перевозок продукции основным потребителям международным сообщением
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Volume of transportation of products to major consumers by international traffic
Source: compiled by the authors.

Таблица 1
Звенья логистической системы перевозки химической продукции
по маршрутам «Волгоград – Бишкек» и «Волгоград – Нидерланды»
Источник: составлено авторами.

Table 1
Links of the logistics system for the transportation of chemical products
on the routes «Volgograd – Bishkek» and «Volgograd – Netherlands»
Source: compiled by the authors.

Маршрут	Наименование	Автомобильный транспорт с использованием паромной переправы (морской транспорт)	Автомобильный транспорт
Волгоград – Нидерланды	Подготовка груза к перевозке	12 ч 20 мин	12 ч 20 мин
	Погрузка	42 мин	42 мин
	Транспортирование	3 дн. 12 ч 44 мин	1 дн. 20 ч 12 мин
	Прохождение границы	8 ч	8 ч
	Разгрузка	1 ч	1 ч
	Затраты на транспортирование	234 тыс. руб.	146 тыс. руб.
Волгоград – Бишкек (перевозка каустической соды)	Наименование	Железнодорожный транспорт	Автомобильный транспорт
	Подготовка груза к перевозке	1 дн. 12 ч 36 мин	12 ч 20 мин
	Погрузка	50 мин	42 мин
	Транспортирование	19 дн.	1 дн. 23 ч 32 мин
	Прохождение границы	8 ч	8 ч
	Разгрузка	50 мин	1 ч
	Затраты на транспортирование	300 тыс. руб.	153 тыс. руб.

Объемы экспортных поставок (79,9 тыс. т) химической продукции завода в 2020 г. составляли 76,2 % от объема внутренних поставок (104,9 тыс. т) для нужд страны и 43,2% от суммарного объема производства. Экспортные мультимодальные отправки задействуют почти половину мощности и площади склада готовой продукции и требуют своевременной и быстрой отгрузки как на автомобильный, так и на железнодорожный транспорт.

Мультимодальная перевозка – это перевозка грузов, которая осуществляется несколькими видами транспорта (сухопутный, водный и воздушный) и требует оформления единого перевозочного документа на весь путь следования. Такие перевозки получили широкое распространение в мире и показали свою высокую эффективность. В настоящей работе рассматривается организации автомобильных перевозок в международном сообщении,

с учетом рекомендаций в организации режима труда и отдыха водителей⁷.

В таблице 1 представлены характеристики звеньев международной логистической системы перевозки химической продукции по маршрутам: «Волгоград – Бишкек» и «Волгоград – Нидерланды».

Для перевозки грузов АО «Каустик» имеет собственный подвижной парк грузовых автомобилей и спецтехники. В структуре собственного грузового автопарка предприятия преобладают бортовые автомобили, самосвалы и седельные тягачи. Собственные автотранспортные средства предприятия за последние 20 лет сократились более, чем в 2 раза. В основном всю продукцию, которую производит предприятие, перевозят получателям грузовыми автомобилями с тентованным кузовом (сыпучие грузы) и в автоцистернах (жидкие грузы)⁴.

⁷ Курганов В. М. Международные перевозки: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / В.М. Курганов, Л.Б. Миротин; под ред. Л.Б. Миротина. М.: Издательский центр «Академия», 2011. 304 с.

Таблица 2

Характеристика перевозимой химической продукции
в мешках разного веса в транспортном пакете на финском паллете
Источник: составлено авторами.

Table 2

Characteristics of transported chemical products in bags of different weights
in a transport package on a Finnish pallet
Source: compiled by the authors.

Вес одного мешка, кг	Число мешков на паллете, шт.	Вес паллеты, кг	Вес транспортного пакета, кг
5	240	22	1222
19	60	22	1162
20	63	22	1282
22	56	22	1254
25	48	22	1222
30	45	22	1372

Логистам предприятия приходится решать сложные задачи, связанные с развитием собственного автопарка и передачей грузов наемному, это обязывает проводить дополнительные расчеты по формированию затрат в сравнении возможных вариантов с учетом возникновения рисков [3]. Предприятие использует для организации международных перевозок наемный транспорт, в основном седельные тягачи с полуприцепами.

Повышение эффективности перевозок зависит от организации работы погрузочно-разгрузочных пунктов. Важное значение необходимо уделять подготовке партии груза для отправки международным сообщением. В таблице 2 представлена характеристика перевозимой химической продукции в мешках разного веса в транспортном пакете на финском паллете. Рассмотрим пример загрузки полуприцепа мешками весом 30 кг с каустической содой. На первом этапе определяется характеристика транспортного пакета. Применение метода геометрической интерпретации линейного программирования (графоаналитический метод)⁸ позволило из широко распространенных видов паллет определить оптимальный финский (1200×1000), на котором был сформирован транспортный пакет, состоящий из девяти рядов, по пять мешков в каждом.

На рисунке 3 приведена разработанная

схема размещения транспортных пакетов (1200×1000×1140) с мешками (30 кг) каустической соды в автотранспортном средстве (внутренние размеры платформы 13600×2450) с учетом требований распределения веса груза по осям подвижного состава (таблица 3, 4).

Число транспортных пакетов $n_{\text{тп}}$, которое может быть загружено в автотранспортное средство, рассчитывается исходя из его номинальной грузоподъемности $q_{\text{н}}$:

$$n_{\text{тп}} = \frac{q_{\text{н}}}{q_{\text{тп}}}, \quad (1)$$

где $q_{\text{тп}}$ – вес транспортного пакета, предназначенного к перевозке, т.

Полученное значение $n_{\text{тп}}$ округляется до целого значения, которое окончательно устанавливается после графической проверки расположения транспортных пакетов на платформе полуприцепа.

Критерием правильности выбора автомобиля является величина коэффициента использования его статической грузоподъемности γ_c :

$$\gamma_c = \frac{n_{\text{тп}} \times q_{\text{тп}}}{q_{\text{н}}}, \quad (2)$$

γ_c – должен находиться в пределах от 0,9 до 1,1.

⁸ Сулименова Е. Р. Эффективные математические методы в транспортно-логистическом обслуживании малых предприятий г. Волгограда / Е. Р. Сулименова // Конкурс научно-исследовательских работ студентов Волгоградского государственного технического университета (г. Волгоград, 26–30 апреля 2021 г.): тез. докл. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.]; ВолгГТУ, Отд. координации науч. исследований молодых ученых УНИИ, Общество молодых ученых. Волгоград, 2021. 151 с.

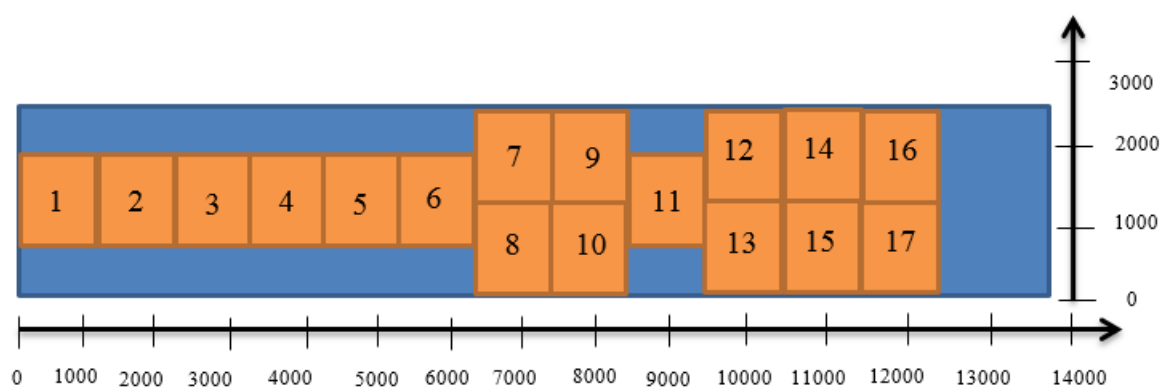


Рисунок 3 – Схема размещения транспортных пакетов с мешками каустической соды в автотранспортном средстве
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Layout of transport packages with bags of caustic soda in a motor vehicle
Source: compiled by the authors.

Таблица 3
Весогабаритные параметры автотягачей АО «Каустик»
Источник: составлено авторами.

Table 3
Weight and size parameters of auto-tractors of AO Kaustik
Source: compiled by the authors.

Марка	База автомобиля, м	Расстояние от передней оси до седельного устройства, м	Высота седельного устройства, м	Расстояние между осями тележки, м	Масса пустого автомобиля, приходящаяся на переднюю ось, т	Масса пустого автомобиля, приходящаяся на заднюю ось, т	Вес автомобиля, т
DAF95.360	3,6	3,13	1,16	-	5,225	2,19	20,5
Scania144G	3,3	3,04	1,16	-	5,08	1,69	18
IVECO 260	3,87	3,64	1,29	1,35	4,53	3,67	24,5

Таблица 4
Весовые и габаритные параметры полуприцепов АО «Каустик»
Источник: составлено авторами.

Table 4
Weight and overall parameters of semi-trailers of the AO Kaustik
Source: compiled by the authors.

Марка	Высота кузова, м	Расстояние от седла до оси тележки полуприцепа, м	Расстояние от седла до центра тяжести груза, м	Расстояние между осями тележки, м	Расстояние между осями тележки, м	Масса, приходящаяся на седло, т	Масса, приходящаяся на заднюю тележку, т	Вес полуприцепа, т
Trailor Savoyard ECO	2,79	7,69	15,1	1,301	1,301	1,41	5,52	34
Trailor Fourgon	2,79	7,69	5,12	1,301	1,301	1,3	5,76	34
Fruehauf	2,56	7,65	5,14	1,31	1,31	1,6	6,2	34

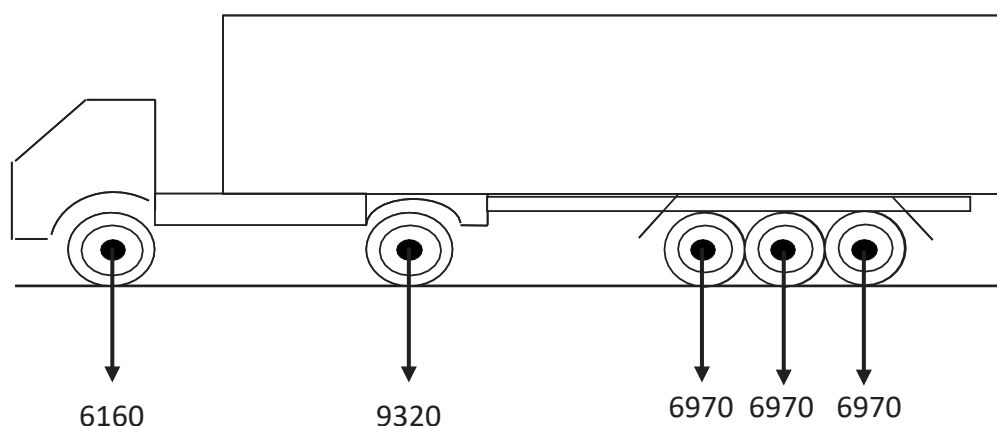


Рисунок 4 – Распределение нагрузки на оси автотранспортного средства при размещении 17 транспортных пакетов с мешками (30 кг)
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Load distribution on the axles of the vehicle when placing 17 transport packages with bags (30 kg)
Source: compiled by the authors.

Правильное размещение транспортных пакетов на платформе автотранспортного средства позволяет избежать перегруза по осям при полном использовании его грузоподъемности. Целый ряд работ посвящен изучению практического вопроса размещения грузов на платформе транспортного средства⁹ [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Используя методику, представленную в перечисленных работах, была получена оптимальная схема размещения 17 транспортных пакетов (рисунок 6) общим весом 23324 кг с каустической содой на платформе полуприцепа. Распределение нагрузки по осям представлено на рисунке 4.

Распределенная по осям нагрузка (см. рисунок 4) не превышает допустимой при организации международных перевозок, приведенная в приказе Министерства транспорта РФ от 24 марта 2022 г. № 95.

Работа погрузочного пункта характеризуется вероятностными событиями¹⁰. В таблице 5 представлены результаты статистического анализа элементов и этапов перевозочного

процесса каустической соды транспортными пакетами на финском паллете.

Этап погрузки состоит из элементов: ожидания погрузки, маневрирования подвижного состава, погрузки и оформления документов. Ожидание погрузки автотранспортного средства составляет (см. таблицу 5) 8,39 мин, погрузка – 21,47 мин, оформление документов – 12,55 мин. Общее время пребывания автомобиля в этапе погрузки лежит в пределах от 42 до 60 мин.

В транспортном цикле время выполнения этапа погрузки оказывает весомое значение при организации перевозок на небольшие расстояния, а при организации перевозок в междугородном и международных сообщениях большее влияние оказывает техническая скорость автотранспортного средства¹¹ [11, 12, 13, 14, 15, 16]. Но неправильная организация работы погрузочного пункта может вовсе привести к отказам системы или к существенным сбоям в поставках.

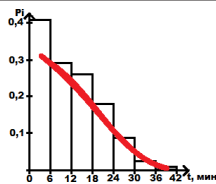
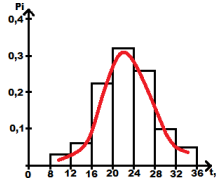
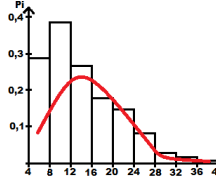
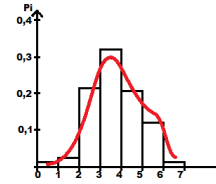
⁹ Фирсова С. Ю. Снижение транспортных затрат за счёт выбора оптимального типа поддона при перевозке строительных грузов / С. Ю. Фирсова, А. В. Куликов // Известия ВолгГТУ. Серия «Наземные транспортные системы» Вып. 6: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. Волгоград, 2013. № 10 (113). С. 86–88.

¹⁰ Грузовые автомобильные перевозки: учебник для вузов / А. В. Вельможин, В. А. Гудков, Л. Б. Миротин, А. В. Куликов. 3-е изд., испр. Москва: Горячая линия. Телеком, 2016. 560 с.

¹¹ Куликов А. В. Исследование влияния технической скорости на транспортные затраты при организации перевозок строительных грузов / А. В. Куликов, С. Ю. Фирсова // Известия ВолгГТУ. Серия «Наземные транспортные системы». Вып. 4: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. Волгоград, 2011. № 12. С. 93–96.

Таблица 5
Статистический анализ элементов и этапов перевозочного процесса каустической соды
Источник: составлено авторами.

Table 5
Statistical analysis of the elements and stages of the transportation process of caustic soda
Source: compiled by the authors.

Элемент/ этап	Математическое ожидание	Вид закона распределения	Критерий Пирсона	Гистограмма распределения
Время ожидания погрузки	$M(t_1^n) = 8,39$ мин	Показательный закон $f(t_1^n) = 0,12 \cdot e^{-0,12t}$	2,198	
Время погрузки	$M(t_3^n) = 21,47$ мин	Нормальный закон $f(t_3^n) = 0,0833e^{-0,0218(t-21,467)^2}$	1,262	
Время оформления документов	$M(t_4^n) = 12,55$ мин	Закон Эрланга 3-го порядка $f(t_4^n) = \frac{0,29(0,29t)^3}{3!} \cdot e^{-0,29t}$	19,113	
Число прибытия автомобилей в пункт погрузки	$M(A) = 2,485$ ед.	Закон Пуассона $f(A) = \frac{(2,49)^x}{x!} \cdot e^{-2,49}$	0,771	

Международные перевозки готовой химической продукции АО «Каустик» выполняются с использованием железнодорожного, речного, морского и автомобильного транспорта. Существует множество проблем и возможных их решений при организации международных перевозок¹² [17]. Мультимодальные логистические системы перевозки массовых грузов очень хорошо себя зарекомендовали в последние годы [18, 19, 20]. Возможна организация мультимодальных перевозок в Киргизию, Казахстан, Бразилию, Беларусь, Ни-

дерланды, Азербайджан и Китай. На рисунке 5 представлены возможные международные маршруты перевозки продукции автомобильным транспортом. Рассмотрены маршруты, связывающие Россию и Нидерланды, Россию и Киргизию. Маршруты составлены с учетом трассировки маршрутов¹³ [21, 22]; особенностей перевозки опасного груза [23, 24]; соблюдения режима труда и отдыха водителей при автомобильных перевозках с использованием средств бортовой телематики [25].

¹² Куликов А. В. Организация международных перевозок на примере Волгоградской области / А. В. Куликов, А. М. Брынов // Изв. ВолгГТУ. Сер. Транспортные наземные системы: Межвуз. сб. науч. статей / ВолгГТУ. Волгоград, 2004. Вып. 1, № 3. С. 132–134.

¹³ Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022616507 от 12 апреля 2022 г. Российская Федерация. Составление графа транспортной сети объектов города / А. В. Куликов, Р. В. Егоров, В. В. Шорин; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. 2022.



Рисунок 5 – Карта возможных международных маршрутов перевозки химической продукции по маршрутам «Волгоград – Бишкек» и «Волгоград – Нидерланды»
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Map of possible international routes for the transportation of chemical products on Volgograd – Bishkek and Volgograd – Netherlands routes

По направлению «Волгоград – Бишкек» разработано 3 возможных маршрута перевозки продукции: маршрут № 1: Волгоград – Астрахань – КПП «Котляевка» (Казахстан) – Кандыга-ш – Аральск – Байконур – Актобе – Мерке – КПП «Чалдовар» (Киргизия) – Бишкек (3400 км, 1 дн. 23 ч 32 мин); маршрут № 2: Волгоград – Камышин – Саратов – ПП «Погодаево» (Казахстан) – Уральск – Жымпиты – Аральск – Байконур – Актобе – Мерке – КПП «Чалдовар» (Киргизия) – Бишкек (3450 км, 2 дн. 1 ч 22 мин); маршрут № 3: Волгоград – Камышин – Саратов – ПП «Погодаево» (Казахстан) – Уральск – Жымпиты – Аральск – Байконур – Туркестан – Мерке – КПП «Чалдовар» (Киргизия) – Бишкек (3500 км, 1 дн. 22 ч 53 мин). Оптимальным по критерию наименьшего расстояния является маршрут № 1.

По направлению «Волгоград – Нидерланды» разработано 4 возможных маршрута, один из которых с использованием паромной переправы: маршрут № 1: Волгоград – Воронеж – Брянск – КПП «Звенчатка» (Беларусь) – Могилёв – Минск – ПП «Бобровники» (Польша) – Белосток – Варшава – Познань – ПП Франк-

фурт-на-Одере (Германия) – Кёнигс-Вустерхаузен – Магдебург – Ганновер – ПП Де-Поппе (Нидерланды) – Амстердам (3300 км, 1 дн. 20 ч 12 мин); маршрут № 2: Волгоград – Москва – Великие Луки – Латвия – Литва – Польша – Берлин (Германия) – Магдебург – Ганновер – ПП Де-Поппе (Нидерланды) – Амстердам (3700 км, 2 дн 41 мин); маршрут № 3: Волгоград – Москва – Смоленск – ПП «Застенки» (Беларусь) – Лошница – Минск – ПП «Бобровники» (Польша) – Белосток – Варшава – Познань – ПП Франкфурт-на-Одере (Германия) – Кёнигс-Вустерхаузен – Магдебург – Ганновер – ПП Де-Поппе (Нидерланды) – Амстердам (3400 км, 1 дн. 17 ч 43 мин); маршрут № 4 (паромный): Волгоград – Санкт-Петербург – ПА-РОМ (Санкт-Петербург – Травемюнде) – Любек (Германия) – Клоппенбург – Амстердам (Нидерланды) (3605 км, 3 дн. 12 ч 44 мин). Оптимальным по критерию наименьшего расстояния является маршрут № 1.

В таблице 6 приведен фрагмент рассчитанного графика работы водителя при турной езде. Значение технической скорости автотранспортного средства примем 55 км/ч.

Таблица 6
Фрагмент рассчитанного графика турной езды (Волгоград–Бишкек–Волгоград) 55 км/ч
Источник: составлено авторами.

Table 6
Fragment of the calculated tour schedule (Volgograd-Bishkek-Volgograd) 55 km/h
Source: compiled by the authors.

Название населенных пунктов	Расстояние, км	Итоговое расстояние, км	Время участка, ч:мин	Время работы, ч:мин	Суммарное время, ч:мин	Дни ездки, дн.
Погрузка и подготовительные работы	0	0	01:00	01:00	01:00	1-й день
Волгоград – село Грачи	162	162	2:56	3:56	3:56	
Отдых	0	162	0:15	3:56	4:11	
Село Грачи – село Восток	104	266	1:53	5:49	6:04	
Отдых	0	266	0:40	5:49	6:44	
Село Восток – Астрахань	125	391	2:16	8:05	8:00	
Отдых	0	391	0:15	8:05	8:15	
Астрахань – КПП «Котьяевка» (Казахстан)	78	469	1:25	9:30	9:40	
Отдых	0	469	0:15	9:30	9:45	
КПП «Котьяевка» (Казахстан) – село Зинеден	115	584	2:05	11:35	11:50	
Отдых	0	584	0:40	11:35	12:30	
Село Зинеден – село Аккистау	91	675	1:39	13:14	13:09	
Отдых	0	675	0:15	13:14	13:24	
Село Аккистау – село Коктогай	124	799	2:15	15:29	15:39	
Отдых	0	799	11:00	-	26:39	2-й день
Село Коктогай – село Карабау	161	960	2:55	2:55	29:34	
Отдых	0	960	0:15	2:55	29:49	
Село Карабау – село Миялы	130	1090	2:21	4:16	32:10	
Отдых	0	1090	0:40	4:16	32:50	
Село Миялы – село Сагиз	114	1204	2:04	6:20	34:54	
Отдых	0	1204	0:15	6:20	35:09	
Село Сагиз – село Караулкелды	96	1300	1:44	8:04	36:53	
Отдых	0	1300	0:15	8:04	37:08	
Село Караулкелды – г. Кандыагаш	152	1452	2:45	10:49	39:53	
Отдых	0	1459	0:15	10:49	40:08	
г. Кандыагаш – Эмба	97	1549	1:45	12:34	41:53	
Отдых	0	1549	0:40	12:34	42:33	
Эмба – село Монке Би	116	1665	2:06	14:40	44:39	
Отдых	0	1665	0:15	14:40	44:54	
Село Монке Би – Шалкар	64	1729	1:09	15:49	46:03	
..... (3-4-й день)						

Название населенных пунктов	Расстояние, км	Итоговое расстояние, км	Время участка, ч:мин	Время работы, ч:мин	Суммарное время, ч:мин	Дни ездки, дн.
Село Актобе – село Сарыкемер	127	3118	2:18	9:33	96:03	5-й день
Отдых	0	3118	0:15	9:33	96:18	
Село Сарыкемер – село Мерке	143	3261	2:36	12:09	98:54	
Отдых	0	3261	0:40	12:09	99:34	
Село Мерке – КПП «Чалдовар»	29	3290	0:31	12:40	100:05	
КПП «Чалдовар» – Бишкек	110	3400	2:00	14:40	102:05	
Разгрузка	0	3400	1:00	15:40	103:05	
Отдых	0	0	11:00	-	114:05	
Погрузка и подготовительные работы	0	0	01:00	01:00	115:05	
Бишкек – КПП «Чалдовар»	110	110	2:00	3:00	118:05	
..... (6-7-й день)						
Отдых	0	1671	11:00	-	174:11	8-й день
Шалкар – Село Монке Би	64	1735	1:09	1:09	175:20	
Отдых	0	1735	0:15	1:24	175:35	
Село Монке Би – Эмба	116	1851	2:06	3:30	177:41	
Отдых	0	1851	0:40	4:10	178:21	
Эмба – г. Кандыагаш	97	1948	1:45	5:55	180:06	
Отдых	0	1948	0:15	6:10	180:21	
г. Кандыагаш – село Караулкелды	152	2100	2:45	8:55	183:06	
Отдых	0	2100	0:15	9:10	183:21	
Село Караулкелды – село Сагиз	96	2196	1:44	10:54	185:05	
Отдых	0	2196	0:15	11:09	185:20	
Село Сагиз – село Миялы	114	2310	2:04	13:13	187:24	
Отдых	0	2310	0:40	13:53	188:04	
Село Миялы – село Карабау	130	2440	2:21	16:14	190:25	
Отдых	0	2440	0:15	16:29	190:40	
Село Карабау – село Коктогай	161	2601	2:55	19:24	193:35	9-й день
Отдых	0	2601	11:00	-	204:35	
Село Коктогай – село Аккистау	124	2725	2:15	2:15	206:50	
Отдых	0	2725	0:15	2:30	207:05	
Село Аккистау – село Зинеден	91	2816	1:39	4:09	208:44	
Отдых	0	2816	0:40	4:49	209:24	
Село Зинеден – КПП «Котьяевка» (Казахстан)	115	2931	2:05	6:54	211:29	
Отдых	0	2931	0:15	7:09	211:44	
КПП «Котьяевка» (Казахстан) – Астрахань	78	3009	1:25	8:34	213:09	
Отдых	0	3009	0:15	8:49	213:24	
Астрахань – село Восток	125	3134	2:16	11:05	215:40	10-й день
Отдых	0	3134	0:40	11:45	216:20	
Село Восток – село Грачи	104	3238	1:53	13:38	218:13	
Отдых	0	3238	0:15	13:53	218:28	
Село Грачи – Волгоград	162	3400	2:56	16:09	221:24	
Разгрузка	0	3400	1:00	17:09	222:24	

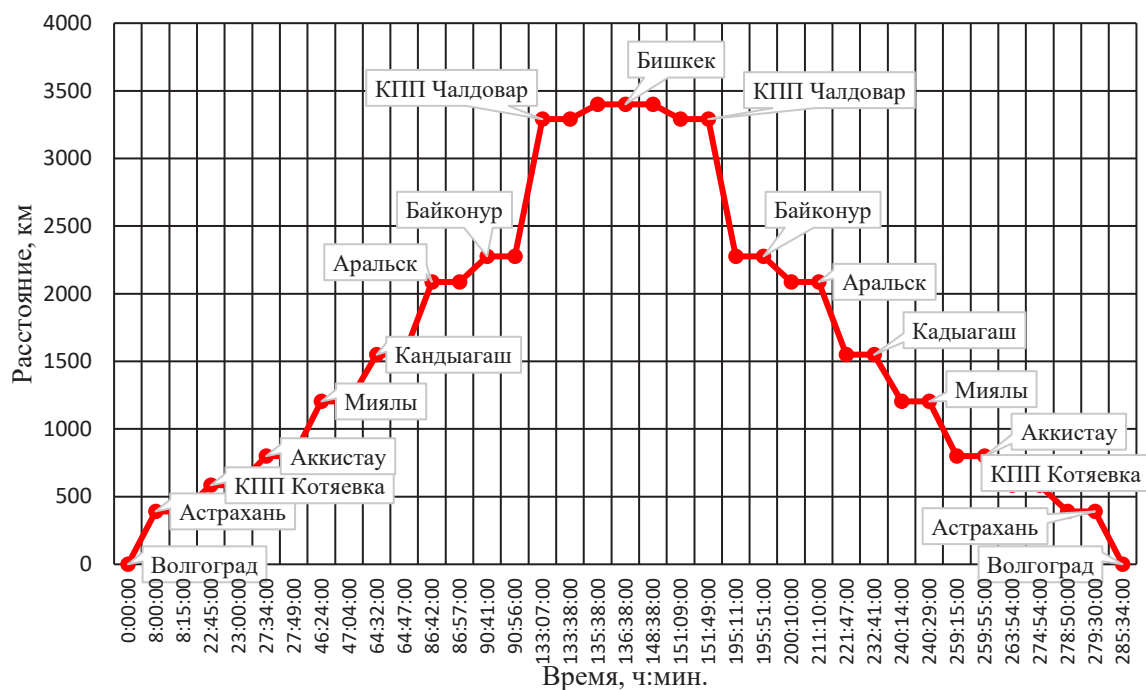


Figure 6 – Graph of the car's turnover when driving alone and at a speed of 55 km/h
Source: compiled by the authors.

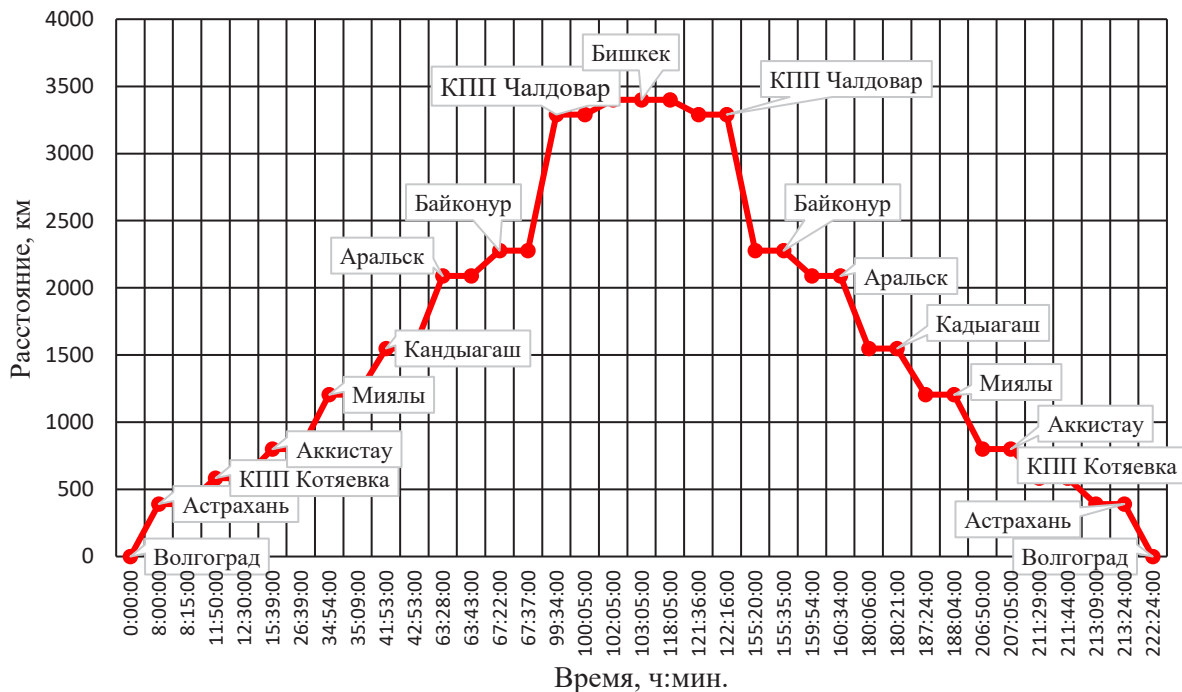


Figure 7 – A graph of the car's turnover during a tour ride and a speed of 55 km/h
Source: compiled by the authors.

На рисунках 6 и 7 представлены графики оборота автомобиля при одиночной и турной езде и скорости 55 км/ч.

Анализируя данные рисунков 6, 7 можно сделать вывод, что при скорости 55 км/ч в случае организации одиночной поездки по маршруту «Волгоград – Бишкек – Волгоград» водитель проведет в пути 11 дн. 21 ч 34 мин. В случае организации турной поездки по этому же маршруту водители проведут в пути 9 дн. 6 ч 24 мин.

Проведем расчет стоимости перевозки каустической соды по маршруту «Волгоград – Бишкек». Цена одной тонны гранулированной каустической соды составит 75 тыс. руб./т.

Себестоимость перевозки каустической соды по маршруту «Волгоград – Бишкек» определим по формуле

$$C_{\text{пер}} = \frac{Z_{\text{пер}}}{q_{\text{ф}}},$$

где $C_{\text{пер}}$ – себестоимость перевозки, руб./т;

$Z_{\text{пер}}$ – затраты на перевозку автотранспортным средством, руб.;

$q_{\text{ф}}$ – фактическая грузоподъемность автомобиля, т.

Затраты на перевозку каустической соды определим по формуле

$$Z_{\text{пер}} = \frac{L_{\text{м}}}{V_{\text{т}}} \times C_{\text{ч}} + T_{\text{отд}} \times C_{\text{ч}} + T_{\text{пр}} \times C_{\text{ч}},$$

где $Z_{\text{пер}}$ – затраты на перевозку, руб.;

$L_{\text{м}}$ – длина маршрута, км;

$V_{\text{т}}$ – техническая скорость автотранспортного средства, км/ч;

$C_{\text{ч}}$ – себестоимость грузоперевозки за 1 ч, руб./ч;

$T_{\text{пр}}$ – время погрузки-разгрузки, ч;

$T_{\text{отд}}$ – время отдыха водителя, ч.

$$1) \quad Z_{\text{пер}} = \frac{3400}{55} \times 1400 + 74 \times 1400 + 2 \times$$

$\times 1400 = 192945$ руб. – при скорости 55 км/ч, в случае одиночной поездки;

$C_{\text{пер}} = \frac{192945}{23,4} = 8246$ – себестоимость перевозки каустической соды при скорости 55 км/ч, в случае одиночной поездки.

2) $Z_{\text{пер}} = \frac{3400}{55} \times 1400 + 42,4 \times 1400 + 2 \times \times 1400 = 148705$ руб. – при скорости 55 км/ч, в случае турной поездки;

$C_{\text{пер}} = \frac{148705}{23,4} = 6355$ руб./т – себестоимость перевозки каустической соды при скорости 55 км/ч, в случае турной поездки.

Себестоимость перевозки каустической соды из г. Волгограда (России) в г. Бишкек

(Киргизия) в зависимости от способа организации работы водителей будет от 6355 до 8246 руб./т при скорости 55 км/ч.

Конечная цена 1 т продукции на складе г. Бишкека при скорости 55 км/ч (в случае организации одиночной езды) составит:

- гранулированная каустическая сода: $75000 + 8246 = 83246$ руб./т.

Конечная цена 1 т продукции на складе г. Бишкека при скорости 55 км/ч (в случае организации турной езды) составит:

- гранулированная каустическая сода: $75000 + 6355 = 81355$ руб./т.

Перевозку каустической соды автомобильным транспортом из г. Волгограда в г. Бишкек выгодно осуществлять с использованием турной езды водителей. Перевозка 1 т гранулированной каустической соды на 1891 руб. выгоднее при турной езде, чем при одиночной. Рекомендуем как лучший способ организации работы водителей – турную езду.

ВЫВОДЫ

Рассмотрена химическая промышленность России, проанализированы объемы рынка местных и зарубежных потребителей продукции химической промышленности г. Волгограда. Установлено, что основными зарубежными клиентами АО «Каустик» в 2020 г. являлись: Киргизия (3685 т), Казахстан (11150 т), Бразилия (2448 т), Беларусь (2472 т), Нидерланды (46000 т), Азербайджан (1154 т) и Китай (13000 т). Поставки продукции организуются международными мультимодальными логистическими системами.

Исследованы звенья мультимодальной логистической системы доставки продукции предприятия по маршрутам «Волгоград – Бишкек» и «Волгоград – Нидерланды». Рассмотрена работа автомобильного и железнодорожного транспорта в международной логистической системе перевозки каустической соды по маршруту «Волгоград – Бишкек».

Установлено, что в структуре собственного грузового автопарка предприятия преобладают бортовые автомобили, самосвалы и седельные тягачи. Определено, что собственный подвижной состав предприятия за последние 20 лет сократился более, чем в 2 раза.

Повышение эффективности перевозок зависит от организации работы погрузочно-разгрузочных пунктов. Подготовка партии груза для отправки международным сообщением – важный этап перевозочного процесса. Разработана схема размещения транспортных пакетов (1200×1000×1140) с мешками (30 кг)

гранулированной каустической соды на платформе полуприцепа.

Проведен статистический анализ элементов и этапов перевозочного процесса гранулированной каустической соды. Этап погрузки состоит из элементов: ожидания погрузки, маневрирования подвижного состава, погрузки и оформления документов. Ожидание погрузки автотранспортного средства составляет (см. таблицу 5) 8,39 мин, погрузка – 21,47 мин, оформление документов – 12,55 мин. Общее время пребывания автомобиля в этапе погрузки лежит в пределах от 42 до 60 мин.

Разработаны международные маршруты перевозки продукции АО «Каустик» автомобильным транспортом по маршрутам «Волгоград – Бишкек» (3 маршрута, маршрут № 1 оптимальный по критерию наименьшего расстояния) и «Волгоград – Нидерланды» (4 маршрута, маршрут № 1 оптимальный по критерию наименьшего расстояния).

При технической скорости автотранспортного средства 55 км/ч во время одиночной поездки по маршруту «Волгоград–Бишкек–Волгоград» водитель проведет в пути 11 дн. 21 ч 34 мин. Во время турной поездки по этому же маршруту водители проведут в пути 9 дн. 16 ч 23 мин. Перевозку каустической соды автомобильным транспортом из г. Волгограда в г. Бишкек при турной организации работы водителей возможно выполнить быстрее на 2 дн. 5 ч 11 мин, чем при одиночной.

Окончательная цена 1 т продукции на складе г. Бишкека с учетом начальной стоимости гранулированной каустической соды и затрат на перевозку в случае организации одиночной езды водителя составит 83246 руб./т, а при турной езде, соответственно, – 81355 руб./т. Перевозка 1 т гранулированной каустической соды на 1891 руб. выгоднее при организации турной поездки, чем при одиночной. Рекомендуем как наиболее эффективный способ организации работы водителей – турную поездку.

Эффективное функционирование автомобильного транспорта в международной логистической системе доставки каустической соды позволяет сократить время перевозки, транспортные затраты и уменьшить стоимость единицы продукции у конечного потребителя.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кулясова Е. В. Химическая промышленность в России: современное состояние и проблемы развития // Вестник университета. 2019. № 5. С. 93–100.

2. Куликов А. В., Близнякова Е. А. Исследование эффективных транспортно-логистических связей в организации международных мультимодальных перевозок минеральных удобрений // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2021. Т. 9, № 2 (53). С. 117–130. DOI: <https://doi.org/10.34220/2308-8877-2021-9-2-117-130>

3. Курганов В. М. Управление затратами на транспортировку в логистической цепи // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. 2012. № 1. С. 85–87.

4. Близнякова Е.А. Моделирование процесса перевозки меда с оптового склада в розничные магазины г. Волгограда / Е.А. Близнякова, А.В. Куликов // Архитектура, строительство, транспорт. 2022. № 2. 66-77. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-2-66-77.

5. Куликов А. В., Фирсова С. Ю., Советбеков Б. Выбор оптимальной схемы размещения транспортных пакетов с комбикормом на платформе автомобиля // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета (Бишкек). 2021. Т. 21, № 8. С. 51–57.

6. Маликов О. Б., Коровяковский Е. К., Илесалиев Д. И. Логистика пакетных перевозок штучных грузов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2014. № 4 (41). С. 51–57.

7. Илесалиев Д. И. Увеличение массы партии грузов за счет рационального выбора транспортной тары // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2018. № 1. С. 97–104.

8. Ilesaliev D., Avaz M. Research package efficiency general cargo // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2019. Т. 9. № 1. С. 6880 – 6884.

9. Тетцоева Е. М. Сложности логистической обработки транспортной тары, подобранной поставщиками для международных перевозок строительных грузов автомобильным транспортом // Управление. 2019. № 1. С. 96–104.

10. Маликов О. Б., Коровяковский Е. К., Илесалиев Д. И. Логистика пакетных перевозок штучных грузов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2014. № 4 (41). С. 51–57.

11. Витвицкий Е. Е., Федосеев Е. С. Влияние времени простоя при выполнении погрузочно-разгрузочных работ на функционирование совокупности микросистем при перевозке грузов автомобильным транспортом общего пользования // Вестник СибАДИ. 2017. № 3(55). С. 41–47.

12. Федосеев Е. С., Витвицкий Е. Е. Влияние времени простоя под погрузочно-разгрузочными работами на функционирование совокупности малых ненасыщенных систем перевозок строительных грузов автомобильным транспортом общего пользования // Вестник СибАДИ. 2017. № 56 (4-5(56-57)). С. 47 – 61.

13. Kulikov A. V., Firsova S.Y. (2020) Effectiveness of Road Transport Technology in Modern Housing Systems. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds) Proceedings

of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_874.

14. Близнякова Е.А. Исследование значимости построения вершин графа посевных полей для планирования работы автомобильного транспорта на микроуровне / Е. А. Близнякова, А. В. Куликов // Мир транспорта и технологических машин. 2022. № 3-3 (78). 44-52.

15. Витвицкий Е. Е., Юрьева Н. И. Практика оперативного планирования затрат на перевозку грузов в городах // Вестник СибАДИ. 2012. № 6 (28). С. 18–25.

16. Юсупова О. А. Анализ качества обслуживания грузоотправителей-частных лиц // Мир транспорта. 2020. № 2. С. 214–224.

17. Острецов Д. А. Проблемы грузоперевозок в России и пути их решения // Наука без границ. 2016. № 1. С. 27–30.

18. Куликов А. В., Близнякова Е. А., Павлов П. А., Куликов А. А. Совершенствование организации функционирования автомобильного транспорта в мультимодальной логистической системе поставки зерна из Волгоградской области в Иран // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 5 (87). С. 692–715. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-692-715>

19. Никулин Е. В., Стародубцева О. А. Особенности использования мультимодальных перевозок // Наука и современность. 2015. С. 148–152.

20. Филиппова Н. А., Каримова П. А. Иерархические уровни управления мультимодальной транспортной системой для перевозки грузов северного завоза // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. 2019. Т.59, № 4. С. 99–102.

21. Демин В. А., Ойрих С., Ефименко Д. Б. Модель определения оптимальных траекторий перемещения партий грузов // Мир транспорта. 2019. 17(2). С. 56–62.

22. Близнякова Е. А., Куликов А. А., Куликов А. В. Сравнительный анализ методов поиска кратчайшего пути в графе // Архитектура, строительство, транспорт. 2022. № 1. С. 80–87. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-1-80-87.9.

23. Петров Г. В., Таран И. С. Особенности перевозки опасных грузов автомобильным транспортом // Научно-практические исследования. 2020. № 12-3 (35). С. 44–47.

24. Дугин Г. С. Перевозка опасных грузов во внутреннем и международном сообщениях // Вестник транспорта. 2006. № 8. С. 34–37.

25. Ледовский А. А., Филатов С. А., Дубровская Е. И. Анализ практики контроля соблюдения режима труда и отдыха водителей при автомобильных перевозках с использованием средств бортовой телематики // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2018. № 3 (54). С. 107–114.

REFERENCES

1. Kuljasova E. V. Himicheskaja promyshlennost' v Rossii: sovremennoe sostojanie i problemy razvitiya [Chemical industry in Russia: the current state and problems of development]. *Vestnik universiteta*. 2019; 5: 93–100. (In Russ.)

2. : Kulikov A. V., Bliznyakova E. A. (2021) Research of effective transport and logistics links in the organization of international multimodal transport mineral fertilizers. Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika [Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice], Vol. 9, No. 2 (53), pp. 118-131 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/2308-8877-2021-9-2-117-130>.

3. Kurganov V. M. Upravlenie zatratami na transportirovku v logisticheskoy cepi [Transportation cost management in the logistics chain]. *RISK: Resursy, Informacija, Snabzhenie, Konkurencija*. 2012; 1: 85-87. (In Russ.)

4. Bliznyakova E. A., Kulikov A. V. Modelirovanie processa perevozki meda s optovogo sklada v roznichnye magaziny g. Volgograda. [Transportation cost management in the logistics chain]. *Arhitektura, stroitel'stvo, transport*. 2022; 2: 66-77. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-2-66-77. (in Russ.)

5. Kulikov A. V., Firsova S. Ju., Sovetbekov B. V. Vybora optimal'noj shemy razmeshheniya transportnyh paketov s kombikormom na platforme avtomobilja [Choosing the optimal layout of transport packages with mixed feed on the car platform]. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossijskogo slavyanskogo universiteta (Bishkek)*. 2021; 21. no. 8: 51-57.

6. Malikov O.B., Korovjakovskij E.K., Ilesaliev D.I. Logistika paketnyh perevozok shtuchnyh грузов [Logistics of package transportation of piece goods]. *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija*. 2014; 4 (41): 51–57. (in Russ.)

7. Ilesaliev, D. I. Uvelichenie massy partii грузов za schet racional'nogo vybora transportnoj tary [The increase in the mass of the cargo lot due to the rational choice of transport containers]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Brjanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2018; 1: 97 – 104. (in Russ.)

8. Ilesaliev D., Avaz M. Research package efficiency general cargo. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2019; T. 9. № 1: 6880 – 6884.

9. Tetcoeva E. M. Slozhnosti logisticheskoy obrabotki transportnoj tary, podbrannoju postavshhikami dlja mezhdunarodnyh perevozok stroitel'nyh грузов avtomobil'nyim transportom [Difficulties of logistics processing of transport containers selected by suppliers for international transportation of construction goods by road]. *Upravlenie*. 2019; 1: 96–104. (in Russ.)

10. Malikov O. B., Korovjakovskij E. K., Ilesaliev D. I. Logistika paketnyh perevozok shtuchnyh грузов [Logistics of package transportation of piece goods]. *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija*. 2014; 4 (41): 51–57. (in Russ.)

11. Vitvitskiy E.E., Fedoseenkova E.S. Influence of loading and unloading time on functioning complex of microsystems in transit freights public motor transport. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017;(3(55)):41-47. (In Russ.) [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-3\(55\)-41-47](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-3(55)-41-47)

12. Fedoseenkova E.S., Vitvitskiy E.E. The influence of time loading and unloading on functioningst complexes of small autotransport systems cargo transportation by transport of common use. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017;56(4-5(56-57)):47-61. (In Russ.) [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-4-5\(56-57\)-47-61](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-4-5(56-57)-47-61)

13. Kulikov A. V., Firsova S.Y. (2020) Effectiveness of Road Transport Technology in Modern Housing Systems. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds) Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_874.

14. Bliznyakova E. A., Kulikov A. V. Issledovanie znachimosti postroeniya vershin grafa posevnykh polej dlja planirovaniya raboty avtomobil'nogo transporta na mikrourovne [Investigation of the significance of constructing the vertices of the graph of sowing fields for planning the operation of motor transport at the micro level]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. 2022. № 3-3 (78). 44-52. (in Russ.)

15. Vitvickij E. E., Jur'eva N. I. Praktika operativnogo planirovaniya zatrat na perevozku грузов v gorodakh [Practice of operational cost planning for cargo transportation in cities]. *Vestnik SibADI*. 2012; 6 (28):18–25. 12. (in Russ)

16. Jusupova O. A. Analiz kachestva obsluzhivaniya gruzootpravitelej-chastnykh lic [Analysis of the quality of shippers' service-individuals]. *Mir transporta*. 2020; 2: 214–224. (in Russ)

17. Ostrecov D. A. Problemy gruzoperevozok v Rossii i puti ih resheniya [Problems of cargo transportation in Russia and ways to solve them]. *Nauka bez granic*. 2016; 1: 27–30. (in Russ)

18. Kulikov A.V., Bliznyakova E.A., Pavlov P.A., Kulikov A.A. Improvement of organisation for road transport functioning in a multimodal logistics system for grain delivery from Volgograd region to Iran. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022;19(5):692-715. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-692-715>

19. Nikulin E. V., Starodubceva O. A. Osobennosti ispol'zovaniya mul'timodal'nykh perevozok [Features of the use of multimodal transportation]. *Nauka i sovremennost'*. 2015:148–152. (in Russ.)

20. Filippova N. A., Karimova P. A. Ierarhicheskie urovni upravleniya mul'timodal'noj transportnoj sistemoy dlja perevozki грузов severnogo zavoza [Hierarchical levels of management of a multimodal transport system for the transportation of goods of northern import]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019; T.59, № 4: 99–102. (in Russ.)

21. Demin V. A., Ojrih S., Efimenko D. B. Model' opredeleniya optimal'nykh traektorij peremeshheniya partij грузов [A model for determining optimal trajectories of moving shipments]. *Mir transporta*. 2019; 17(2): 56–62. (in Russ.)

22. Bliznyakova, E. A., Kulikov, A. A., & Kulikov, A. V. (2022). Comparative analysis of methods for finding the shortest distance in a graph. *Architecture, construction, transport* (1): 80-87. (In Russian). DOI: 10.31660/2782-232X-2022-1-80-87.

23. Petrov, G. V., Taran I. S. Osobennosti perevozki opasnykh грузов avtomobil'nyim transportom [Features of transportation of dangerous goods by road / G. V. Petrov, I. S. Taran // Scientific and practical research]. *Nauchno-prakticheskie issledovaniya*. 2020;12-3 (35): 44 – 47.

24. Dugin, G. S. Perevozka opasnykh грузов vo vnutrennem i mezhdunarodnom soobshhenijah [Transportation of dangerous goods in domestic and international communications]. *Vestnik transporta*. 2006; 8:34–37. (in Russ.)

25. Ledovskij A. A., Filatov S. A., Dubrovskaja E. I. Analiz praktiki kontrolja sobljudenija rezhima truda i otdyha voditelej pri avtomobil'nykh perevozkah s ispol'zovaniem sredstv bortovoj telematiki [Analysis of the practice of monitoring compliance with the work and rest regime of drivers in road transport using on-board telematics]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2018; 3 (54):107–114

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Куликов А. В. Разработка методики повышения эффективности функционирования автомобильного транспорта в мультимодальных логистических системах при организации перевозок химической продукции из Волгоградской области в ближнее и дальнее зарубежье. Постановка цели и задач исследований, анализ полученных результатов.

Павлов П. А. Анализ статистических данных развития химической промышленности региона. Выполнение графоаналитических расчетов для правильного формирования транспортных пакетов и оптимальной загрузки платформы автотранспортного средства. Проведение расчетов, оформление таблиц и рисунков. Обзор литературных источников.

Куликов А. А. Составление маршрутов перевозок химической продукции в страны ближнего и дальнего зарубежья из г. Волгограда. Проведение расчетов, оформление таблиц и рисунков. Обзор литературных источников.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Alexey V. Kulikov. Development of a methodology for improving the efficiency of motor transport in multimodal logistics systems in the organization of transportation of chemical products from the Volgograd region to the near and far abroad. Setting goals and objectives of research, analyzing the results obtained.

Pavel A. Pavlov. Analysis of statistical data on the development of the chemical industry in the region. Performing graph-analytical calculations for the correct formation of transport packages and optimal loading of the vehicle platform. Making calculations, making tables and figures. Review of literary sources.

Andrey A. Kulikov. Drawing up routes for transportation of chemical products to the countries of the near and far abroad from Volgograd. Making calculations, making tables and figures. Review of the literary sources.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Куликов Алексей Викторович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Автомобильные перевозки».

Павлов Павел Алексеевич – магистрант кафедры «Автомобильные перевозки», директор ООО «АЛЬФА ТРЕЙД».

Куликов Андрей Алексеевич – студент кафедры «Автомобильные перевозки».

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey V. Kulikov – Dr. of Sci., Associate Professor, Automobile Transportation Department.

Pavel A. Pavlov – Master's student of Automobile Transportation Department, director of ООО ALFA TRADE.

Andrey A. Kulikov – Student of the Automobile Transportation Department.

УДК 656.132
 DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-878-889>
 EDN: VCHNDK
 Научная статья



АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУБЪЕКТОВ ПАССАЖИРСКИХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК

И. И. Любимов*, Н. Н. Якунин, Н. В. Якунина
 Оренбургский государственный университет
 г. Оренбург, Россия

lyubimovii@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-0057-8537>
 yakunin-n@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6282-2331>
 nat.yakunina56@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8895-1307>
 *ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Авторами рассматриваются существующие модели организации городских пассажирских автомобильных перевозок, структура каждой из моделей и их характеристики. Причиной написания работы послужила слабая изученность факторов, определяющих безубыточную перевозку пассажиров и, как следствие, построение на этой основе системы взаимодействия транспортных властей и транспортных операторов. Таким образом, цель исследования заключается в создании моделей взаимодействия субъектов и объектов пассажирских автомобильных перевозок. Рабочая гипотеза исследования состоит в преодолении существующей фрагментарности моделей за счёт разработки дополнительных блоков, содержания, одним из которых является научно обоснованный выбор моделей взаимодействия участников транспортного процесса в системе пассажирских автомобильных перевозок.

Методы и материалы. Проанализированы три существующие модели организации работы пассажирских автомобильных перевозок с учётом их влияния на экономическую эффективность и безопасность транспортного процесса. Определены предпосылки к созданию алгоритмов перехода от одной модели к другой и оценки их эффективности.

Результаты. По мнению авторов, данное исследование будет полезно как организаторам пассажирских автомобильных перевозок, так и перевозчикам. С практической точки зрения данное исследование будет полезно для повышения эффективности и безубыточности пассажирских автомобильных перевозок, а также для максимальной «прозрачности» финансового взаимодействия между участниками данного рынка.

Обсуждение и заключение. Дальнейшее направление исследований по данной тематике будет выполнено в направлении разработки методики переключения моделей между собой, т.е. когда и как целесообразно применять ту или иную модель пассажирских автомобильных перевозок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автомобильный транспорт, пассажирский транспорт, организация пассажирских перевозок.

Статья поступила в редакцию 03.05.2022; одобрена после рецензирования 18.11.2022; принята к публикации 19.12.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Любимов И. И., Якунин Н. Н., Якунина Н. В. Анализ моделей взаимодействия субъектов пассажирских автомобильных перевозок // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 6 (88). С. 878-889. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-878-889>

© Любимов И. И., Якунин Н. Н., Якунина Н. В., 2022



Контент доступен под лицензией
 Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-878-889>

EDN: VCHNDK

ANALYSIS FOR MODELS OF INTERACTION BETWEEN ROAD PASSENGER TRANSPORT OPERATORS

Igor I. Lyubimov*, Nikolai N. Yakunin, Natalia V. Yakunina

Orenburg State University

Orenburg, Russia

lyubimovii@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-0057-8537>

yakunin-n@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6282-2331>

nat.yakunina56@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8895-1307>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The authors consider the current models for the organization of urban passenger road transport, the structure of each of the models and their characteristics. The reason for writing the work was the poor study of the factors that determine the break-even transportation of passengers and, as a result, the construction on this basis of a system of interaction between transport authorities and transport operators. Thus, the purpose of the study is to create models of interaction between subjects and objects of passenger road transport. The working hypothesis of the study is to overcome the existing fragmentation of models through the development of additional blocks, the content of which is a scientifically based choice of models for the interaction of participants in the transport process in the system of passenger road transportation.

Methods and materials. Three existing models for organising the work of passenger road transport are analysed. Their influence on the economic efficiency and safety of the transport process is considered. The prerequisites for the creation of algorithms for the transition from one model to another and for evaluating their effectiveness are determined.

Результаты. According to the authors, this study will be useful for both the organizers of passenger road transport and carriers. From a practical point of view, this study will be useful to improve the efficiency and break-even of passenger road transport, as well as to maximize the 'transparency' of financial interaction between participants in this market.

Обсуждение и заключение. Further direction of research on this topic will be carried out in the direction of developing a methodology for switching models between themselves, i.e. when and how it is expedient to apply one or another model of passenger road transportation.

KEYWORDS: road transport, passenger transport, organisation of passenger transportation.

The article was submitted 03.05.2022; approved after reviewing 18.11.2022; accepted for publication 19.12.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Lyubimov I. I., Yakunin N. N., Yakunina N. V. Analysis for models of interaction between road passenger transport operators. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (6): 878-889. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-878-889>

© Lyubimov I. I., Yakunin N. N., Yakunina N. V., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

Обзор литературных источников показал, что на сегодня проблемой взаимодействия различных моделей управления пассажирскими автомобильными перевозками занимаются не только российские, но и зарубежные учёные. Научные коллективы достигли определённых успехов в этом направлении, но эти исследования разобщены и фрагментарны. Частичное преодоление сложившейся фрагментарности составляет научную значимость решения указанной проблемы. Планируемые результаты представляют собой дополнительные знания в сфере технологии, организации и управления транспортными процессами пассажирских автомобильных перевозок, транспортных процессов и систем, автоматического управления. Решение описанной научной проблемы будет являться базой для последующих научных исследований в области эксплуатации автомобильного транспорта и других смежных научных областях. В чистом виде научное направление – эксплуатация автомобильного транспорта не может развиваться отдельно от современных информационных технологий, системного анализа и экономической теории.

Однако условия, при которых следует применять конкретную модель, не изучены. В этой связи тема предлагаемого исследования является актуальной. Назрела необходимость создания современной цифровой интеллектуальной технологии, которая бы выступала надёжным помощником государственным и муниципальным транспортным властям в выборе, контроле и управлении городскими автомобильными пассажирскими перевозками.

Обзор литературы. Для функционирования всех сфер экономической деятельности страны необходимо их надёжное обеспечение ресурсами. С этой задачей в настоящее время и на далёкую перспективу успешно справляется пассажирский автомобильный транспорт, который является неотъемлемой частью экономики не только Российской Федерации, но и любой другой мировой державы, и это утверждение доказано и обосновано многими авторами [1, 3, 4, 5, 6, 7].

Пассажирский автомобильный транспорт является составной частью автотранспортных систем, на его функционирование распространяются их общие положения. Понятие автотранспортной системы объединяет совокупность производств и организаций, направленных на создание, обеспечение, функционирование и развитие производства автомобилей, эксплуатацию автомобилей в

соответствии с их назначением и поддержание в работоспособном состоянии, капитальное строительство объектов транспортной инфраструктуры, материально-техническое обеспечение транспорта.

В данной области знаний проведено достаточное количество научных исследований в разрезе влияния пассажирского автомобильного транспорта на автотранспортные системы различных стран, которые рассмотрены в работах авторов [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28].

Труды этих авторов составляют общую методологию автотранспортной системы страны, основы взаимодействия автомобильного транспорта с другими видами деятельности.

Рабочая гипотеза исследования заключается в возможности нахождения оптимума в процессе выбора различных моделей управления процессом организации пассажирских автомобильных перевозок и критериев, на основании которых осуществляется переход от одной модели к другой.

Научная новизна. Исходя из анализа литературных источников [8, 13, 16, 25, 26, 27, 28], можно сделать вывод о том, что в целом рассматриваемая авторами интерпретация системы управления городским пассажирским автомобильным транспортом является новой задачей для транспортной отечественной и зарубежной науки. Этот факт обусловлен отсутствием на сегодняшний день консолидированной системы управления моделями бизнес-процессов пассажирских автомобильных перевозок как в Российской Федерации, так и за рубежом. Существуют отдельные системы, имеющие ряд недостатков, один из которых – отсутствие методологии, способной объединить технико-экономические и организационно-технологические модели взаимодействия участников транспортного процесса, построенные на принципах безубыточности; модели переключения такого взаимодействия; алгоритмическое и методическое обеспечение для последующего создания современных интеллектуальных систем в управлении пассажирскими автомобильными перевозками.

Практическая значимость работы для развития данной тематики состоит в создании дополнительного знания в сфере технологии, организации и управления транспортными процессами, пассажирских автомобильных перевозок, транспортных процессов и систем, автоматического управления. Полученные теоретические положения должны быть использованы для последующего создания современных интеллектуальных систем в

управлении пассажирскими автомобильными перевозками. Кроме того, разрабатываемая тематика должна стать органическим продолжением и дополнением к уже имеющимся интеллектуальным системам в области автомобильного транспорта, что позволит частично преодолеть отсутствие целостности цифровой платформы в сфере пассажирских автомобильных перевозок.

Опыт зарубежных стран. Количество поездок на общественном транспорте в год на одного жителя существенно отличается в различных странах – от 237 поездок в Швейцарии до 21 поездки в США. Такая разница в значительной степени определена уровнем развития других видов транспорта. Так, низкая популярность общественного пассажирского транспорта в США определена высоким уровнем использования населением личных автомобилей. Ближайшая к США страна по числу поездок на душу населения – Нидерланды, имеет 51 поездку в год, более чем в 2 раза большую, чем в США. Такой результат обусловлен большой интенсивностью велосипедных перемещений в Нидерландах, которые составляют 26% от всех поездок [2].

В европейских странах доля использования общественного транспорта намного выше, чем в США. Но и в пределах стран Евросоюза есть значительные отличия. Проведённые исследования выявили следующие закономерности – большой спрос на общественный транспорт в Европе вызван высокой степенью урбанизации, более высокими налогами на топливо и покупку автомобиля, меньшими возможностями автомобильной парковки (и более высокими ценами на них) и большим количеством ограничений на использование автомобилей в городах.

Кроме того, европейские города предлагают услуги общественного транспорта в большем объёме, чем в США. Альтернативный индикатор спроса общественного транспорта – доля выбора поездок на общественном транспорте¹.

В настоящее время в Евросоюзе отсутствует единая регламентация в организации перевозок пассажиров общественным транспортом. Но в большинстве стран и городов отмечается главная тенденция – растущее использование контрактного предоставления права перевозок заинтересованным органи-

зациям и фирмам и преобладание определённых форм конкурса на присуждение права перевозчикам перевозить пассажиров. Эти формы часто классифицируются по терминам «конкурс на дороге» и «конкурс вне дороги». Организационные формы, существующие сегодня в разных странах, отличаются большим разнообразием, чем предполагаемые упомянутыми двумя категориями конкурсов. Перевозчики могут осуществлять перевозки по своему усмотрению в рамках «конкурса на дороге», властные органы транспортной отрасли, напротив, могут предписывать, какие услуги должны быть осуществлены по «конкурсу вне дороги». Такие рамки значительно варьируются по внедрению: от полностью предписанных расписаний до функционально описанных уровней обслуживания.

Типы и формы заключения контрактов в сфере общественного транспорта в разных зарубежных странах и городах укрупненно можно разделить на три группы:

- 1) присуждение контракта на основе простого конкурса (тендера);
- 2) присуждение контракта на основе конкурса (тендера) по многокритериальной процедуре;
- 3) прямая процедура присуждения контракта [2].

К первой группе относится форма заключения контракта (тендера), основанная на одном критерии, например, минимальной стоимости проезда. Транспортный департамент определяет количество транспорта и социально-политические цели, которые служат для планирования структуры собственного транспортного парка, организует тендер и работу по контракту для реализации перевозочных услуг. Используются конкурентоспособные процедуры, операторам предоставляются контракты на большую стоимость. Эта организационная форма существует во многих городах Франции, Великобритании и других странах [2].

Ко второй группе относится форма заключения контракта с условиями соблюдения многих требований. Данная форма регулируется стандартами обслуживания, определёнными властью, которая организует тендер на услуги для всего региона или города. Эта организационная форма чаще допускает использование стимулирующих механизмов для операторов [2].

¹ Якунина Н. В. Методика повышения качества пассажирских перевозок автомобильным транспортом на регулярных маршрутах: дис. ... др. тех. наук: 05.22.10. Оренб. государственный университет, Оренбург. 2015. 438 с.

К третьей группе относится форма прямого заключения контракта. Такая организационная форма характерна при привлечении муниципалитетом к пассажирским перевозкам собственных транспортных компаний или имеющих долю в них (внутренние операторы). Внутренние операторы (или принадлежащие государству) широко распространены в сфере городского общественного транспорта в Европе. Однако их юридические основы в разных странах могут сильно отличаться друг от друга. Существование операторов, принадлежащих государству, с юридической точки зрения может быть основано на монополии предоставления услуг в сфере общественного транспорта, которая предоставляется властью в рамках национального (или регионального) законодательства [2].

Важный этап внедрения контрактной системы – обеспечение контроля со стороны заказчика транспортных услуг за соблюдением перевозчиками условий договора на основе создания единой компьютерной сети.

Для конкурсного присуждения контракта по многокритериальной процедуре также характерно, что основную долю муниципалитетов, использующих данную форму, составляют малые и средние города. Прямую процедуру присуждения контракта проводят, как правило, в крупных городах Европы [2].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Использованы общенаучные теории и методы: анализ и синтез использовался для расчленения моделей функционирования пассажирских перевозок, образующих их части; математическая статистика применялась авторами для исследования закономерностей процессов автомобильных пассажирских перевозок по данным, полученным из экспериментального наблюдения за ними, с целью получения вероятностно-статистических моделей случайных явлений, входящих в различные модели осуществления пассажирских перевозок, системный анализ был применён для используемых для подготовки и обоснования решений по проблемам перехода от одной модели перевозок к другой; пассажирских автомобильных перевозок для изучения процесса, в результате которого с помощью автомобилей осуществляется перемещение пассажиров и их багажа из пункта отправления в пункт назначения; транспортных процессов и систем для изучения особенностей транспортных систем и более подробного раскрытия таких основополагающих понятий транспортных

систем как транспортные сети и транспортные процессы: автоматического управления – при построении графических моделей взаимодействия субъектов пассажирских автомобильных перевозок объектов их совокупности, устройства и управления, обеспечивающих автоматическое выполнение технологических процессов пассажирских автомобильных перевозок.

Предлагается применить следующий подход. К настоящему времени существуют современные интеллектуальные системы в области пассажирских автомобильных перевозок. Каждая из этих систем решает ограниченный круг задач, а их совокупность не образует единой целостности, позволяющей решать вопросы проектирования, организации и контроля транспортного процесса. Для достижения такой целостности не достаёт важных блоков, содержанием одного из которых является научно обоснованный выбор моделей взаимодействия участников транспортного процесса в системе пассажирских автомобильных перевозок. Причиной отсутствия такого блока является слабая изученность факторов, определяющих безубыточную перевозку пассажиров, построение на этой основе системы взаимодействия транспортных властей и транспортных операторов. К настоящему времени существуют три модели организации пассажирских автомобильных перевозок. Их влияние на экономическую эффективность и безопасность транспортного процесса существенно отличается. Однако условия, при которых следует применять конкретную модель, не изучены.

Традиционная модель имеет широкое распространение и несколько важных особенностей. Первая состоит в наличии противоречия между направленностью перевозчика извлекать наибольшую прибыль из транспортного процесса и требованиями пассажиров получать качественную, прежде всего безопасную услугу. Качество и безопасность перевозок является затратной статьёй для перевозчика. Перевозчик вынужден нести дополнительные затраты, уменьшая тем самым свою прибыль, для удовлетворения требований пассажиров и только в случае, если эти требования носят нормативный характер, и чтобы быть допущенным к транспортному процессу. Вторая особенность такой модели состоит в том, что основная часть финансовых рисков при перевозке пассажиров возлагается на систему «Водитель–пассажир». Плата взимается в наличной форме, впоследствии расходует водителем на оплату аренды автомобиля,

поддержание его в исправном техническом состоянии, на приобретение эксплуатационных материалов. Оставшуюся часть выручки водитель имеет в качестве материального вознаграждения за свой труд. В такой ситуации водитель мотивирован на получение наибольшей выручки, все остальные обстоятельства транспортного процесса, в том числе качество и безопасность, не являются первоочередными. Третья особенность состоит в том, что перевозки осуществляются по нерегулируемым тарифам. Величину тарифов назначает перевозчик исходя из своих технико-экономических показателей. В результате действия такой модели технико-экономические показатели перевозок носят мало предсказуемый характер не только в плане экономических характеристик, но и в плане качества и безопасности транспортного процесса. Эту модель можно назвать как «Модель 90-х годов». На рисунке 1 приведена схема данной модели.

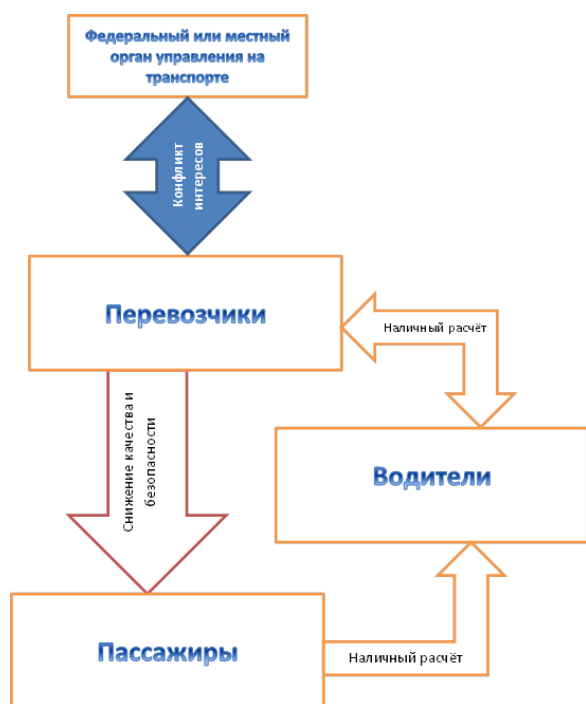


Рисунок 1 – Схема «Модель 90-х годов»
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Model 90s scheme
Source: compiled by the authors.

Существуют модели организации пассажирских автомобильных перевозок, способные устранить названные проблемы. Основным признаком этих моделей является то, что они экономически мотивируют перевозчика оказывать качественные, прежде всего безопасные услуги. В таких моделях органы управ-

ления на транспорте оплачивают перевозчику часть недополученных им доходов в зависимости от установленных показателей перевозок. Перевозки осуществляются по регулируемым тарифам, величину которых определяют региональные власти. Взимание платы с пассажира осуществляется в безналичной форме, что делает прозрачным не только финансовые потоки, но позволяет иметь актуальную информацию для совершенствования перевозок. В таких моделях финансовые риски отнесены на уровень транспортных властей, и их величина определяется точностью технологического проектирования перевозок. В зависимости от траектории финансовых потоков следует отметить две модели. Первая модель, известная под названием «Брутто-модель», предполагает аккумуляцию всей выручки перевозчика на отдельных счетах, принадлежащих транспортным властям, с последующим перечислением перевозчику в соответствии с полнотой и качеством выполнения транспортной работы. Схема «Брутто-модели» представлена на рисунке 2.

Вторая модель, которую предлагается назвать «Нетто-модель» (рисунок 3), состоит в том, что выручка перечисляется сразу на счёт перевозчика и по результатам его деятельности транспортные власти перечисляют часть выпадающих доходов перевозчику в соответствии с достигнутыми показателями.



Рисунок 2 – Брутто-модель
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Gross model
Source: compiled by the authors.



Рисунок 3 – Нетто-модель
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Net model
Source: compiled by the authors.

Направления дальнейших исследований состоят в применении приведённой методики к пассажирским автомобильным перевозкам для развития системы управления региональными транспортными системами.

Результаты работы рекомендованы транспортным властям регионов для объективного оценивания роли пассажирских автомобильных перевозок в социально-экономическом развитии регионов, а также органам образования регионов для совершенствования системы подготовки персонала автотранспортной отрасли.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве ожидаемого результата подразумевается теоретическая и методологическая база для создания цифровой платформы, восполняющей существующий пробел в системе управления безубыточными пассажирскими автомобильными перевозками, основанной на методологии переключения моделей взаимодействия участников транспортного процесса.

Существующие модели взаимодействия участников транспортного процесса в различной степени определяют качество, прежде всего безопасность, и эффективность транспортного процесса. Одни модели переносят финансовые риски транспортного процесса на

уровень взаимодействия водителя и пассажира и в наименьшей степени распространяются на владельца транспортного средства, перевозчика, органов управления на транспорте. Эта модель определяет многочисленные негативные последствия. Другая модель подразумевает перевозки по регулируемым тарифам, переносит финансовые риски на уровень организатора транспортного процесса. Минимизация этих рисков может быть обеспечена за счёт высокой точности проектирования транспортного процесса. Достижение высокой точности обеспечит минимальные финансовые риски со стороны регионального или муниципального бюджетов при одновременном преодолении существующей плачевной ситуации с безопасностью и эффективностью пассажирских автомобильных перевозок. Основное теоретическое содержание работы состоит в изучении условий, при которых возможен переход от существующей модели к более совершенному управлению.

На рисунке 4 представлена разработанная авторами приоритетность выбора той или иной модели. В качестве критериев выбора модели выступают: безналичный расчёт, точность планирования перевозок, безопасность перевозок, качество перевозок, коррупционная составляющая деятельности перевозчиков.



Рисунок 4 – Иерархия приоритетности моделей
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Priority hierarchy of models
Source: compiled by the authors.

Таблица
Сравнение свойств моделей
Источник: составлено авторами.

Table
Comparison of model properties
Source: compiled by the authors.

Критерий \ Наименование модели	Брутто-модель	Нетто-модель	Модель 90-х
Наличный расчёт за проезд	нет	да/нет	да/нет
Экономическая заинтересованность перевозчика в качественных перевозках	да	да	нет
Высокое качество и безопасность перевозок	да	да/нет	нет
Точность планирования перевозок	да	да/нет	да/нет
Прозрачность выполнения задания на транспортную работу	да	да/нет	нет
Обоснованность размеров бюджетных компенсаций выпадающих доходов перевозчикам при применении регулярных тарифов	да	нет	нет
Коррупционная составляющая деятельности перевозчиков	нет	да	да



Рисунок 5 – Структура интеллектуальной системы управления пассажирскими автомобильными перевозками
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – The structure of an intelligent control system for passenger road transport
Source: compiled by the authors.

Соответственно, чем ближе значения критерия приоритетности к «1», тем модель эффективнее, и, наоборот, чем ближе значения критерия приоритетности к «0», тем модель менее эффективна.

В таблице представлено разработанное распределение критериальности выбора по моделям.

Анализ критериальности выбора моделей указывает на очевидные преимущества Брутто-модели, которая в наибольшей степени соответствует предъявляемым требованиям при одновременном устранении коррупционной составляющей деятельности перевозчиков.

Приведённые модели (см. рисунки 1, 2, 3) имеют высокую практическую значимость. Однако уровень их формализации недостаточен для построения цифровой платформы управления пассажирскими автомобильными перевозками. Задачу формализации предполагается решить на уровне рассмотренных организационно-технологических моделей. Кроме того, остаются неизученными условия, при которых возможно применять конкретную модель.

Решить обозначенные задачи можно при помощи современной цифровой платформы пассажирских автомобильных перевозок. Для этого необходимо создать интеллектуальную систему управления пассажирскими автомобильными перевозками, которая позволит осуществлять выбор той или иной модели в автоматизированном режиме с частичным участием человека и при его непосредственном контроле.

Авторами разработана структура (рисунок 5) предлагаемой интеллектуальной системы управления пассажирскими автомобильными перевозками.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бондаренко Е. В., Гончаров А. А., Горлатов С. Е., Любимов И. И., Манаев К. И., Мельников А. Н., Трубин Н. А. Концепция управления муниципальными автомобильными перевозками [Электронный ресурс] // Мир транспорта и технологических машин. 2015. № 2 (49). С. 110-116.
2. Якунина Н. В., Кабанова О. В., Фот А. П. Анализ состояния пассажирских перевозок общественным транспортом в зарубежных странах и контрактная политика в перевозках [Электронный ресурс] // Транспорт Урала, 2013. № 3 (38). С. 84-88.
3. Lyubimov I., Melnikov A., Trubin, N. The control system improvement of the city motor transportation. *Procedia Engineering*. 2016; 150: 1192-1199.
4. Yakunin N., Yakunina N., Spirin A. Analysis of the federal law provisions of the Russian Federation from 13.07.2015 № 220 from the position of the methodology about the improvement of the passenger transportations quality by motor transport. *Intellect. Innovations. Investments*. 2016; 2:128-132
5. Yakunin N., Lyubimov I., Yakunina N., Fattakhova F. *Theoretical foundations of passenger intermunicipal road transport*. Orenburg, Orenburgskii Gos. Univ. 2020:196.
6. Suleimanov I., Moskova E., Lyubimov I., Melnikov A., Rassokha V. Improved methods of monitoring and managing the movement of urban passenger transport. *IIOABJ 10 (S2)*, 71-76 Aksamentov, E., Kulikov, Y., & Cheglov, V. (2020). Features of traffic organization and traffic safety in cities. *Transportation Research Procedia*. 2019; 50: 766-772. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.089.
7. Trubin N., Yakunin N., Yakunina N., Lyubimov I. The Quality Monitoring of City Passenger Transportations on Regular Routes Using Data of Objective Control. *MATEC Web of Conferences*. 2020. 329, 01006
8. Mao B.-H., Wang M., Ho, T.-K., Chen H.-B. A Review and Prospect of Urban Public Transit Level-of-Service Research. *Jiaotong Yunshu Xitong Gongcheng Yu Xinxi. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*. 2022; 22(1): 2-13
9. Molinari L., Haezendonck E., Hensmans M. A Strategic Asset Management Framework for Improving Transport Infrastructure: Analysis for Belgian Land Transport Modes. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2022: 33-43.
10. Loginova N., Ksenofontova T. Analysis of the Customs and Transport and Logistics Infrastructure in Russia. *Lecture Notes in Networks and Systems* 402 LNNS. 2022: 540-548.
11. Dahim M. Enhancing the development of sustainable modes of transportation in developing countries: Challenges and opportunities. *Civil Engineering Journal (Iran)*. 2021; 7(12): 2030-2042.
12. Olowosegun A., Moyo D., Gopinath D. Multicriteria evaluation of the quality of service of informal public transport: An empirical evidence from Ibadan, Nigeria. *Case Studies on Transport Policy* 2021; 9 (4):1518-1530.
13. Ivanova N. A., Chirikanova E. A., Ulitskaya N. M., Dvoryanchikova A. A. Digital Transportation Technologies for Formation of Bus Routes in the Conditions of a Megapolis. *Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex, TIRVED 2021 - Conference Proceedings*.
14. Oveshnikova L. V., Sibirskaya E. V., Slepneva G. D., Lebedinskaya O. G. (2021). Spatio-temporal analysis of the development of the transport system: Russian and foreign experience. *IBIMA Business Review* 2020,515342
15. Rohit M. H. An IoT based System for Public Transport Surveillance using real-Time Data Analysis

and Computer Vision. Proceedings of 2020 3rd International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications, ICAECC 2020 9339485

16. Ke X., Lin J.Y., Fu C., Wang Y. Transport infrastructure development and economic growth in China: Recent evidence from dynamic panel system-GMM analysis. *Sustainability (Switzerland)*. 2020; 12(14): 5618.

17. Taylor Z., Ciechański A. Ownership transformation and fdi among national carriers operating road passenger transport services in the visegrád group (V4) Countries. *Geograficky Casopis*. 2020; 72(1): 81-102

18. Estacio A. G., Pagtalunan R. S., Valenzuela I. C., Tolentino L. K. S., Dela Cruz J. C. Innovations on Advanced Transportation Systems for Local Applications. IEEE 11th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management, HNICEM 2019 9072777.

19. Jayasinghe A., Kasemsri R., Abenayake C. C., Mahanama P.K.S. Network centrality analysis of public transport systems: Developing a strategic planning tool to assess passenger attraction. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering 8 (10 Special Issue)*. 2020: 472-476.

20. Taysayev K., Terentyev A., Evtukov S., & Arifullin I. Efficiency ratio assessment model for buses. *Transportation Research Procedia* 50 674-680. doi:10.1016/j.trpro. 2020. 10.079.

21. Tokunova G., & Rajczyk M. Smart technologies in development of urban agglomerations (case study of st. petersburg transport infrastructure). *Transportation Research Procedia* 50 681-688. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.080.

22. Mandal R., Mandal A., Dutta S., Saha S., Nandi S. Framework of Intelligent Transportation System: A Survey. *Lecture Notes in Networks and Systems* 404. 2022: 93-108. doi: 10.1007/978-981-19-0105-8_10.

23. Pozdena R. Devolution of transportation: Reducing big-government involvement in transportation decision making. *Transportation Policy and Economic Regulation: Essays in Honor of Theodore Keeler*. 2018: 207-250

24. Chondrodima E., Georgiou H., Pelekis N., Theodoridis Y. Particle swarm optimization and RBF neural networks for public transport arrival time prediction using GTFS data. *International Journal of Information Management Data Insights*. 2022; 2(2):100086. doi:10.1016/j.jjime.2022.100086.

25. Sharma A., Awasthi L. K. Ob-EID: Obstacle aware event information dissemination for SDN enabled vehicular network. *Computer Networks* 216,109257. doi:10.1016/j.comnet. 2022.109257.

26. Ponnann S., Theivadas J. R., VS, H., Einarson, D. Driver monitoring and passenger interaction system using wearable device in intelligent vehicle. *Computers*

and Electrical Engineering. 2022; 103: 108323. doi:10.1016/j.compeleceng. 2022.108323.

27. Alkinani M. H., Almazroi A. A., Adhikari M., Menon V. G. Design and analysis of logistic agent-based swarm-neural network for intelligent transportation system Alexandria Engineering Journal. 2022; 61(10): 8325-8334. doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.046.

28. Zeng B., Luo Y. Potential of harnessing operational flexibility from public transport hubs to improve reliability and economic performance of urban multi-energy systems: A holistic assessment framework. *Applied Energy*. 2022; 322: 119488. doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119488.

REFERENCES

1. Bondarenko E., Goncharov A., Gorlatov S., Lyubimov, I., Manaev, K., Melnikov, A., Trubin, N. Concept of municipal road transport. *The world of transport and technological machines*. 2015; 2 (49):110-116. (in Russ.)

2. Yakunina N. V., Kabanova O. V. Fot A. P. Analysis of the state of passenger transportation by public transport in foreign countries and contractual policy in transportation. *Ural Transport*. 2013; 3 (38): 84-88. (in Russ.)

3. Lyubimov I. Melnikov A., Trubin, N. The control system improvement of the city motor transportation. *Procedia Engineering*. 2016; 150: 1192-1199.

4. Yakunin N., Yakunina N., Spirin A. Analysis of the federal law provisions of the Russian Federation from 13.07.2015 № 220 from the position of the methodology about the improvement of the passenger transportations quality by motor transport. *Intellect. Innovations. Investments*. 2016; 2:128-132

5. Yakunin N., Lyubimov I., Yakunina N., Fattakhova F. *Theoretical foundations of passenger intermunicipal road transport*. Orenburg, Orenburgskii Gos. Univ. 2020:196.

6. Suleimanov I., Moskova E., Lyubimov I., Melnikov A., Rassokha V. Improved methods of monitoring and managing the movement of urban passenger transport. *IIOABJ* 10 (S2), 71-76 Aksamentov, E., Kulikov, Y., & Cheglov, V. (2020). Features of traffic organization and traffic safety in cities. *Transportation Research Procedia*. 2019; 50: 766-772. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.089.

7. Trubin N., Yakunin N., Yakunina N., Lyubimov I. The Quality Monitoring of City Passenger Transportations on Regular Routes Using Data of Objective Control. *MATEC Web of Conferences*. 2020. 329, 01006

8. Mao B.-H., Wang M., Ho, T.-K., Chen H.-B. A Review and Prospect of Urban Public Transit Level-of-Service Research. Jiaotong Yunshu Xitong Gongcheng Yu Xinxi. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*. 2022; 22(1): 2-13

9. Molinari L., Haezendonck E., Hensmans M. A Strategic Asset Management Framework for Improving Transport Infrastructure: Analysis for Belgian Land

Transport Modes. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2022: 33-43.

10. Loginova N., Ksenofontova T. Analysis of the Customs and Transport and Logistics Infrastructure in Russia. *Lecture Notes in Networks and Systems* 402 LNNS. 2022: 540-548.

11. Dahim M. Enhancing the development of sustainable modes of transportation in developing countries: Challenges and opportunities. *Civil Engineering Journal (Iran)*. 2021; 7(12): 2030-2042.

12. Olowosegun A., Moyo D., Gopinath D. Multi-criteria evaluation of the quality of service of informal public transport: An empirical evidence from Ibadan, Nigeria. *Case Studies on Transport Policy* 2021; 9 (4):1518-1530.

13. Ivanova N. A., Chirikanova E. A., Ulitskaya N. M., Dvoryanchikova A. A. Digital Transportation Technologies for Formation of Bus Routes in the Conditions of a Megapolis. *Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex, TIRVED 2021 - Conference Proceedings*.

14. Oveshnikova L. V., Sibirskaya E. V., Slepneva G. D., Lebedinskaya O. G. (2021). Spatio-temporal analysis of the development of the transport system: Russian and foreign experience. *IBIMA Business Review* 2020,515342

15. Rohit M. H. An IoT based System for Public Transport Surveillance using real-Time Data Analysis and Computer Vision. *Proceedings of 2020 3rd International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications, ICAECC 2020* 9339485

16. Ke X., Lin J.Y., Fu C., Wang Y. Transport infrastructure development and economic growth in China: Recent evidence from dynamic panel system-GMM analysis. *Sustainability (Switzerland)*. 2020; 12(14): 5618.

17. Taylor Z., Ciechański A. Ownership transformation and fdi among national carriers operating road passenger transport services in the visegrád group (V4) Countries. *Geograficky Casopis*. 2020; 72(1): 81-102

18. Estacio A. G., Pagtalunan R. S., Valenzuela I. C., Tolentino L. K. S., Dela Cruz J. C. Innovations on Advanced Transportation Systems for Local Applications. *IEEE 11th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management, HNICEM 2019* 9072777.

19. Jayasinghe A., Kasemsri R., Abenayake C. C., Mahanama P.K.S. Network centrality analysis of public transport systems: Developing a strategic planning tool to assess passenger attraction. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering* 8 (10 Special Issue). 2020: 472-476.

20. Taysayev K., Terentyev A., Evtukov S., & Arifullin I. Efficiency ratio assessment model for buses. *Transportation Research Procedia* 50 674-680. doi:10.1016/j.trpro. 2020. 10.079.

21. Tokunova G., & Rajczyk M. Smart technologies in development of urban agglomerations (case study of st. petersburg transport infrastructure). *Transportation Research Procedia* 50 681-688. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.080.

22. Mandal R., Mandal A., Dutta S., Saha S., Nandi S. Framework of Intelligent Transportation System: A Survey. *Lecture Notes in Networks and Systems* 404. 2022: 93-108. doi: 10.1007/978-981-19-0105-8_10.

23. Pozdena R. Devolution of transportation: Reducing big-government involvement in transportation decision making. *Transportation Policy and Economic Regulation: Essays in Honor of Theodore Keeler*. 2018: 207-250

24. Chondrodima E., Georgiou H., Pelekis N., Theodoridis Y. Particle swarm optimization and RBF neural networks for public transport arrival time prediction using GTFS data. *International Journal of Information Management Data Insights*. 2022; 2(2):100086. doi:10.1016/j.jjimei.2022.100086.

25. Sharma A., Awasthi L. K. Ob-EID: Obstacle aware event information dissemination for SDN enabled vehicular network. *Computer Networks* 216,109257. doi:10.1016/j.comnet. 2022.109257.

26. Ponnas S., Theivadas J. R., VS, H., Einarson, D. Driver monitoring and passenger interaction system using wearable device in intelligent vehicle. *Computers and Electrical Engineering*. 2022; 103: 108323. doi:10.1016/j.compeleceng. 2022.108323.

27. Alkinani M. H., Almazroi A. A., Adhikari M., Menon V. G. Design and analysis of logistic agent-based swarm-neural network for intelligent transportation system Alexandria Engineering Journal. 2022; 61(10): 8325-8334. doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.046.

28. Zeng B., Luo Y. Potential of harnessing operational flexibility from public transport hubs to improve reliability and economic performance of urban multi-energy systems: A holistic assessment framework. *Applied Energy*. 2022; 322: 119488. doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119488.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Любимов И. И. Концепция и дизайн работы, анализ и интерпретация данных, составление статьи, итоговая переработка статьи.

Якунина Н. Н. Сбор данных.

Якунин Н. Н. Составление статьи, окончательное утверждение версии для публикации, итоговая переработка статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Igor I. Lyubimov: Concept and design of the work; analysis and interpretation of the data; drafting of the article, final revision of the article.

Yakunina N. N. Data collection.

Yakunin N. N. Drafting the article; final approval of the version for publication final revision of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Любимов Игорь Ильич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры автомобильного транспорта.

Якунин Николай Николаевич – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой автомобильного транспорта.

Якунина Наталья Владимировна – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры автомобильного транспорта.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor I. Lyubimov – Cand. of Sci., Associate Professor, Automobile Transport Department.

Nikolai N. Yakunin – Dr. of Sci., Professor, Head of the Automobile Transport Department.

Natalia V. Yakunina – Dr. of Sci., Associate Professor, Professor of the Automobile Transport Department, Orenburg State University.

УДК 659.1

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-890-899>

EDN: VGLTGZ

Научная статья



ЦИФРОВАЯ ТРАНСПОРТНАЯ ТРАСОЛОГИЯ НА ОСНОВЕ AGISOFT METASHARE И БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А. И. Недобитков

Восточно-Казахстанский технический университет,
г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан
a.nedobitkov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4605-9668>

АННОТАЦИЯ

Введение. Транспортно-трассологическая экспертиза – один из наиболее востребованных видов экспертиз по делам о дорожно-транспортных происшествиях в рамках уголовных дел. Основные методические положения транспортно-трассологической экспертизы были разработаны в прошлом веке, тогда как в современном мире набирает силу четвертая индустриальная (промышленная) революция, базирующаяся на компьютерных и информационных технологиях, различных программно-аппаратных средствах. Возникает насущная необходимость адаптации методического аппарата транспортно-трассологической экспертизы к современным реалиям.

Материалы и методы. На примере конкретных дорожно-транспортных происшествий представлены результаты использования беспилотного летательного аппарата и программного обеспечения Agisoft Metashape. Наглядно продемонстрировано, что применение данного метода, во-первых, значительно сокращает время фиксации объектов улично-дорожной сети, транспортных средств и следов их движения на проезжей части дороги, во-вторых, повышает точность фиксации, в-третьих, позволяет устанавливать всю полноту фактических обстоятельств, необходимых для анализа механизма дорожно-транспортного происшествия. Цифровые модели транспортных средств, полученные с применением данного метода, могут быть использованы для трехмерного моделирования, что предоставляет возможность более точно определять характер и угол сближения транспортных средств перед столкновением, при значительном сокращении финансовых и временных затрат.

Результаты. Показано, что цифровые модели участка ДТП и транспортных средств могут быть приобщены как к материалам дела в целом, так и к заключению эксперта в частности, что позволит повысить объективность и достоверность проведенного исследования. Цифровая модель участка дорожно-транспортного происшествия (цифровой двойник) может храниться неограниченно долго и содержит всю полноту информации о вещной обстановке места происшествия, что делает ее ценной при проведении дополнительных или повторных экспертиз.

Заключение. Предложенный метод создания цифровой модели транспортного средства или участка дорожно-транспортного происшествия может быть использован в цифровой транспортной трассологии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровая модель, беспилотный летательный аппарат, транспортно-трассологическая экспертиза, механизм дорожно-транспортного происшествия, цифровая трассология.

Статья поступила в редакцию 05.10.2022; одобрена после рецензирования 05.12.2022; принята к публикации 19.12.2022.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Недобитков А. И. Цифровая транспортная трассология на основе agisoft metashape и беспилотного летательного аппарата // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 6 (88). С. 890-899. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-890-899>

© Недобитков А. И., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-890-899>
EDN: VGLTGZ

DIGITAL TRANSPORT TRASEOLOGY BASED ON AGISOFT METASHAPE AND UNMANNED AERIAL VEHICLE

Alexander I. Nedobitkov

*East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan
a.nedobitkov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4605-9668>*

ABSTRACT

Introduction. A vehicle and trace evidence analysis is one of the most requested types of examinations performed within the framework of criminal cases on road traffic accidents. The main methodical guidelines for traffic and trace evidence analyses were developed in the past century, while nowadays the fourth industrial revolution is on the rise. The industrial revolution is based on computer and information technologies, various software and hardware tools. Hence there is a vital necessity in update of the vehicle and trace evidence analysis methodology in order to conform to current-day realities.

Materials and methods. Results of use of the unmanned aerial vehicle and Agisoft Metashape software are presented in the article in the context of specific road traffic accidents. It was made clear that application of this method has the following advantages: firstly, time of fixation of objects of the roadway network, vehicles and their traces on traffic ways is significantly reduced; secondly, fixation accuracy is improved; thirdly, use of the method makes it possible to establish all actual facts needed to perform analysis of the mechanism of a road traffic accident. Digital models obtained using this method could be used for 3D modeling, what offers an opportunity for more accurate determination of a mode and an angle of approach of vehicles before an accident with significant reduction of financial and time expenditures.

Results. It was shown that digital models of road traffic accident sites and vehicles could be entered into the case file in general as well as into an expert's statement in particular. Such entering will improve objectivity and believability of the conducted examination. Digital models of road traffic accident sites (digital twins) could be stored for an indefinitely long time and could contain the entire information on physical accident scene. Therefore such digital models are considered as valuable information while performing additional or repeated examinations.

Conclusion. The proposed method for creating a digital model of a vehicle or a site of a traffic accident can be used in digital transport traceology.

KEYWORDS: digital model, unmanned aerial vehicle, vehicle and trace evidence analysis, mechanism of a road traffic accident, digital traceology.

The article was submitted 05.10.2022; approved after reviewing 05.12.2022; accepted for publication 19.12.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Nedobitkov A. I. Digital transport traseology based on agisoft metashape and unmanned aerial vehicle. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2022; 19 (6): 890-899. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-890-899>

© Nedobitkov A. I., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

Рост автомобилизации, сопряженный с недостатками в организации дорожного движения, приводит к увеличению числа дорожно-транспортных происшествий (ДТП). Кроме того, как показано в работе [1], имеют место инсценировки и фальсификации дорожно-транспортных происшествий в целях страхового мошенничества. Перечисленные обстоятельства приводят к росту осмотров мест происшествий по делам о ДТП, что ведёт к увеличению объёма и трудоёмкости экспертных исследований [2]. Автором статьи [3] отмечено, что механизм ДТП часто носит сложный и неочевидный характер, кроме того, часто представленные первичные материалы для производства экспертизы недостаточны для решения диагностических задач. Данное обстоятельство затрудняет решение проведения экспертиз по делам о ДТП, в том числе транспортно-трасологических.

Авторами работ [4, 5, 6, 7] проанализированы различные инновационные методы проведения осмотра места ДТП, например, такие как фотограмметрические методы, лазерное сканирование, применение беспилотных летательных аппаратов.

Необходимо отметить, что автором [8] указано, что такой вид запечатления вещной обстановки на месте происшествия как лазерное сканирование не может являться объективным. Проблема состоит в том, что сканер, как и любое техническое средство, может использоваться не корректно, а вещная обстановка для повторного сканирования уже может и не сохраниться [8]. В связи с этим специалист при осмотре места ДТП не может отказаться от производства и создания классических фототаблиц [8]. В качестве альтернативы авторы [7, 8] указывают на весьма перспективный способ съёмки с использованием беспилотного летательного аппарата, поскольку применение современных криминалистических технических средств позволяет оперативно получить наилучшие результаты. Опыт применения БПЛА в обеспечении безопасности дорожного движения, анализе механизма ДТП показан в работах [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17].

В работах¹ [18] продемонстрировано успешное применение беспилотного лета-

тельного аппарата и программного комплекса Agisoft Metashape при исследовании обстоятельств ДТП и построении схемы ДТП. Авторы работы¹ показали, что съёмка с БПЛА и автоматизированная обработка полученных материалов в настоящее время в ряде случаев имеют безусловное преимущество перед другими методами дистанционного зондирования Земли. При этом экспериментальные исследования показали, что при фотограмметрической обработке материалов, полученных с БПЛА средствами программного обеспечения Agisoft Metashape, наряду с центрами проектирования снимков, для повышения точности трехмерной модели геопространства необходимо использовать наземные опорные точки [19]. В статье [19] подчеркнуто, что точность измерения соответствует существующим на данный момент в Российской Федерации нормативным документам.

В работе [20] проиллюстрировано, что, во-первых, видеозапись с камеры, в том числе установленной на БПЛА, является доказательством по административному делу, а во-вторых, существующие подходы к исследованию видеорегистраторов сводятся лишь к извлечению информации средствами самих видеорегистраторов или их программного обеспечения, что не вызывает особых затруднений у экспертов.

Целью данной работы является анализ метода построения и использования цифровой модели на основе съёмки с беспилотного летательного аппарата и обработки в программном комплексе Agisoft Metashape для проведения транспортно-трасологической экспертизы.

Исходя из этого, были поставлены следующие задачи исследования:

- экспериментально подтвердить, что точность цифровой модели полностью соответствует фактическим размерам;
- показать, что цифровая модель участка ДТП или транспортного средства является не просто иллюстрацией, а основой для формирования выводов, поскольку ее можно приобщить к заключению эксперта с целью возможности воспроизведения и верификации (условие проверяемости и достоверности);
- наглядно проиллюстрировать, что цифровая модель может храниться без изменений

¹ Недобитков А. И., Охотенко А. И. Фиксация обстановки места дорожно-транспортного происшествия с помощью беспилотного летательного аппарата // Международный научный конгресс «Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2020». Сборник материалов IV национальной научно-практической конференции с международным участием. 2020. <http://nir.sgugit.ru/wp-content/uploads/2020/11/Nedobitkov-Ohotenko-FIKSATSIYA-OBSTANOVKI-MESTA-DOROZHNO-TRANSPORTNOGO-PROISSHESTVIYA.pdf>

неограниченно долго, в отличие от следов на месте происшествия и транспортных средств;

- подтвердить, что транспортно-трассологическое исследование на основе цифровой модели не требует больших организационных и временных затрат, что сокращает сроки и стоимость проведения экспертизы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в Центре преемственности Veritas Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева.

Для исследования следов на месте происшествия с помощью метода трехмерного компьютерного моделирования используется программное обеспечение Agisoft Metashape, установленное на ноутбук (Core i7 8-9 поколения, DDR4 16 Гб 2400 МГц, видеокарта не ниже GeForce GTX 1050, SSD 1 Тб), БПЛА с возможностью проведения фотосъемки и пространственной привязки фотоснимков с помощью спутников глобального позиционирования, такой как DJI Mavic 2 Pro.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе² отмечается, что в криминалистике и судебной экспертизе большие перспективы имеют растровые электронные микроскопы. Следует напомнить, что принципиальная схема построения электронного микроскопа была предложена в 1935 г. и заключалась в формировании изображения объекта последовательно по точкам в результате отражения электронов с поверхности исследуемого образца². В растровой микроскопии фактически исследуется не сам образец, а его изображение или модель, построенные на ответных сигналах различной физической природы (отраженные и вторичные электроны, рентгеновское излучение, свет, поглощенный ток и пр.), от облучения исследуемой поверхности электронным пучком². Необходимо подчеркнуть, что замена реального образца его моделью (изображением) в растровой микроскопии не только не снижает точности исследования, но и открывает новые возможности.

Автор [21] указывает, что в судебной экспертизе на современном уровне научного

и технического развития выделяются такие виды моделирования, используемые при решении отдельных задач, как мысленные и материальные (физические) модели.

При этом в работе [21] подчеркивается, что при раскрытии преступлений, особый акцент следует сделать на цифровой фотографии. С ее помощью рамки моделирования значительно расширяются, так как цифровые изображения позволяют преобразовать снимаемый объект для компьютерной обработки.

Авторами³ показано, что эффективным методом, определяющим механизм образования повреждений транспортных средств, является моделирование или реконструкция. По данным работы³, материальное моделирование подразделяется на макетирование и натурное моделирование. Необходимо отметить, что на современном уровне развития науки и техники на ведущее место в реконструкции механизма ДТП выходит компьютерное моделирование (программы SMAC, PC-Crash, Carat-3 и т.п.) [8].

В свою очередь, С. С. Евтюков в диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук «Методология оценки и повышения эффективности дорожно-транспортных экспертиз» дал описание метода модельно-ориентированной реконструкции (МОР). К сожалению, в статьях данного автора этот метод практически не приводится.

Более того, Н. П. Майлис обосновала и ввела термин «цифровая трассология» [22]. По мнению автора [22], формирование нового раздела «цифровой трассологии» обусловлено, в том числе появлением новых видов цифровых следов, при исследовании которых используются информационные технологии. Для их изучения требуется разработка подходов, отличающихся от исследования традиционных следов [22].

Общеизвестно, что при проведении натурной реконструкции в рамках транспортно-трассологического исследования имеются следующие существенные недостатки [3, 4]:

- не всегда имеется возможность присутствия обоих транспортных средств по ряду причин;

- натурная реконструкция требует больших временных и организационных затрат.

² Криминалистическая техника : учебник / под ред. К. Е. Дёмина. М. : Юридический институт МИИТ, 2017. 426 с.

³ Транспортно-трассологическая экспертиза по делам о дорожно-транспортных происшествиях (диагностические исследования): (методическое пособие для экспертов, следователей и судей). / под. ред. Ю. Г. Корухова. М.: ИПК РФЦСЭ, 2006. 144 с.

Необходимо отметить, что современное состояние науки и техники позволяет создавать цифровые модели как участка местности, так и любого объекта, например, транспортного средства [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]. В целях наглядного подтверждения точности цифровой модели на рисунке 1 приведен пример измерения колесной базы цифровой модели автомобиля ГАЗ-3102. Полученный результат полностью соответствует технической характеристике данного транспортного средства.

Следует указать, что Agisoft Metashape полностью соответствует требованиям п.8.1.3 ГОСТ Р 58854-2020 «Фотограмметрия. Требования к созданию ориентированных аэроснимков для построения стереомоделей застроенных территорий», а по ряду параметров и превосходит требования п.8.2.2. В частности, в Agisoft Metashape все связующие точки выбираются, отождествляются и измеряются на всех перекрывающихся снимках автоматически при равномерном их расположении, что существенно увеличивает качество уравнивания фотограмметрической сети.

На рисунке 2 приведена цифровая модель участка ДТП. Размеры на рисунке 2 нанесены для удобства визуального восприятия, фактически эти размеры определяются так же, как на рисунке 1. В работах¹ [6, 18] показано, что непосредственно сама съемка с БПЛА требует 5-7 мин времени.

По созданной цифровой модели можно определить локализацию повреждений транспортных средств, а также осыпи осколков (рисунок 3). Важным преимуществом цифровой модели является то обстоятельство, что на ней может быть зафиксирована вся следовая обстановка, включая месторасположение, размеры и цвет различных осколков (рисунок 3, б). Это позволяет в случае возникновения необходимости применять метод установления целого по частям (идентификация фрагментов по принадлежности)³. Следует отметить, что при обычном способе составления схемы ДТП, такая возможность полностью исключена. Более того, имеются многочисленные случаи отказов от проведения транспортно-трассологической экспертизы по причине отсутствия достоверной информации о следах на месте происшествия.

В качестве наглядного примера обратимся к еще одному реальному ДТП. В рамках уголовного дела, связанного со столкновением автомобиля ВАЗ-2112 с прицепом ГКБ -8350, целый ряд судебных экспертов пришли к выводу, что определить место столкновения не представляется возможным по причине противоречивости первичной информации, но это не помешало привлечь к уголовной ответственности водителя автомобиля КамАЗ-5320. Положение транспортных средств в момент столкновения показано на рисунке 4, а.

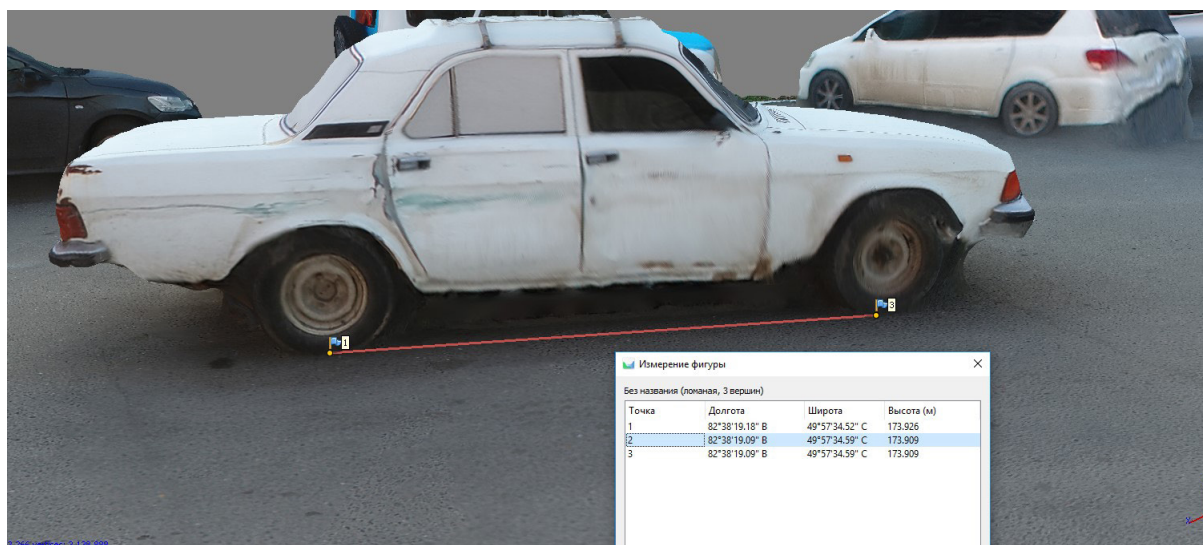


Рисунок 1 – Измерение колесной базы цифровой модели автомобиля ГАЗ-3102
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Measurement of the wheelbase of the digital model of the GAZ-3102 car
Source: compiled by the author.



Рисунок 2 – Цифровая модель участка дорожно-транспортного происшествия
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Digital model of the road accident site
Source: compiled by the author.



Рисунок 3 – Определение необходимых параметров по цифровой модели:
а – локализация повреждений транспортного средства; б – определение области россыпи осколков
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Determination of the required parameters using a digital model,
a – localization of vehicle damage; b - determination of the area of the placer of fragments.
Source: compiled by the author.

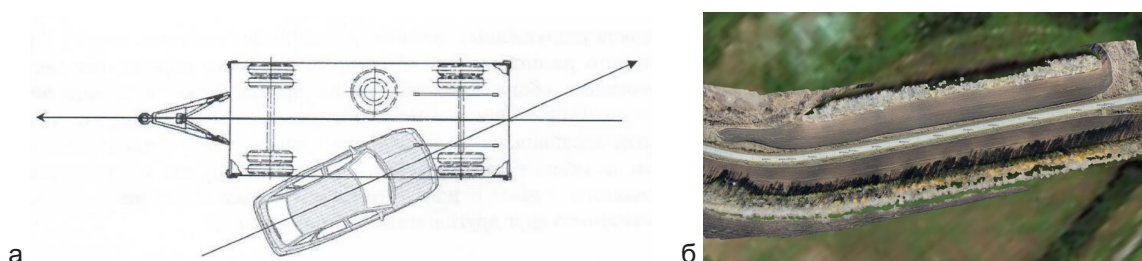


Рисунок 4 – Фактические обстоятельства дорожно-транспортного происшествия:
а – положение транспортных средств в момент столкновения;
б – цифровая модель участка дорожно-транспортного происшествия
Источник: составлено автором.

Figure 4 – The actual circumstances of the road traffic accident,
a -position of vehicles at the time of the collision, b- digital model of the road accident site
Source: compiled by the author.

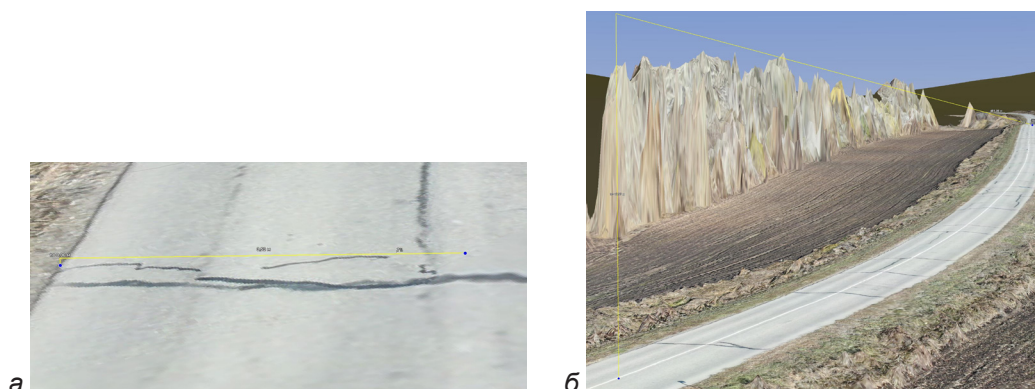


Рисунок 5 – Параметры, определенные по цифровой модели:
а – поперечный профиль проезжей части дороги; б – продольный уклон дороги
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Parameters determined from the digital model,
a - transverse profile of the carriageway, b - longitudinal slope of the road
Source: compiled by the author.

Одним из оснований для привлечения водителя автомобиля КамАЗ-5320 к ответственности послужило наличие пятна разлива охлаждающей жидкости на полосе движения автомобиля ВАЗ-2112. Для анализа механизма происшествия была составлена цифровая модель участка ДТП или, другими словами, цифровой двойник дороги (см. рисунок 4, б). Следует указать, что время съемки одного километра дороги с БПЛА составило 10 мин, время обработки данных в программном комплексе Agisoft Metashape – около 1 ч. Необходимо повторить, что на цифровой модели отображается вся полнота данных, имеющих на момент проведения осмотра. Например, если следы движения транспортного средства после ДТП будут припорошены снегом и визуально трудно различимы, то на карте высот цифровой модели они видны (см. https://youtu.be/weLBGr8_t0s). В частности, на рисунке 5, а показано, что поперечный уклон двускатной дороги составляет 6 см на ширину полосы 3,5 м, а на рисунке 5, б видно, что продольный уклон равен 17,37 м на длине участка 481,38 м. Таким образом, цифровая модель наглядно показывает, в каком направлении будет течь охлаждающая жидкость после разгерметизации системы охлаждения автомобиля, а именно от середины проезжей части дороги к обочине, и вниз по уклону, то есть на полосу движения легкового автомобиля. Необходимо подчеркнуть, что в материалах дела рассматривается ровный и горизонтальный участок дороги, поскольку замеры поперечного и продольного уклона дороги не производились.

Также следует отметить, что при проведении по данному ДТП транспортно-трассологической экспертизы потребовалось доставить поврежденные транспортные средства на ровную горизонтальную площадку и совмещать парные участки с помощью автомобильного крана. Вполне очевидно, что данная процедура потребовала не только значительных финансовых, но и временных затрат. В случае если бы при осмотре места происшествия была сформирована цифровая модель участка ДТП, включающая и цифровые модели транспортных средств, то при проведении транспортно-трассологической экспертизы эксперт мог получить всю полноту информации о следах на месте происшествия и о взаимных повреждениях транспортных средств. Более того, полностью отсутствует необходимость транспортировки поврежденных транспортных средств для проведения исследования. На рисунках 1 и 3, а наглядно продемонстрировано, что по цифровой модели транспортного средства можно получить всю полноту информации о любом из повреждений (размеры, форма и т.п.) и сопоставить их между собой по форме, размерам и в конечном счете механизму образования (см. https://youtu.be/weLBGr8_t0s).

Важным обстоятельством является то, что цифровая модель участка ДТП и транспортных средств может быть приобщена как к материалам дела в целом, так и к заключению эксперта в частности, что позволит повысить достоверность проведенного исследования.

Таким образом, на конкретном примере с учетом рекомендаций³ [21,22] показано, что

транспортно-трасологическое исследование на базе цифровой модели участка ДТП и транспортных средств может обладать большей полнотой, обоснованностью, проверяемостью, категоричностью и наглядностью выводов по сравнению с традиционными методами.

Также необходимо отметить, что цифровая модель может неограниченно долго храниться, что делает возможным успешное проведение дополнительных и повторных экспертиз. Стоит напомнить, что в настоящее время имеют место многочисленные случаи, когда, в связи с изменением дорожной обстановки или утратой транспортных средств, проведение дополнительных или повторных экспертиз зачастую невозможно.

В работах [23, 24, 25] показано, что в связи с четвертой индустриальной революцией, заключающейся в переходе на полностью автоматизированное цифровое производство, насущной необходимостью является использование новых технологий в судебной экспертизе, и в транспортной трасологии в частности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально доказано, что точность цифровой модели полностью соответствует фактическим размерам.

Наглядно показано, что цифровая модель участка ДТП или транспортного средства является не просто иллюстрацией, а основой для формирования выводов, поскольку ее можно приобщить как к заключению эксперта с целью возможности воспроизведения и верификации (условие проверяемости и достоверности), так и к материалам административного или уголовного дела, в случае, если она выполнялась на этапе осмотра места происшествия.

Подтверждено, что цифровая модель может храниться без изменений неограниченно долго, в отличие от следов на месте происшествия и транспортных средств.

Продemonстрировано, что транспортно-трасологическое исследование на основе цифровой модели не требует больших организационных и временных затрат, что сокращает сроки и стоимость проведения экспертизы.

Настоящим исследованием подтверждено, что использование данного метода позволяет получать исходные данные, наиболее полно описывающие вещную обстановку места происшествия.

Установлено, что предлагаемый метод соответствует как в целом цифровой трасологии, так и современной классификации диагно-

стических задач судебных транспортно-технических экспертиз и позволяет проводить транспортно-трасологические экспертизы на высоком научно-техническом уровне.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кулагин А. Д. Возможности и проблемы автотехнической и транспортно-трасологической экспертизы при расследовании преступлений, связанных с инсценировкой или фальсификацией дорожно-транспортных происшествий // Интеграция наук. 2018. Т.23, № 8. С. 336–340.
2. Беляев М. В., Четвергов М. А. К вопросу о современных способах моделирования дорожно-транспортных происшествий // Вестник Московского университета МВД России. 2018. № 4. С. 5–11.
3. Беляев М. В. К вопросу о методических положениях транспортно-трасологической экспертизы // Вестник Московского университета МВД России. 2019. № 1. С. 9–12.
4. Демидова Т. В., Беляев М. В. Применение инновационных технологий при осмотре мест дорожно-транспортных происшествий // Вестник Академии экономической безопасности МВД России. 2015. № 2. С. 72–76.
5. Бондаренко А. А. Применение фотограмметрических методов для фиксации обстановки дорожно-транспортного происшествия // Судебная экспертиза: научно-практический журнал. 2005. № 3. С. 36–38.
6. Добромиров В. Н., Евтюков С. С. Голов Е. В. Современные технологии первичного осмотра места дорожно-транспортного происшествия // Вестник гражданских инженеров. 2017. Т. 61, № 2. С. 232–239.
7. Сараев А. В., Данец С. В. Методы исследования дорожно-транспортных происшествий с использованием современных автоматизированных средств // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 3. С. 256–264. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-256-264>
8. Думнов С. Н. К вопросу о применении метода лазерного 3D-сканирования при производстве судебной автотехнической экспертизы // Вестник Восточно-Сибирского института МВД России. 2019. Т. 90, № 3. С. 133–145. DOI: 10.24411/2312-3184-2019-00037
9. Graça N., Mitishita E., Gonçalves J. Photogrammetric mapping using unmanned aerial vehicle // ISPRS Technical Commission I Symposium: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (17–20 November 2014). Denver, Colorado, USA, 2014. Vol. XL–1. P. 129–133.
10. Gandor F., Rehak M., Skaloud J. Photogrammetric mission planner for RPAS // 2015 International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (30 Aug–02 Sep 2015). Toronto, Canada, 2015. Vol. XL–1/W4. P. 61–65.

11. Mah S. B., Cryderman C. S. Implementation of an unmanned aerial vehicle system for large scale mapping // International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (30 Aug–02 Sep 2015). Toronto, Canada, 2015. Vol. XL–1/W4. – P. 47–54.

12. Digital elevation model from non-metric camera in UAS compared with lidar technology/ O. M. Dayamit, M. F. Pedro, R. R. Ernestoa, B. L. Fernandoa // International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (30 Aug–02 Sep 2015). – Toronto, Canada, 2015. Vol. XL–1/W4. – P. 411–413.

13. Ardestani S.M., Jin, P.J., Volkmann, O., Gong, J., Zhou, Z., Feeley, C., 2016. 3D Accident Site Reconstruction Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV). In: Presented in 95th Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington DC, USA. Paper No. 16-5703.

14. Liu X.; Guan, Z.; Fan, Q.; Chen, Q.; Gao, T. Remote Sensing and Scene Reconstruction of Traffic Accident Based on Unmanned Aerial Vehicle Platform. In Proceedings of the 19th COTA International Conference of Transportation Professionals, Nanjing, China, 6–8 July 2019; pp. 3331–3342

15. Liu, X., Zou, H., Niu, W., Song, Y., He, W., 2019b. An approach of traffic accident scene reconstruction using unmanned aerial vehicle photogrammetry. In: Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Sensors, Signal and Image Processing, pp. 31–34

16. Škorput, P.; Mandžuka, S.; Gregurić, M.; Vrančić, M.T. Applying Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in Traffic Investigation. Process. Lect. Notes. Netw. Syst. 2020, 76, 401–405.

17. Pérez, J.A.; Gonçalves, G.R.; Rangel, J.M.G.; Ortega, P.F. Accuracy and Effectiveness of Orthophotos Obtained from Low Cost UASs Video Imagery for Traffic Accident Scenes Documentation. Adv. Eng. Softw. 2019, 132, 47–54. [CrossRef]

18. Недобитков А. И., Охотенко А. И. Использование Agisoft PhotoScan и беспилотного летательного аппарата в целях установления обстоятельств дорожно-транспортных происшествий // Вестник КазГЮИУ. 2020. Т.45, № 1. С.130–134.

19. Хлебникова Т. А., Оприцова О. А. Экспериментальные исследования точности построения плотной цифровой модели по материалам беспилотной авиационной системы // Вестник СГУГиТ. 2018. Т. 23, № 2. С.119–129.

20. Крутов С. А. Видеорегистратор как объект исследования судебных экспертиз // Теория и практика судебной экспертизы. 2021. Т. 16, № 1. С. 114–123. <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2021-1-114-123>

21. Майлис Н. П. Методы моделирования при производстве судебных экспертиз как эффективное средство в доказывании // Вестник Московского университета МВД России. 2018. № 4. С.71–73.

22. Майлис Н. П. Роль инновационных технологий в развитии цифровой трасологии // Теория

и практика судебной экспертизы. 2022. Т. 17, № 2. С. 18–22. <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2022-2-18-22>

23. Григорян В. Г. Новые объекты исследования судебных автотехнических экспертиз // Теория и практика судебной экспертизы. 2019. Т. 14, № 2. С. 84–91. <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2019-14-2-84-91>

24. Ильин Н. Н. Задачи судебных транспортно-технических экспертиз // Теория и практика судебной экспертизы. 2019. Т. 14, № 2. С. 35–42. <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2019-14-2-35-42>

25. Кокин А. В. Судебная экспертиза в эпоху четвертой индустриальной революции (Индустрии 4.0) // Теория и практика судебной экспертизы. 2021. Т. 16, № 2. С. 29–36. <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2021-2-29-36>

REFERENCES

1. Kulagin A. D. Vozможности i problemy avtotehnicheskoy i transportno-trasologicheskoy jekspertizy pri rassledovanii prestuplenij, svjazannyh s inscenirovkoj ili fal'sifikaciej dorozhno-transportnyh proisshestvij [Opportunities and Problems of Autotechnical and Transport-traceological Expertise in the Investigation of Crimes Related to Staging or Falsification of Road Traffic Accidents]. *Integracija nauk*. 2018; T. 23. no 8: 336-340. (in Russ.)

2. Beljaev M. V., Chetvergova M. A. K voprosu o sovremennyh sposobah modelirovaniya dorozhno-transportnyh proisshestvij [On the Question of Modern Modeling Methods Road Traffic Accidents]. *Vestnik Moskovskogo universiteta MVD Rossii*. 2018; 4: 5-11. (in Russ.)

3. Beljaev M. V. K voprosu o metodicheskikh polozhenijah transportno-trasologicheskoy jekspertizy [To the Question About the Methodological Provisions of the Transport -Technical Expertise.]. *Vestnik Moskovskogo universiteta MVD Rossii*. 2019; 1:9-12. (in Russ.)

4. Demidova T. V., Beljaev M. V. Primenenie innovacionnyh tehnologij pri osmotre mest dorozhno-transportnyh proisshestvij [Application of Innovative Technologies When Inspecting Places of Road Traffic Accidents]. *Vestnik Akademii jekonomicheskoy bezopasnosti MVD Rossii*. 2015; 2: 72-76. (in Russ.)

5. Bondarenko A. A. Primenenie fotogrammetricheskikh metodov dlja fiksacii obstanovki dorozhno-transportnogo proisshestvija [Application of Photogrammetric Methods for Recording the Situation of a Road Traffic Accident]. *Sudebnaja jekspertiza: nauchno-prakticheskij zhurnal*. 2005; 3: 36-38. (in Russ.)

6. Dobromirov V. N., Evtjukov S. S. Golov E. V. Sovremennye tehnologii pervichnogo osmotra mesta dorozhno-transportnogo proisshestvija [Modern Technologies of the Primary Inspection of the Road Accident Place]. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*. 2017; T. 61. № 2: 232-239. (in Russ.)

7. Saraev A. V., Danec S. V. Metody issledovaniya dorozhno-transportnyh proisshestvij s ispol'zovaniem sovremennyh avtomatizirovannyh sredstv [Methods for Investigating Road Traffic Accidents Using Modern

Automated Means]. *Nauka i tehnika*. 2019; T. 18. no. 3: 256–264. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-256-264> (in Russ.)

8. Dumnov S.N. K voprosu o primenenii metoda lazernogo 3D-skanirovaniya pri proizvodstve sudebnoj avtotehnicheskoy jekspertizy [To the Question of the Application of the Method of Laser 3D Scanning in the Manufacture of Judicial Auto-Technical Examination]. *Vestnik Vostochno-Sibirskogo instituta MVD Rossii*. 2019; T. 90. no. 3: 133–145. DOI: 10.24411/2312-3184-2019-00037 (in Russ.)

9. Graça N., Mitishita E., Gonçalves J. Photogrammetric Mapping Using Unmanned Aerial Vehicle. ISPRS Technical Commission I Symposium: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (17–20 November 2014)*. Denver, Colorado, USA, 2014; Vol. XL–1: P. 129–133.

10. Gandor F., Rehak M., Skaloud J. Photogrammetric Mission Planner for RPAS. *2015 International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (30 Aug–02 Sep 2015)*. Toronto, Canada, 2015; Vol. XL–1/W4: P. 61–65.

11. Mah S. B., Cryderman C. S. Implementation of an Unmanned Aerial Vehicle System for Large Scale Mapping. *International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (30 Aug–02 Sep 2015)*. Toronto, Canada, 2015; Vol. XL–1/W4: 47–54.

12. Digital Elevation Model from Non-metric Camera in UAS Compared with Lidar Technology/ O. M. Dayamit, M. F. Pedro, R. R. Ernestoa, B. L. Fernandoa. *International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (30 Aug–02 Sep 2015)*. Toronto, Canada, 2015; Vol. XL–1/W4: 411–413.

13. Ardestani S. M., Jin, P. J., Volkmann, O., Gong, J., Zhou, Z., Feeley, C., 2016. 3D Accident Site Reconstruction Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV). In: Presented in 95th Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington DC, USA. Paper No. 16-5703.

14. Liu, X., Guan, Z., Fan, Q., Chen, Q., Gao T. Remote Sensing and Scene Reconstruction of Traffic Accident Based on Unmanned Aerial Vehicle Platform. In Proceedings of the 19th COTA International Conference of Transportation Professionals, Nanjing, China, 6–8 July 2019; 3331–3342

15. Liu X., Zou H., Niu W., Song Y., He, W., 2019b. An Approach of Traffic Accident Scene Reconstruction Using Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry. In: Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Sensors, Signal and Image Processing. 2019: 31–34

16. Škorput P., Mandžuka S., Gregurić, M., Vrančić, M.T. Applying Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in Traffic Investigation. Process. Lect. Notes. Netw. Syst. 2020. 76. 401–405.

17. Pérez J. A.; Gonçalves G. R.; Rangel J. M. G.; Ortega, P.F. Accuracy and Effectiveness of Orthophotos Obtained from Low Cost UASs Video Imagery for Traffic Accident Scenes Documentation. *Adv. Eng. Softw.* 2019, 132, 47–54.

18. Nedobitkov A. I., Ohotenko A. I. Ispol'zovanie Agisoft PhotoScan i bespilotnogo letatel'nogo aparata v celjah ustanovleniya obstoitel'stv dorozhno-transportnyh proissheshtvij [Agisoft PhotoScan and Unmanned Aerial Vehicle Use for the Purposes of Establishment of Circumstances of a Traffic Accident]. *Vestnik KazGUU*. 2020; 45. no. 1:130–134. (in Russ.)

19. Hlebnikova T. A., Opritova O. A. Jekspperimental'nye issledovaniya tochnosti postroeniya plotnoj cifrovoj modeli po materialam bespilotnoj aviacionnoj sistemy [Experimental Studies of the Dense Digital Model Accuracy by Using]. *Vestnik SGUGiU*. 2018; 23. no. 2:119–129. (in Russ.)

20. Krutov S. A. Videoregistrator kak ob'ekt issledovaniya sudebnyh jekspertiz [Video Recorder as an Object of Forensic Expert Analysis]. *Teorija i praktika sudebnoj jekspertizy*. 2021; 16. № 1:114–123. <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2021-1-114-123> (in Russ.)

21. Majlis N. P. Metody modelirovaniya pri proizvodstve sudebnyh jekspertiz, kak jeffektivnoe sredstvo v dokazyvanii [Methods of Modeling in the Production of Forensic Examinations as an Effective Tool in Proving]. *Vestnik Moskovskogo universiteta MVD Rossii*. 2018; 4: 71–73. (in Russ.)

22. Majlis N. P. Rol' innovacionnyh tehnologij v razvitií cifrovoj trasologii [The Role of Innovative Technologies in the Development of Digital Traceology]. *Teorija i praktika sudebnoj jekspertizy*. 2022; T. 17. no. 2:18–22. <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2022-2-18-22> (in Russ.)

23. Grigorjan V. G. Novye ob'ekty issledovaniya sudebnyh avtotehnicheskikh jekspertiz [The New Objects of Forensic Vehicle Examinations]. *Teorija i praktika sudebnoj jekspertizy*. 2019; 14. no. 2: 84–91. <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2019-14-2-84-91> (in Russ.)

24. Il'in N. N. Zadachi sudebnyh transportno-tehnicheskikh jekspertiz. *Teorija i praktika sudebnoj jekspertizy*. 2019; t. no. 14. 2: 35–42. <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2019-14-2-35-42> (in Russ.)

25. Kokin A. V. Sudebnaja jekspertiza v jepohu chetvertoj industrial'noj revoljucii (Industrii 4.0) [Forensic Expertise in the Era of the Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0)]. *Teorija i praktika sudebnoj jekspertizy*. 2021; 16. no. 2: 29–36. <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2021-2-29-36> (in Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Недобитков Александр Игнатьевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник Центра превосходства.

ABOUT THE AUTHOR

Alexander I. Nedobitkov – Cand. Sci., Senior Research at the Center of Excellence.

УДК 004.9

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-900-914>

EDN: VISRXD

Научная статья



РАЗРАБОТКА СЕМАНТИЧЕСКОЙ КАРТЫ ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО АВТОМОБИЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ОДНОВРЕМЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ И КАРТОГРАФИРОВАНИЯ

О. А. Родионов*, Б. Рашид

Лаборатория беспилотных технологий университета Иннополис
г. Иннополис, Россияo.rodionov@innopolis.university, <http://orcid.org/0000-0001-7603-3413>b.rasheed@innopolis.university, <http://orcid.org/0000-0003-3874-0883>

* ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Сфера беспилотных технологий стремительно развивается, и в ней проводится множество исследований по применению на практике алгоритмов искусственного интеллекта для решения комплексных задач на дороге. Сложности в восприятии машиной окружающего мира привели к появлению специальных карт высокого разрешения (High definition maps). Эти карты используются для упрощения и улучшения качества и надежности работы других подсистем из стека беспилотных технологий, таких как модули локализации, навигации и планирования. В современной литературе встречаются в основном работы по применению таких карт, а процесс разработки карты остается за рамками рассмотрения.

Цель работы. Создать методологию проектирования семантических карт для беспилотного транспорта с подробным описанием каждого из этапов разработки.

Материалы и методы. В данной статье описывается методология создания HD-карт, включающая в себя этапы сбора данных по методологии SLAM (Simultaneous localization and mapping), их дальнейшую обработку и разработку семантики дорожной сети. Описываемый алгоритм применяется на практике на примере разработки семантической карты района г. Иннополиса с применением SLAM подхода, использующего лидарную инерциальную одометрию – LIO-SAM (LIDAR inertial odometry via smoothing and mapping).

Результаты. Сформированы основные этапы методологии создания HD-карт для беспилотного транспорта. Авторы реализовали предложенную концепцию на практике и подробно описали процесс создания семантической карты для г. Иннополиса.

Обсуждение и заключение. Предложенная методология может быть использована для любого типа беспилотной техники (наземная, летная, водная) и для разных дорожных условий (город, бездорожье) в зависимости от информации, которую должна предоставлять карта для реализации поставленных для беспилотника целей и задач.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: HD-карта, семантическая карта, SLAM, LIO-SAM.

Статья поступила в редакцию 29.09.2022; одобрена после рецензирования 22.10.2022; принята к публикации 19.12.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Родионов О. А., Рашид Б. Разработка семантической карты для беспилотного автомобиля с использованием метода одновременной локализации и картографирования // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19, № 6 (88). С. 900-914. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-900-914>

© Родионов О. А., Рашид Б., 2022

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-900-914>
EDN: VISRXD

DEVELOPMENT OF A SEMANTIC MAP FOR AN UNMANNED VEHICLE USING A SIMULTANEOUS LOCALISATION AND MAPPING METHOD

Oleg A. Rodionov*, Bader Rasheed

Innopolis University Unmanned Technology Laboratory

Innopolis, the Russian Federation

o.rodionov@innopolis.university, <http://orcid.org/0000-0001-7603-3413>

b.rasheed@innopolis.university, <http://orcid.org/0000-0003-3874-0883>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction: The field of unmanned technologies is rapidly developing and a lot of research is being conducted on the practical application of artificial intelligence algorithms to solve complex problems on the road. The difficulties in the perception of the surrounding world by the machine led to the appearance of special High definition maps. These maps are used to simplify and improve the quality and reliability of other subsystems from the stack of autonomous technologies, such as localization, prediction, navigation and planning modules. In modern literature, there are mainly works on the practical application of such maps, and the process of developing a map remains outside the scope of consideration.

The aim of the work is to create a methodology for designing semantic maps for autonomous vehicles with a detailed description of each of the development stages.

Materials and methods: The article describes the methodology for creation of HD maps, which includes the stages of data collection using SLAM (Simultaneous localization and mapping) approach, its further processing and the development of the semantics of the road network. The described algorithm is applied in practice to develop the semantic map of Innopolis city area using SLAM approach with LIDAR inertial odometry via smoothing and mapping (LIO-SAM).

Results: The main stages of the methodology for creating HD maps for autonomous vehicles have been proposed and investigated. Authors implemented the proposed concept in practice and described in detail the process of creating a semantic map for the Innopolis city area.

Conclusions: The proposed methodology can be used for any type of autonomous robots (ground vehicles, unmanned aerial vehicle, water transport) and can be implemented in different road conditions (city, off-road), depending on the information the map should provide for the implementation of the goals and objectives set for the autonomous vehicle.

KEYWORDS: HD map, semantic map, SLAM, LIO-SAM.

The article was submitted 29.09.2022; approved after reviewing 22.10.2022; accepted for publication 19.12.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Oleg Rodionov, Bader Rasheed Development of a semantic map for an unmanned vehicle using a simultaneous localization and mapping method. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (6): 900-914. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-900-914>

© Rodionov O. A., Rasheed B., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

В мире существует множество различных типов карт – географические, климатические, топологические, дорожные и т.д. Все они выполняют единую функцию, которая заключается в предоставлении справочной информации об окружающих объектах или условиях на определенной местности, но отличаются друг от друга масштабами, степенью детализации и наличием только определенного типа объектов интереса. С помощью карт решаются в основном навигационные задачи, такие как прокладывание маршрутов, планирование времени перемещения, расчет расстояния между объектами, анализ загруженности дорожной сети и другие логистические задачи.

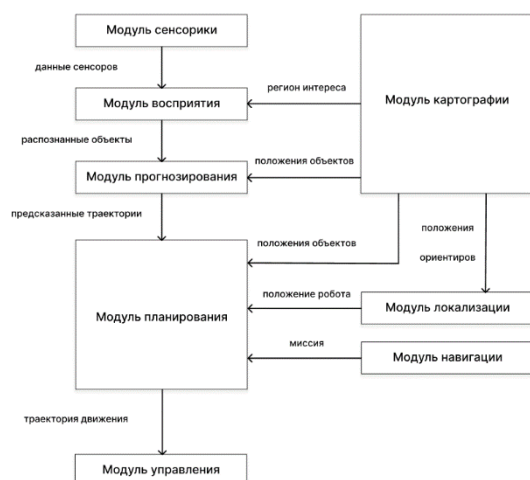


Рисунок 1 – Стек беспилотных технологий
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Unmanned technologies stack.
Source: compiled by authors.

Описанные выше карты предназначены для использования человеком, однако в сфере искусственного интеллекта задачи восприятия окружающей среды, ориентации в ней и принятия решений на основе собранной информации являются комплексными и взаимозависимыми. Именно поэтому для беспилотного транспорта были созданы HD-карты – карты высокого разрешения, которые содержат необходимую семантическую информацию об окружающей среде и упрощают восприятие автономным средством внешнего мира. Семантика карты включает в себя статические неподвижные объекты на дороге: дорожные полосы, знаки, светофоры и другие, а также устанавливает связи между ними в соответствии с правилами дорожного движения.

Суть работы беспилотного автомобиля отражает стек беспилотных технологий [1], который состоит из следующих подсистем: модуль сбора данных или модуль сенсорики, модуль восприятия, модуль локализации, модуль прогнозирования, модуль картографии, модуль навигации, модуль планирования и модуль управления. Схема этой системы представлена на рисунке 1.

Как видно из рисунка, модуль картографии плотно взаимодействует с другими подсистемами: частично или полностью заменяет данные сенсоров, увеличивает дальность их действия, определяет и выделяет область интереса для определенного устройства и модуля распознавания [2], предоставляет информацию о геометрии дорог и семантике дорожной сети для модуля прогнозирования, увеличивает точность локализации транспортного средства внутри окружающего пространства [3] и передает информацию о правилах дорожного движения и ситуации на дороге для модуля планирования.

Из-за плотной связи с другими подсистемами к модулю картографии предъявляются следующие требования: высокая точность предоставляемой информации, универсальный формат, подходящий каждому модулю из стека, надежность, актуальность, а также отсутствие избыточности информации. Более того, создание HD-карты является одним из первых этапов разработки программного комплекса беспилотных технологий или эксплуатации транспортного средства на новом участке. Поэтому необходимо предложить быстрый и эффективный метод проектирования таких карт, который и описывается в данной статье.

Технология разработки HD-карт. Важно понимать, что с технической точки зрения HD-карта представляет собой базу данных, которая отвечает на приходящие запросы и выдает только необходимую информацию [4]. Ввиду того что каждый модуль беспилотного стека создает уникальный запрос, возникает вопрос, как эффективно организовать хранение информации. Оптимальным решением является структуризация информации в отдельные слои, каждый из которых выполняет отведенную роль, хранится, разрабатывается и модифицируется отдельно. Поэтому методология разработки карт состоит из нескольких этапов, каждый из которых связан с отдельным уровнем информации.

Структура HD-карты. С точки зрения предоставляемой информации можно выделить пять слоев HD-карты [4]:

Геометрический слой. Содержит информацию о геометрии физического или виртуального объекта, который состоит из набора примитивов: точек, линий, полигонов и областей. Таким образом моделируются границы дорог, дорожных полос и других окружающих неподвижных объектов.

Семантический слой. Добавляет виртуальные ограничения, которые отражают действие правил дорожного движения на участке: проектирование дорожных полос с направлением движения, дорожных знаков, ограничений скорости, светофоров, стоп линий и т. д. Этот уровень карты строится на основе предыдущего.

Дорожная сеть. Устанавливает, каким образом дорожные полосы образуют единую систему дорожной сети для построения маршрута, однако тип соединения близлежащих примитивов определяется предыдущими слоями.

Экспериментальный слой. Подразумевает периодическое обновление карты с учетом изменений на участке: дорожные работы, высокая загруженность транспортного потока. Информация собирается с транспортных средств, анализируется и обновляется [5].

Слой реального времени. Обновление карты в реальном времени с учетом текущей ситуации на дороге: аварии, пробки и т. д.

Последние два слоя служат для поддержания актуальности карты, поэтому в рамках данной статьи они не рассматриваются. Методология создания HD-карты подразумевает разработку геометрического слоя, а затем проектирование семантического слоя и дорожной сети на основе созданной геометрии. Для этого применяются две разные технологии, описание которых приводится далее.

Разработка геометрического слоя методом SLAM. Геометрический слой на практике представлен в виде облака точек, отображающего физическую структуру окружающей среды. Такое облако собирается при помощи сенсоров, которые могут измерять расстояние до ближайших препятствий. Чаще всего используется LIDAR (Light Detection and Ranging), работа которого основана на излучении света и замере времени возвращаемого сигнала, отраженного от реального объекта. Такой сенсор позволяет собрать облако точек вокруг источника, на котором он установлен, в режиме реального времени, однако у данного устройства нет функции запоминания положения препятствий в пространстве: если сенсор подвижен, он просто выдает облако точек относительно нового положения источника сигнала. Поэто-

му для создания физического слоя требуется более комплексное решение, отличающееся от простого сбора данных с лидарного устройства.

В мобильной робототехнике строго выделяются два понятия [6]: робот, у которого есть определенная миссия, и окружающая среда, в которой агент проводит наблюдения при помощи сенсорики и таким образом получает информацию. Поэтому возникают одновременно две задачи: задача моделирования окружения, которая заключается в сохранении положения препятствий и ориентиров относительно положения робота, и задача локализации, которая подразумевает определение положения исполнителя миссии в окружающем пространстве по ориентирам, расположенным в его окружении. На практике ввиду того что все используемые сенсоры не являются идеальными, и их работа сопровождается шумами, возникает взаимозависимость задач картографии и локализации: модель внешнего мира необходима для локализации, и оценка положения робота необходима для сохранения в карте положения окружающих объектов относительно него. Таким образом, эти две задачи решаются одновременно в рамках подхода SLAM (Simultaneous localization and mapping) [7]. В данной статье рассматривается применение одного из современных методов SLAM на практике для создания физического слоя карты высокого качества.

Разработка семантического слоя. Как было описано ранее, семантический слой строится на основе геометрического и включает в себя абстрактные объекты, обозначающие и регулирующие правила дорожного движения. Семантика устанавливает связи объектов, которые могут выражаться в разрешении или запрете пересечения дорожной полосы, возможности или невозможности того или иного маневра автомобиля, в ограничении по скорости, в установке приоритета движения и так далее. Сложность заключается в том, что искусственный интеллект, как правило, не может полностью научиться обрабатывать эти семантические связи только при помощи модуля распознавания. Так, можно распознать дорожные полосы на дороге [8], но транспортное средство не сможет определить, разрешено ли пересекать линию без предварительно загруженной информации. К тому же разделения дорог на полосы не всегда явно обозначается линиями, например, при наличии кольцевого движения. Эти ситуации и многие другие являются неоднозначными и могут иметь не-

сколько вариантов проектирования. Именно поэтому разработка семантического слоя осуществляется вручную специалистами, которые при помощи инструментов создают абстрактные объекты и определяют связи между ними. Этот процесс можно частично автоматизировать при помощи методов машинного обучения, например, сегментируя объекты, дороги и классифицируя дорожные знаки. Тем не менее финальную версию карты анализирует и дорабатывает человек.

Обзор существующих решений. Для создания эффективного подхода по разработке HD-карт необходимо обратиться к литературе, посвященной данной тематике, и рассмотреть развитие существующих методов. Статьи, посвященные HD-картам, как правило, рассказывают о семантических картах: как организовано хранение информации и как реализуется логика правил дорожного движения. Создание физического слоя отражено в статьях о методах SLAM, которые отличаются между собой конфигурацией сенсоров и используемыми алгоритмами, поэтому в данном разделе эти две темы рассматриваются отдельно.

Семантические карты. Различные уровни карты и цели их использования с течением времени с развитием стеков беспилотных технологий, отличающихся по своей конфигурации, привели к появлению различных форматов карт. Многие из них принадлежат коммерческим компаниям и являются закрытыми, но существует и несколько открытых. Самым простым из них является формат XML OSM (Open Street Map) [9]. Эти карты созданы вручную сообществом разработчиков и представляют из себя большую базу данных, каждый объект в которой описывается набором геометрических линий и таблицей атрибутов со специальным идентификатором. Существуют общепринятые таблицы с правилами обозначения тех или иных объектов и любой желающий может внести изменения в эту карту. Однако такие карты не подходят для использования беспилотными автомобилями в силу своей неточности, которая может достигать погрешности в 10 м, что является неприемлемым значением для управления автомобилем на дороге.

Существует два основных открытых формата карт: OpenDRIVE и Lanelet2 и оба они базируются на формате XML (eXtensible Markup Language). Основное назначение формата OpenDRIVE [10] – использование для симуляции и тестирования систем помощи водителю

– ADAS [11, 12]. В этом формате все элементы мира разделяются на дороги и сопряжения, а каждое соединение дорог явно указывается по отношению предшественник-последователь, как показано на рисунке 2. Каждая дорога делится на секции по направлению движения, которые, в свою очередь, разделяются на несколько дорожных полос поперек. Позиция полос задается неявно со смещением относительно боковой линии, а связь примыкающих полос должна быть явно определена при помощи специальной записи. Таким образом формируется дорожный граф со строгим соединением дорог между собой. Такой подход удобен для планирования маршрута беспилотного автомобиля, потому что все узлы графа задаются при проектировании карты, однако формат не поддерживает хранение информации о других участниках дорожного движения и специфике их перемещения, а также плохо работает в условиях плотной дорожной сети.

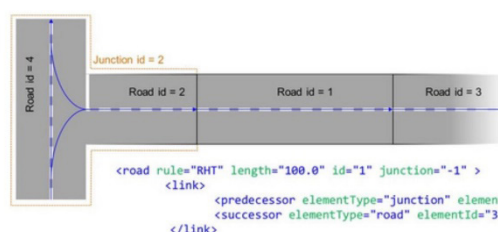


Рисунок 2 – Представление дорог в формате OpenDRIVE. Элементами формата выступают дорога (road) и сопряжение (junction), каждый из которых имеет уникальный идентификатор (id), а их соединение (road rule) явно указывается в отношении предшественник (predecessor) – последователь (successor) [10]

Figure 2 – Representation of roads in the Open DRIVE format. The elements of the format are the road and junction, each of which has a unique identifier, and their connection is explicitly indicated in relation with a type predecessor - successor [10]

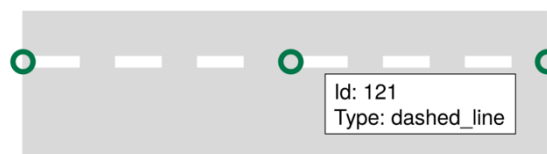


Рисунок 3 – Примитив линия (linestring). Используется для обозначения границ дорожных полос, в атрибутах указываются тип линии и идентификатор [13]

Figure 3 – Llinestring primitive. Used to mark the boundaries of road lanes, contains the line type attribute and identifier [13]

Относительно новым является формат Lanelet2 [13, 14]. В отличие от формата OpenDRIVE этот подход использует восходящую модель проектирования. Это означает, что карта не является ориентированной на беспилотный автомобиль, а содержит информацию обо всех участниках дороги, не имея явно указанных маршрутов и сопряжений между элементами – все это определяется при помощи внутренних правил формата, которые описаны подробнее ниже. Любая карта Lanelet2 формата состоит из пяти примитивов – точек и линий, которые являются частью геометрического слоя, и элементов семантического слоя карты: лейнлетов, областей и регуляционных элементов, определяющих правила дорожного движения. Каждый элемент имеет уникальный идентификатор, по которому их можно найти и использовать с целью получения информации, а также обладает набором атрибутов, которые определяют его роль в дорожном движении. Так, двойная сплошная линия запрещает пересечение дорожной полосы, а прерывистая, наоборот, разрешает – все это устанавливается правилами проектирования карт этого формата, которые максимально приближены к реально существующим правилам на дороге.

Точка (или узел) является базовым примитивом, в ней содержатся географические координаты. Следующий элемент, изображенный на рисунке 3, *линия*, состоит из точек и используется для обозначения дорожных полос, светофоров и форм других объектов. Именно атрибуты линий определяют возможность или невозможность их пересечения в соответствии с правилами дорожного движения.

Лейнлет является основным элементом – это атомарная секция, в которой осуществляется направленное движение. Он задается строго одной левой и строго одной правой границей, которые определяют направление движения. Свойство атомарности означает неизменяемость правил дорожного движения внутри одного лейнлета, поэтому обычно этим элементом обозначают дорожную полосу, которая соединяется с другими по общим узлам. Лейнлеты могут пересекаться между собой, например, на участке дороги с поворотом в сторону и движением прямо. Пример этого элемента приведен на рисунке 4. Следующим примитивом, схожим с предыдущим, является область: она обозначает участки без направленного движения, такие как парковоч-

ные зоны, площади, здания и т.д. (рисунок 5). Области задаются замкнутым полигоном, который может описывать как внешнюю, так и внутреннюю аницу.

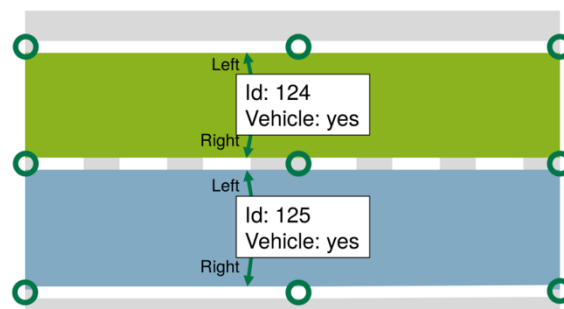


Рисунок 4 – примитив лейнлет (lanelet). задается левой (left) и правой (right) границами типа линия (linestring), определяющими движение по дорожной полосе. Обладает собственными атрибутами, включающими идентификатор и определяющими участников движения и правила на дороге [13]

Figure 4 – The lanelet primitive. It is defined by the left and right boundaries that describe traffic on the road lane. It has its own attributes, including the identifier, participants of the movement and the traffic rules on the road [13].

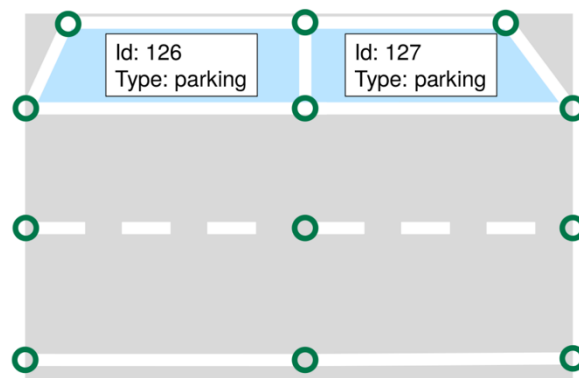


Рисунок 5 – Примитив область (area). Имеет границу в виде замкнутого полигона и включает в себя идентификатор и атрибуты назначения [13]

Figure 5 – Primitive area. It has a border in the form of a closed polygon and includes the identifier and application attributes [13]

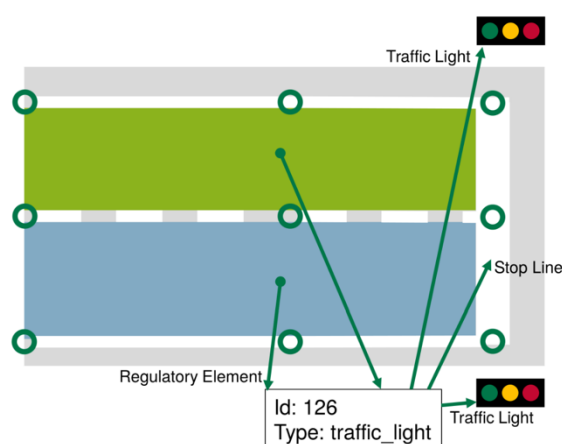


Рисунок 6 – Примитив регуляционный элемент. Является абстрактной реализацией правил дорожного движения, действующих внутри определенного лейнлета. Имеет идентификатор, атрибут типа и ссылки на линии вступления правила в силу и линии прекращения действия соответственно [13]

Figure 6 – Regulatory element. It is an abstract implementation of the traffic rules applied inside a certain lane. It has an identifier, a type attribute, and references to the lines of the rule's entry and termination, respectively [13].

Наконец, правила дорожного движения внутри лейнлета или области задаются *регуляционным элементом*. С их помощью вступают в силу ограничения скорости, устанавливаются приоритеты дорожных полос, стоп-линии и множество других правил со знаками и светофорами. Описанный примитив показан на рисунке 6.

Авторами формата Lanelet2 были разработаны атрибуты для каждого из описанных выше примитивов, которые определяют правила дорожного движения для нескольких его участников. Например, мотоцикл и легковой автомобиль могут иметь разные ограничения по скорости, а автобус может иметь собственную дорожную полосу, где остальным участникам ездить запрещено. Готовых таблиц атрибутов вполне достаточно, чтобы спроектировать семантическую модель дорожного движения в сложных городских условиях, но также формат Lanelet2 поддерживает возможность создания собственных атрибутов и объектов для симуляции любых условий. Информативность, открытость, мобильность и адаптивность – вот ключевые факторы данного формата, и поэ-

тому именно он был выбран для разработки семантических HD-карт.

LIO-SAM. Современные подходы по методу SLAM используют LIDAR в качестве основного сенсора, так как он обладает большим диапазоном действия и позволяет получить данные в высоком разрешении с углом обзора в 360 градусов. Установка, состоящая из лидара и инерциального сенсора [15], может быть использована для реализации высокоэффективного метода LOAM (LIDAR odometry and mapping), описанного в статье [16]. Существуют эффективные алгоритмы для сопоставления точек, которые представлены в двух разных облаках [17], одним из базовых подходов является итеративный алгоритм поиска ближайших точек (ICP) [18], выдающий в качестве результата трансформацию между двумя последовательными положениями лидара. Однако этот способ определения одометрии является неточным из-за искажения облаков точек, собранных с движущегося лидара, – этим и обосновано использование IMU для компенсации данного искажения.

Несмотря на эффективность метода LOAM, у него есть несколько существенных недостатков: он не предоставляет абсолютные положения точек в пространстве, не поддерживает GPS (Global Positioning System), ненадежен в обнаружении уже пройденных положений на карте для уточнения положений уже существующих объектов в пространстве, а также не подходит для создания больших по площади карт из-за накапливаемой погрешности.

LIO-SAM [19] представляет собой подход решения задачи моделирования карты и локализации с применением лидара и инерциального устройства с дополнительным алгоритмом оптимизации. Авторы используют нелинейную модель движения и данные инерциального сенсора, чтобы компенсировать искажение облака точек, и с помощью предсказанного движения применяют алгоритм оптимизации лидарной одометрии, чтобы удалить шумы IMU. Структура системы показана на рисунке 7.

На рисунке показано, что на вход система получает лидарное облако точек, данные инерциального сенсора и опционально геолокацию. Вся информация, получаемая системой, может быть представлена в виде графа, узлами которого являются дискретные положения автомобиля x_i , $i = 1..nn$, то есть векторы, состоящие из проекций положений автомобиля, скоростей и ускорений на мировые координаты в различные дискретные моменты

времени. Изменения в этом графе вызваны совокупным действием 4 факторов:

Фактор инерциального устройства. Этот метод основан на использовании нелинейной модели движения для определения относительного движения при переходе из одного положения в другое – это позволяет убрать шум инерциального устройства.

Фактор лидарной одометрии. При появлении нового облака точек проводится анализ его свойств и выделяются объекты с особыми характеристиками: плоские и граничные узловые точки. Совокупность всех особых точек на дискретном временном шаге составляют текущий кадр лидарного облака. Движение роботизированного автомобиля приводит к изменению кадров и, когда разница между соседними положениями становится больше установленного значения, фиксируется ключевой кадр F_{i+1} , соответствующий новому положению x_{i+1} . Таким образом, новая вершина добавляется в граф только при наличии существенных изменений – это позволяет сбалансировать и оптимизировать граф. Далее для каждого нового положения x_i выбирается n предыдущих ключевых кадров $F_{i-n}, \dots, F_i$, которые переводятся в глобальную систему координат трансформациями $T_{i-n}, \dots, T_i$ и образуют глобальную карту $M_i = \{M_i^e, M_i^p\}$, состоящую из карт с граничными и плоскими узловыми точ-

ками соответственно. Наконец, каждый новый ключевой кадр F_{i+1} сопоставляется с глобальной картой предыдущего шага, чтобы в итоге получить трансформацию $\Delta T_{i,i+1}$ между двумя соседними положениями x_i и x_{i+1} .

Фактор геолокации. Убирает дрейф данных при длительном использовании для сбора больших карт. Данные, полученные в географических координатах, проецируются на плоскость и ассоциируются с текущим положением для каждого узла графа.

Фактор замыкания траектории. При добавлении нового положения x_{i+1} он сначала сравнивается с предыдущими для поиска схожих. Если такое положение x_s найдено, вокруг него выбирается диапазон ключевых кадров облаков точек $\{F_{s-m}, \dots, F_{s+m}\}$, и это множество сопоставляется с новым кадром F_{i+1} . Полученная трансформация увеличивает точность собранной карты. С помощью этого фактора корректируются смещения по высоте.

Совокупность четырех факторов позволяет методу преодолеть характерные для любого подхода SLAM проблемы, связанные с оценкой положения роботизированного автомобиля, шумными и искаженными данными сенсоров и ограниченностью в длительности работы. Поэтому метод хорошо подходит для создания карт высокого разрешения.

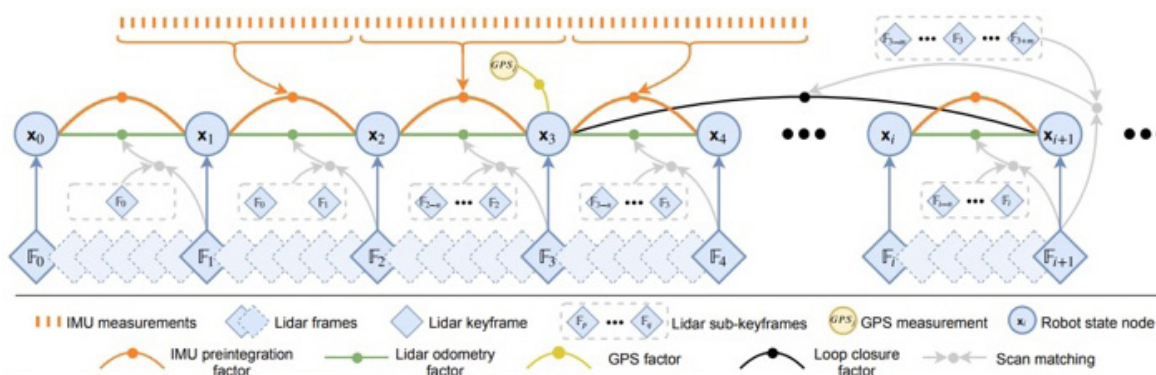


Рисунок 7 – Структурная схема метода LIO-SAM. Связь изменения положений роботизированного автомобиля и получаемой из наблюдений информации реализована в виде графа, узлами которого являются дискретные положения автомобиля. Переход между соседними положениями определяется 4 факторами: 1 – фактор инерциального устройства, заключающийся в интегрировании его данных; 2 – фактор лидарной одометрии, заключающийся в анализе облаков точек в разных положениях; 3 – фактор геолокации, заключающийся в увеличении точности локализации автомобиля с использованием устройства геолокации; 4 – фактор замыкания траектории, который увеличивает точность карты при повторном прохождении автомобилем знакомой траектории [19]

Figure 7 – Block diagram of the LIO-SAM method. The relationship between changes in the autonomous vehicle's state and the information obtained from observations is implemented in the graph form, where the nodes represent the vehicle states. The transformation between states is determined by 4 factors: 1 – pre-integration factor, which assumes integration of IMU data to obtain relative transformation, 2 – LIDAR odometry factor, which consists in analyzing point clouds in different positions, 3 – geolocation factor, which implies usage of the geolocation device to increase localization accuracy and 4 – loop closure factor, which increases the accuracy of the map when the vehicle recognizes the repeated trajectory [19]

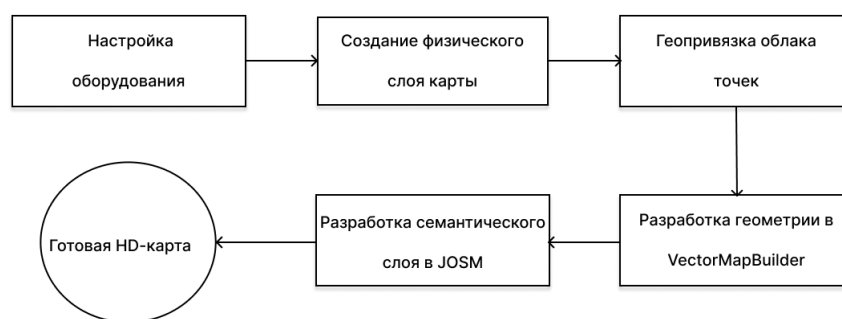


Рисунок 8 – Методология разработки HD-карты.
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Methodology of HD map development.
Source: compiled by authors.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методология разработки карты. LIO-SAM является эффективным SLAM подходом, однако качество результата зависит от большого числа факторов, начиная от выбора оборудования и заканчивая установкой гиперпараметров, также как и качество семантической карты зависит от точности геометрического слоя и выбора подходящих инструментов проектирования. В данной главе приводятся этапы разработки с объяснением характерных особенностей каждого из них. Полная схема методологии представлена на рисунке 8.

Разберем подробнее каждый из этапов:

Настройка оборудования. Для сбора данных необходимо наличие 3 сенсоров. Первый сенсор – 9-осевое инерциальное устройство, которое измеряет ориентацию в пространстве, угловые скорости и линейные ускорения в трех проекциях соответственно. Работа устройства сопровождается искажением из-за статического шума, который должен быть скомпенсирован калибровкой – для этого данные с устройства записываются в течение нескольких часов, а затем решается задача оптимизации для выявления степени влияния шума [20]. Чем точнее данные IMU, тем лучше работает SLAM подход. Лидар должен быть установлен на автомобиле таким образом, чтобы он сканировал всю область с обзором в 360 градусов и покрывал дорогу перед транспортным средством. Для подхода LIO-SAM важно знать трансформацию между лидаром и инерциальным устройством, причем существенную роль играет только матрица поворота, потому что относительное расстояние между сенсорами не изменяется при движении робо-

тизированного автомобиля. Для нахождения трансформации записываются данные с сенсоров, после чего они калибруются в рамках решения задачи оптимизации [21]. Модуль геолокации получает позицию в географических координатах, калибровка для него при этом не требуется, так как важна только точность определения географических координат, а не относительное положение сенсора.

Создание физического слоя карты. Перед запуском метода LIO-SAM необходимо задать конфигурацию системы: назначить ковариации модели и геолокации, которые дают информацию для фильтра Калмана [22] о степени доверия математической модели и наблюдениям сенсоров. Также важно определить трансформации между инерциальным устройством и лидаром, шумы сенсоров, использование высоты в геолокации, расстояние между ключевыми кадрами сканов, диапазон поиска особых точек и другие характеристики. Таким образом, подход имеет большое количество гиперпараметров, и его результаты зависят от целого набора факторов, которые можно проверить только на практике. Лидарная карта должна собираться автомобилем на небольшой скорости, и маршрут должен быть построен с наибольшим количеством замкнутых траекторий для поддержания стабильности глобального облака и увеличения общей точности. Полученная карта представлена несколькими файлами формата pcd (pointcloud), в которых отдельно хранятся траектории движения автомобиля, облако точек с особыми объектами и глобальное облако точек. Для дальнейшей работы подходит именно карта с особыми свойствами, так как там хорошо различимы границы объектов.

Геопривязка облака точек. Формат *pcd* не поддерживает геопривязку, все точки имеют локальное смещение по осям относительно начального положения. Внутри метода LIO-SAM используется всемирная система геодезических параметров Земли 1984 г. WGS84 [23]. Географические координаты, выраженные в широте, долготе и высоте, проецируются на плоскость в виде локальных смещений, используемая проекция при этом – UTM (Universal Transverse Mercator) [24], поперечная проекция Меркатора – это система картографических проекций, в которой поверхность Земли разделена на 60 вытянутых в меридиональном направлении зон шириной 6 градусов. Такие зоны обозначаются кодом, который должен быть известен для тестирования подхода LIO-SAM. Для дальнейшей работы с картой требуется использование проекции MGRS (Military Grid Reference System) [25], которая является производной от UTM – каждая UTM зона, в свою очередь, делится на более маленькие ячейки со сторонами в 100 км. Каждая ячейка представлена кодом UTM зоны и дополнительными буквами, базис системы координат находится в нижнем левом углу для каждой зоны соответственно. Для геопривязки облака точек необходимо задать всем его точкам смещение, равное расстоянию от проекции точки начала отсчета до начала координат соответствующей зоны MGRS.

Разработка геометрии Vector Map Builder. Vector Map Builder [26] – это инструмент, предоставленный для общего пользования компанией Tier4 для разработки карт формата Lanelet2 из облака точек. Разработка карты ведется в плоскости MGRS проекции облака точек, как показано на рисунке 9.

Функционал позволяет анализировать 3D облако точек, изменять его внешний вид или измерять расстояния. Проектирование осуществляется в плоском 2D режиме на виде сверху. Инструмент поддерживает прорисовку линий, обозначение узлов точек, создание лейнлетов и установление правил дорожного движения, но лучше всего он подходит для создания геометрического слоя, то есть прорисовки границ дорог. Это связано с интерфейсом программы и его ориентированностью на работу с облаком точек: он хорошо подходит для прорисовки линий по точкам в крупном масштабе для соблюдения высокой точности карты, но плохо подходит для проектирования семантики – наложение лейнлетов поверх облака точек выглядит громоздко при плотной дорожной сети. Предоставленный для семан-

тики набор инструментов является неполным, в нем отсутствуют, например, шаблоны некоторых примитивов и такие функции, как копирование набора атрибутов, что затрудняет работу с массивом лейнлетов.

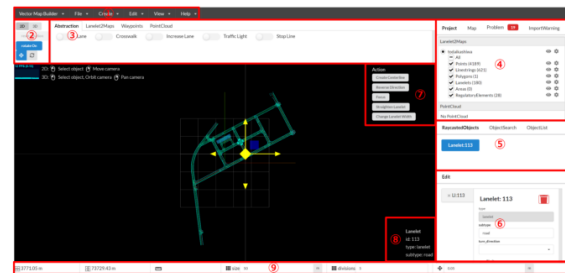


Рисунок 9 – Интерфейс среды разработки Vector Map Builder: 1 – заглавное меню; 2 – переключение камеры в режимах 2D и 3D; 3 – поле выбора объекта для отрисовки; 4 – поле отображения элементов; 5 – поле поиска объектов; 6 – редактирование объектов; 7 – список специальных действий для выбранного элемента; 8 – информация об объекте под курсором; 9 – панель справочной информации
Источник: Vector Map Builder [26].

Figure 9 – Vector Map Builder development environment interface: 1 – main menu, 2 – 2D and 3D mode views, 3 – object selection field, 4 – element display field, 5 – object search field, 6 – object editing, 7 – special actions for the selected element, 8 – object information, 9 – reference information panel
Source: Vector Map Builder [26].

Разработка семантического слоя в JOSM. Для работы с семантикой карты используется инструмент Java Open Street Map (JOSM) [27]. Он удобен тем, что содержит ряд специально разработанных авторами форматов шаблонов, позволяющих быстро создавать примитивы формата Lanelet2, указывать их атрибуты и назначать отношения между ними. На данном этапе разработки указываются атрибуты линий, создаются лейнлеты (дорожные полосы) и назначаются регуляционные элементы. Программа обладает удобным функционалом для работы с примитивами, позволяет быстро копировать атрибуты и редактировать существующие элементы. Интерфейс инструмента показан на рисунке 10.

Данная методология является мобильной, что означает, что она может применяться не только в городе, но и в условиях бездорожья, на воде или при съемке поверхности с воздуха. Информативность семантических карт может меняться в зависимости от среды использования, но инструменты создания карты остаются такими же. Однако подход не

является универсальным для всех сенсоров: у устройств разных производителей отличаются драйверы и внутренние параметры, и поэтому их предварительная настройка, калибровка, синхронизация по времени и адаптация под подход LIO-SAM может отличаться в зависимости от конкретного набора сенсоров, но все эти действия включены в пункт методологии, а все остальные этапы остаются без изменений.

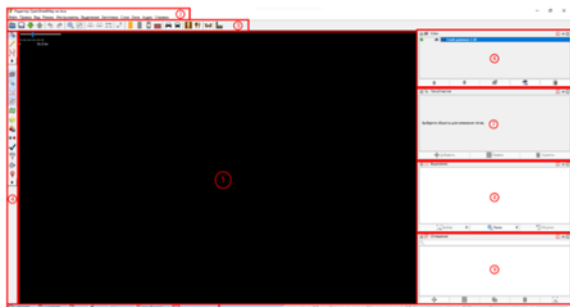


Рисунок 10 – Интерфейс среды разработки Java Open Street Map: 1 – вид карты; 2 – заглавное меню; 3 – инструменты работы файлов и основные шаблоны, включающие шаблоны примитивов lanelet2; 4 – панель инструментов; 5 – панель измерительных инструментов; 6 – панель слоев и подложек; 7 – панель атрибутов; 8 – панель выделения и редактирования элементов; 9 – панель отношений между объектами
Источник: Java Open Street Map [27].

Figure 10 – Java Open Street Map interface: 1 – Map view, 2 – main menu, 3 – File operation tools and basic template, 4 – toolbar, 5 – measuring tools panel, 6 – Layers panel, 7 – Attributes panel, 8 – selection panel, 9 – panel of relations between objects.
Source: Java Open Street Map [27].



Рисунок 11 – Зона проведения экспериментов – г. Иннополис
Источник: спутниковый снимок.

Figure 11 – Testing zone (Innopolis city)
Source: satellite shot.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Эффективность описанной выше методологии проверяется экспериментально исходя из критериев качества, указанных ранее. В рамках экспериментальной части приводится реализация методологии для создания HD-карты г. Иннополиса. Цель проектирования карты – предоставление информации для модулей прогнозирования, локализации и планирования.

Описание условий испытаний. Дорожная зона представлена несколькими кварталами, которые можно объехать по замкнутой траектории (рисунок 11). Особенности зоны являются полное отсутствие светофоров и наличие участков с круговым движением. Географическая зона MGRS – 39U UB.

Транспортное средство Hyundai Santa FE изображено на рисунке 12. Автомобиль оснащен модулем на крыше, к которому подключены сетевое устройство, лидар и приемник GPS.

На рисунке 13 показаны используемые сенсоры для сбора лидарной карты.

Инерциальное устройство IMU Xsens-GTi-710 располагается в багажнике автомобиля. Лидарное устройство Velodyne VLP32 с 32 лазерными лучами установлено над модулем на крыше и наклонено вперед на небольшой угол для покрытия дороги впереди транспортного средства. Приемник GPS сигнала «Ориент» установлен в модуль на крыше. Приемник обменивается данными с наземной станцией, которая находится в здании для уточнения сигнала.



Рисунок 12 – Беспилотный автомобиль Hyundai Santa FE с набором сенсоров для проведения испытаний
Источник: составлено авторами.

Figure 12 – Autonomous vehicle Hyundai Santa FE with sensor kit for testing
Source: compiled by authors.

Сенсоры после установки в автомобиль были откалиброваны: просчитаны и убраны шумы в инерциальном устройстве, найдена относительная трансформация между лидаром и IMU, а также настроен режим приема и обработки поправок по позиции у приемника GPS для обеспечения точности в 30 см. Все вычисления проводятся на локальном компьютере, установленном в багажнике автомобиля. Программное обеспечение для работы с сенсорами и алгоритмом LIO-SAM выполняется в ROS1 и ROS2 (Robotics Operating System) [28, 29], а также были использованы программные компоненты комплекса технологий в открытом доступе Autoware [30].



Рисунок 13 – Набор сенсоров для сбора лидарной карты: инерциальное устройство IMU Xsens-GTi-710 (слева), лидар Velodyne VLP32 (в центре) и приемник GPS сигнала «Ориент» (справа)
Источник: составлено авторами.

Figure 5.3 – Sensor kit to build lidar map. IMU Xsens-GTi-710 (on the left), Lidar Velodyne VLP32 (in center), GNSS receiver "Orient" (on the right)
Source: compiled by authors

Проведение испытаний для сбора карты. Для проведения экспериментов был составлен маршрут, состоящий из траекторий, показанных на рисунке 14.

Выбор такого маршрута обосновывается использованием фактора замкнутой траектории подхода LIO-SAM – повторный проезд роботизированного автомобиля по знакомой территории увеличивает точность расположения объектов вокруг него. Для срабатывания этого фактора необходимо повторение автомобилем положений, пройденных ранее, для этого хорошо подходят зоны с кольцевым движением. Если участок дороги имеет перекрестное движение – для замыкания траектории рекомендуется использовать только повороты – пересечение перекрестка напрямую из нового положения в старое приводит к образованию второго слоя карты, как будто эти дороги находятся друг над другом.



Рисунок 14 – Маршрут испытаний. Для обеспечения высокой точности и надежности выбираются замкнутые траектории, обозначенные цветом и цифрами 1, 2 и 3 соответственно
Источник: составлено авторами.

Figure 14 – Test route. To ensure high accuracy and reliability, closed trajectories are selected – they are indicated with color and numbers 1, 2 and 3, respectively
Source: compiled by authors.

При проведении испытаний также необходимо учитывать скорость автомобиля – большое ускорение и скорость могут повлиять на возникновение больших значений на этапе интегрирования данных инерциального устройства, что приводит к ошибке. Рекомендованная скорость движения – не более 20 км/ч.

Алгоритм убирает динамические объекты во время движения: машины, велосипедисты, мотоциклы, пешеходы и другие. Однако те же объекты в статике, например, автомобили на парковке, попадают в облако точек карты. При этом, если при повторном проезде по маршруту этот объект уже будет отсутствовать, он пропадет и на карте.

Чтобы карта приняла правильную ориентацию в пространстве по направлениям Север-Юг-Запад-Восток, необходимо активировать GPS фактор. Для срабатывания фактора GPS необходимо осуществить первоначальное движение для сравнения расхождений данных инерциального устройства и приемника GPS сигнала – после чего происходит выравнивание. Геопривязка осуществляется из начальной точки в проекции по MGRS зоне 39U UB. Полученная карта показана на рисунке 15.

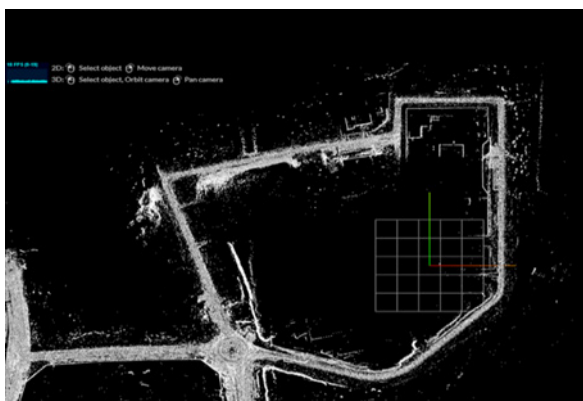


Рисунок 15 – Глобальное лидарное облако точек, составляющее физический слой HD-карты
Источник: составлено авторами.

Figure 15 – Global LIDAR pointcloud – physical layer of the HD map
Source: compiled by the authors.

Разработка HD-карты. Карта с геопривязкой была загружена для работы в программе Vector Map Builder для отрисовки границ дорог. Для этого сначала создается пустая подложка Lanelet2 карты, в 3D-режиме расставляются точки на соответствующей высоте, а затем после переключения в 2D точки соединяются линиями. Пример построения геометрии дорог на повороте показан на рисунке 16.

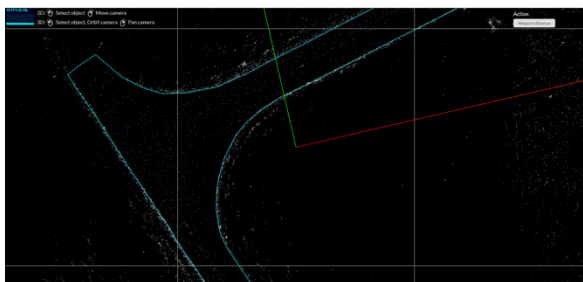


Рисунок 16 – отрисовка геометрии дорог в Vector Map Builder
Источник: составлено авторами.

Figure 16 - Design of the road boundaries
Source: Compiled by the authors.

Далее карта была импортирована в инструмент JOSM, где разработана семантика дорог: здесь включены лейнлеты дорожных полос, парковочные зоны, автобусные остановки и другие элементы. Результат части семантической карты показан на рисунке 17.

Карта из рисунка 17 является конечным результатом, который содержит всю необходимую информацию для использования в задачах прогнозирования, локализации и планирования. Смещение относительно соот-

ветствующего участка подложки OSM демонстрирует существенную разницу в точности геопривязки с RTK и подложки Open Street Map. Кольцевая дорога в левом нижнем углу демонстрирует неоднозначность проектирования: данный участок содержит виртуальные лейнлеты (дорожные полосы), количество которых определяется проектировщиком, поэтому данная карта могла быть выполнена по-другому.

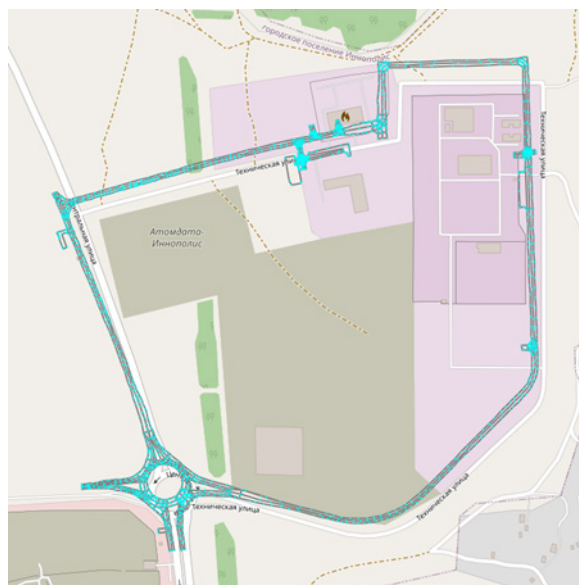


Рисунок 17 – Участок семантической карты, спроектированный в JOSM на фоне подложки Java Open Street Map
Источник: составлено авторами.

Figure 17 – Semantic layer of HD map designed in JOSM with OSM map on the background
Source: Compiled by authors.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье была предложена методология создания HD-карт для беспилотного автомобиля, которая реализована на практике на примере разработки карты для г. Иннополиса. Полученную карту можно использовать как источник информации для решения задач прогнозирования, планирования и локализации с высокой точностью. Уровень детализации карты соответствует актуальной ситуации на дороге, которая отличается от фото спутников и подложки Open Street Map.

Предложенная методология является универсальной для среды, в которой она используется: город, бездорожье, съемка поверхности с воздуха или воды, но требует предварительной настройки оборудования и знания географических свойств зоны испытаний.

Однако у данного подхода можно выделить ряд недостатков, которые могут быть исправ-

лены в будущем. Среди них можно выделить ограничение по скорости, точность геопривязки при длительном использовании, а также большая часть семантики разработана вручную, что может быть исправлено частичной автоматизацией процесса с применением методов машинного обучения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Liu S. et al. Creating autonomous vehicle systems. *Synthesis Lectures on Computer Science*. 2020. Т. 8. №. 2. P. i-216.
2. Ghallabi F. et al. LIDAR-Based road signs detection For Vehicle Localization in an HD Map // 2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE, 2019. P. 1484-1490.
3. Ma W. C. et al. Exploiting sparse semantic HD maps for self-driving vehicle localization // 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2019. P. 5304-5311.
4. Liu R., Wang J., Zhang B. High definition map for automated driving: Overview and analysis // *The Journal of Navigation*. 2020. Т. 73. №. 2. pp. 324-341.
5. Pannen D. et al. How to keep HD maps for automated driving up to date // 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2020. Pp. 2288-2294.
6. Jaulin L. *Mobile robotics*. John Wiley & Sons, 2019.
7. Wang S., Wu Z., Zhang W. An overview of SLAM // *Proceedings of 2018 Chinese Intelligent Systems Conference*. Springer, Singapore, 2019. pp. 673-681.
8. Ko Y. et al. Key points estimation and point instance segmentation approach for lane detection // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021.
9. Haklay M., Weber P. «Openstreetmap: User-generated street maps» *IEEE Pervasive computing*, т. 7, No 4, pp. 12-18, 2008.
10. Dupuis M., Strobl M., Grezlikowski H. «Open-drive 2010 and beyond – status and future of the de facto standard for the description of road networks» в *Proc. of the Driving Simulation Conference Europe*, 2010. pp. 231-242.
11. R. Okuda, Y. Kajiwaru и K. Terashima, «A survey of technical trend of ADAS and autonomous driving», в *Technical Papers of 2014 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test*, IEEE, 2014. pp. 1-4.
12. Khan M. Q., Lee S. Gaze and eye tracking: Techniques and applications in ADAS // *Sensors*. 2019. Т. 19. №. 24. pp. 5540.
13. Poggenhans F., Pauls J.-H., Janosovits J. «Lanelet2: A high-definition map framework for the future of automated driving» в *2018 21st international conference on intelligent transportation systems (ITSC)*, IEEE, 2018. pp. 1672-1679.
14. Poggenhans F., J. Janosovits «Pathfinding and Routing for Automated Driving in the Lanelet2 Map Framework» в *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, IEEE, 2020. pp. 1-7.
15. Ahmad N., Ghazilla R. A. R., Khairi N. M., Kasi V. «Reviews on various inertial measurement unit (IMU) sensor applications». *International Journal of Signal Processing Systems*. 2013. т. 1, No 2. pp. 256-262.
16. Zhang J., Singh S. «Low-drift and real-time lidar odometry and mapping» *Autonomous Robots*. 2017. т. 41, No 2. Pp. 401-416.
17. Fu H., Yu R. LIDAR scan matching in off-road environments // *Robotics*. 2020. Т. 9. №. 2. P. 35.
18. Segal A., Haehnel D., Thrun S. Generalized-icp. *Robotics: science and systems*. 2009. Т. 2. №. 4. Pp. 435.
19. Shan T., Englot B., Meyers D., Wang W., Ratti C., Rus D. «Lio-sam: Tightly-coupled lidar inertial odometry via smoothing and mapping», в *2020 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS)*, IEEE. 2020. pp. 5135–5142.
20. Berkane S., Tayebi A. Position, velocity, attitude and gyro-bias estimation from imu and position information // *2019 18th European Control Conference (ECC)*. IEEE. 2019. pp. 4028-4033.
21. Gentil C. Le, T. Vidal-Calleja и S. Huang, «3d lidar-imu calibration based on upsampled preintegrated measurements for motion distortion correction» в *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2018. Pp. 2149-2155.
22. Welch G. F. Kalman filter // *Computer Vision: A Reference Guide*. 2020. Pp. 1-3.
23. Slater J. A., S. Malys, «WGS 84-Past, present and future» в *Advances in positioning and reference frames*, Springer, 1998. pp. 1-7.
24. Grafarend E. «The optimal universal transverse Mercator projection» в *Geodetic Theory Today*, Springer, 1995. pp. 51–51.
25. Hager J. W., Fry L. L., Jacks S. S., Hill D. R. «Datums, ellipsoids, grids, and grid reference systems» *DEFENSE MAPPING AGENCY HYDROGRAPHIC/ TOPOGRAPHIC CENTER WASHINGTON DC*. 1992.
26. Tier IV. «Vector Map Builder» (2018), url: https://tools.tier4.jp/feature/vector_map_builder_ll2 (accessed 11.09.2022).
27. O. source. «Java Open Street Map» (2014), url: <https://jism.openstreetmap.de> (accessed 11.09.2022).
28. Maruyama Y., Kato S., T. Azumi, «Exploring the performance of ROS2» в *Proceedings of the 13th International Conference on Embedded Software*, 201. pp. 1-10.
29. Reke M., Peter D., Schulte-Tigges J. «A self-driving car architecture in ROS2» в *2020 International SAUPEC/RobMech/PRASA Conference*, IEEE, 2020. pp. 1-6.
30. Raju V. M., Gupta V., Lomate S. Performance of open autonomous vehicle platforms: Autoware and Apollo // *2019 IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*. IEEE, 2019. pp. 1-5.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Родионов О. А. Вклад в общую работу составил 75%. Участвовал в разработке следующих разделов научной статьи: аннотации, введения, материалов и методов, результатов, заключения.

Рашид Б. Вклад в общую работу составил 25%. Участвовал в разработке следующих разделов научной статьи: аннотации, введения, результатов, заключения.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Oleg A. Rodionov. The contribution to the overall work is 75%. Participation in the development of the following sections of the scientific article: abstract, introduction, materials and methods, results, conclusion.

Rashid Bader. Contribution to the overall work was 25%. Participation in the development of the following

sections of the scientific article: abstract, introduction, conclusion.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Родионов Олег Александрович – старший инженер отдела разработки систем распознавания лаборатории беспилотных технологий.

Бадер Рашид – руководитель отдела разработки систем распознавания лаборатории беспилотных технологий.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oleg A. Rodionov – head engineer of the Recognition Systems Development Department of the Unmanned Technology Laboratory.

Bader Rasheed – head of the Recognition Systems Development Department of the Unmanned Technology Laboratory.

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

УДК 625.7:004.9
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-916-927>
EDN: VOJONE
Научная статья



АКТУАЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОГО ПОТОКА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОЕКТА ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ

Т. В. Боброва

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет «СибАДИ»

г. Омск, Россия,

bobrova.tv@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-0292-4421>

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье отражены основные тенденции и проблемы развития технологии информационного моделирования в дорожной отрасли России. Представлен комплекс взаимно интегрированных отечественных программных продуктов, обеспечивающих формирование и поддержку информационных моделей автомобильных дорог в процессе жизненного цикла. Установлено, что переход от традиционного имитационного моделирования строительных потоков к информационному моделированию потоковых систем требует детального анализа низовых элементов потоковой структуры. К таким элементам в системе комплексного дорожно-строительного потока относят линейные специализированные отряды.

Модели и методы. Единая информационная модель объекта в составе проекта организации строительства (ПОС) формирует общую стратегию управления строительством дороги. На стадии проекта производства работ (ППР) в календарном плане необходимо учесть технические и технологические особенности подрядной организации. На уровне ППР нужно создать новую структуру и определить параметры этой структуры таким образом, чтобы удовлетворить заданным ограничениям, установленным ПОС по сроку и затратам, а также предусмотреть определённые резервы для страхования возможных рисков. Целью исследования является разработка методики информационного моделирования специализированного дорожного потока в составе ППР с учетом оптимизации и актуализации его параметров применительно к условиям подрядной организации.

Результаты. Разработан алгоритм моделирования при создании обновленной структуры специализированного линейного потока в интегрированной компьютерной среде, обеспечивающий визуализацию стройплощадки, контроль и оперативное управление производством работ в среде общих данных. Рассмотрен пример реализации данного метода при проектировании специализированного потока сначала в составе ПОС, с последующей актуализацией этой модели в программе MS Project при разработке ППР на основе типовой технологической карты.

Заключение. Использование информационного моделирования создаёт широкие возможности для анализа и контроля хода работ на строительной площадке линейного потока, а также позволяет выполнять оперативную автоматизированную реструктуризацию загрузки машин отряда при корректировке объемов работ на захватках.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: информационное моделирование, специализированный дорожно-строительный поток, карта трудового процесса, интегрированная компьютерная среда.

Статья поступила в редакцию 03.10.2022; одобрена после рецензирования 08.11.2022; принята к публикации 19.12.2022.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Боброва Т. В. Актуализация параметров информационной модели дорожно-строительного потока при разработке проекта производства работ // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 6 (88). С. 916-927. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-916-927>

© Боброва Т. В., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-916-927>
EDN: VOJONE

UPDATING PARAMETERS OF AN INFORMATION MODEL FOR ROAD CONSTRUCTION FLOW IN WORK DEVELOPMENT PROJECT

Tatyana V. Bobrova

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)

Omsk, Russia

bobrova.tv@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-0292-4421>

ABSTRACT

Introduction. The article reflects the main trends and problems in the development of information modelling technology in the Russian road industry. A set of mutually integrated domestic software products is presented that provide the formation and support of information models of roads in the life cycle process. It has been established that the transition from traditional simulation modelling of building flows to information modelling of flow systems requires a detailed analysis of the lower elements of the flow structure. Such elements in the system of an integrated road construction flow include linear specialized detachments.

Models and methods. A single information model of an object as part of the construction organization project (COP) forms the overall strategy for managing the construction of the road. At the stage of the project for the production of works (PPW), it is necessary to take into account the technical and technological features of the contractor in the calendar plan. At the PPW level, it is necessary to create a new structure and define the parameters of this structure in such a way as to satisfy the specified restrictions established by the COP in terms of time and costs, and also provide for certain reserves for insuring possible risks. The aim of the study is to develop a methodology for information modelling of a specialized road flow as part of the PPW, taking into account the optimization and updating of its parameters in relation to the conditions of the contracting organization.

Results. A modelling algorithm has been developed for creating an updated structure of a specialized linear flow in an integrated computer environment, which provides visualization of a construction site, control and operational management of work in a shared data environment. An example of the implementation of this method is considered when designing a specialized flow, first as part of a COP, with the subsequent updating of this model in the MS Project program when developing a PPW based on a typical flow chart.

Conclusion. The use of information modelling creates wide opportunities for analyzing and monitoring the progress of work at the construction site of a linear flow, and also allows you to perform prompt automated restructuring of the loading of detachment vehicles when adjusting the amount of work at the work sites.

KEYWORDS: *information modelling, specialized road construction flow, labor process map, integrated computer environment.*

The article was submitted 03.10.2022; approved after reviewing 08.11.2022; accepted for publication 19.12.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Bobrova T. V. Updating parameters of an information model of road construction flow work development project. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (6): 916-927. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-916-927>

© Bobrova T. V., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

Эволюция информационного моделирования в виде BIM-технологий реализуется в строительной отрасли России на принципах сквозного цифрового представления объектов на разных стадиях их жизненного цикла. При этом учитываются, с одной стороны, общие международные тенденции, с другой стороны, уровень развития нормативной базы и особенности формирования национальной цифровой платформы [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Ведущие ученые и практики дорожной отрасли в своих публикациях отразили основные проблемы развития информационных технологий за последние десятилетия, обозначили перспективы развития и первоочередные задачи, которые, по их мнению, необходимо решить для полноценного внедрения этих технологий на этапах проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

Отечественные разработчики информационных технологий и инициатив с начала 2000-х гг. не только перенимали зарубежный опыт, но и активно участвовали в разработке и оптимизации программного обеспечения для стандартизации различных аспектов информационного моделирования. В настоящее время в рамках импортозамещения работают Российские компьютерные компании. Так, группа компаний *Model Studio CS* представила на российский рынок в 2022 г. комплексную линейку продуктов, включающую 19 модулей для строительных решений. «*Model Studio CS* – Строительные решения» – это программный продукт, работающий на платформе *nanoCAD* и *AutoCAD*¹.

По информации разработчиков, Российский программный комплекс *nanoCAD* – инженерный BIM реализует: построение единой информационной модели здания набором специализированных инструментов, оптимально решает поставленные проектные задачи. Благодаря поддержке экспорта в обменные файлы стандарта IFC, информационные модели инженерных систем, выполненные в *nanoCAD*, без каких-либо затруднений вливаются в общую информационную модель проектируемого объекта, реализуемую на любой BIM-платформе: *ARCHICAD*, *REVIT*, *Allplan* и т.д.

Применительно к автомобильным дорогам разработан ряд специальных взаимно интегрируемых систем [14]:

- CAD (САПР) – система автоматизированного проектирования (3D);
- GIS (ГИС) – геоинформационная система (3D);
- IPM (ИСУП) – информационная система управления проектами (3D+время=4D);
- АССР – автоматизированная система сметных расчётов (4D+ресурсы=5D);
- ИАСУ ДСР – интегрированная автоматизированная система управления дорожно-строительными работами;
- ITS (ИТС) – интеллектуальная транспортная система.

Указанные системы обеспечивают формирование и поддержку информационных моделей автомобильных дорог в процессе жизненного цикла. Система САПР-BIM ключевая, так как именно она предопределяет основные инженерные характеристики и потребительские свойства будущей автомобильной дороги.

На стадии проектирования в автоматизированных системах выполняют достаточно точные расчеты элементов автомобильной дороги, определяют объемы и стоимость строительных работ, сроки строительства. Несмотря на то, что проект организации строительства (ПОС), разрабатываемый на этой стадии, является обязательным документом для прохождения экспертизы, при заключении договора подряда строительные организации рассматривают его в большей степени как рекомендательный документ, диктующий в то же время директивные ограничения по срокам выполнения отдельных этапов и ввода объекта в эксплуатацию.

Единая информационная модель объекта, представленная в ПОС, формирует общую стратегию управления строительством объекта, но в процессе проектирования организации дорожно-строительных работ на разных стадиях жизненного цикла меняется не только уровень детализации элементов объекта, как это присуще строительству зданий, но могут существенно меняться технологические процессы при сооружении элементов дороги. Это означает, что при проектировании производства работ (ППР) необходимо выполнить актуализацию информационной модели в рамках определенных ограничений, предусмотренных проектом организации строительства.

¹ Алгоритм перехода на отечественные САПР и BIM-решения. URL: <https://www.nanocad.ru/products/#bim> (дата обращения: 26.09.22).

Для того чтобы осуществлять производство работ, подрядчик должен сформировать новый календарный план с учетом реальной ситуации на строительной площадке. Это особенно важно при продолжительном строительстве автомобильных дорог, учитывая следующие обстоятельства:

- многовариантность используемых машин для выполнения отдельных технологических операций по слоям дорожной конструкции;
- многообразие свойств грунтов и других строительных материалов, которые уточняются в процессе производства линейных работ;
- возможное смещение сроков производства работ относительно сезонов года в реализуемом календарном плане;
- режим работы подрядчика по сезонам года (в частности, сменность, длительность рабочей смены, вахтовый метод и т.д.).

Таким образом, если рассматривать дорожно-строительный поток как объект проектирования, то на уровне ППР нужно создать новую структуру и определить параметры этой структуры таким образом, чтобы удовлетворить заданным ограничениям, установленным ПОС по сроку и затратам, а также предусмотреть определённые резервы для страхования возможных рисков. Но есть более широкий круг задач на строительной площадке, требующий наличия информационных моделей, адекватно отражающих ход строительства. Это контроль материально-технического снабжения, своевременная поставка материалов на строительную площадку и в приобъектные склады, оперативное планирование и управление, контроль качества, обеспечение безопасных условий труда и многое другое. Авторы [15] относят задачу проектирования организации работ на стройплощадке к одной из важнейших научных и практических задач, которые необходимо отработать на уровне «Открытого BIMa».

Большинство работ этого научного направления посвящено моделированию комплексного дорожно-строительного потока на основе имитационного моделирования систем [16, 17, 18, 19, 20]. Вопросы оптимизации потоковых систем при переходе от имитационного моделирования к информационному с использованием современных программных средств рассмотрены в работах [21, 22, 23, 24] на основе теории структурно-параметрического синтеза. Данный метод предусматривает формирование потоковой структуры на двух уровнях: на первом уровне – моделирование и оптимизацию отдельных элементов потоковой системы; на втором – рассмотрение сводного потока как объекта во вза-

имодействии с окружающей средой. Применительно к строительным системам, в частности к организации комплексного дорожно-строительного потока, эта концепция была впервые предложена и реализована в работе [25] с использованием инструментария MS Project и других компьютерных программ календарного планирования производства. В то же время ряд вопросов моделирования элементов потоковых систем в транспортном строительстве, к которым относится прежде всего линейный специализированный дорожный поток, требует дальнейшего развития и совершенствования.

Разработка календарных планов в составе ППР является функцией подрядчика. Эти информационные модели требуют тщательной подготовки и должны далее встраиваться в систему оперативного управления производственной программой дорожной организации, включая взаимодействие с обеспечивающими подсистемами (подсобным производством, транспортом, поставками материальных ресурсов, техническим обслуживанием машин и другими факторами производства). Необходимо не только создать новую оптимальную структуру, обеспечить возможности визуализации процессов производства работ, но и учесть ограничения, накладываемые на неё вышестоящим уровнем – проектом организации строительства. Главным звеном структуры дорожно-строительного производства является специализированный дорожно-строительный поток, функционирующий в различных природных и производственных условиях. Продукция специализированного потока – законченный конструктивный элемент, подготовленный для производства последующих работ. Целью исследования является разработка методики информационного моделирования специализированного дорожного потока в составе ППР с учетом оптимизации и актуализации его параметров применительно к условиям подрядной организации.

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ

Приступая к расчету и моделированию специализированного потока на конструктивном элементе дороги, мы должны принять те ограничения по срокам производства работ, которые заложены в составе ПОС проектной организацией. Т.е. принять условие:

$$T_{\text{сп}}^{\text{ППР}} \leq T_{\text{сп}}^{\text{ПОС}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{сп}}^{\text{ПОС}}$ и $T_{\text{сп}}^{\text{ППР}}$ – время действия специализированного потока в составе ПОС и ППР.

Состав специализированного отряда формируют на основе парка машин подрядной организации при выполнении технологического процесса на линейном конструктивном элементе. Этот состав может варьироваться в рамках ограничений по наличному или привлекаемому парку машин подрядчика. В качестве основы для подбора состава отряда принимают типовую технологическую карту или специально разрабатывают карту трудового процесса на строительство линейного конструктивного элемента дороги. ПОС не решает проблему подбора состава отряда, так как базируется на усреднённой нормативной базе и укрупнённых технологических операциях в составе государственных элементных сметных норм (ГЭСН)².

Для оптимизации состава специализированного отряда и сменного фронта работ достаточно выполнить несколько расчетных итераций с изменением сменной захватки. Критерием локальной оптимизации сменного темпа могут служить затраты на единицу продукции отряда, трудовые или энергетические затраты, коэффициент использования машин отряда и др. Предпочтительнее использовать интегральный показатель, представляющий аддитивную свертку частных критериев [26]:

$$y^* = f(y) = \sum_{j=1}^n \frac{w_j y_j}{s_j} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где y_j – значение j -го критерия; s_j – нормирующий коэффициент, равный максимальному значению шкалы для j -го критерия и переводящий его в безразмерную величину; w_j – весовой коэффициент (вес) j -го критерия, пропорциональный его значимости и определяемый на основе экспертного анализа. Обычно весовые коэффициенты нормируются при $\sum_{j=1}^n w_j = 1$.

Результатом моделирования технологического процесса является оптимальный состав специализированного отряда (количество машин) и основные параметры потока:

- $l_{\text{см}}$ – сменный фронт работ (захватка), м;
- $t_{\text{разв}}$ – время развёртывания потока; ч;
- $t_{\text{св}}$ – время свёртывания потока, ч;
- $L_{\text{сп}}$ – фронт работ специализированного потока, м;

- $l_{\text{раст}}$ – организационное или технологическое растяжение фронта работ специализированного потока, м.

Информационное моделирование специализированного дорожного потока на конструктивном элементе дороги в составе ППР выполняют в среде автоматизированного календарного планирования (*Microsoft Project*, *Oracle Primavera*, *Project Spider* и др.). Для визуализации стройплощадки линейного отряда в течение рабочей смены возможно использование отечественных программных продуктов *Model Studio CS*, *nanoCAD*. Блок-схема моделирования и подготовки объекта к визуализации представлена на рисунке 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Реализация данного метода представлена на примере технологии строительства 2-слойного щебёночного основания (15 см + 15 см) на участке автомобильной дороги III технической категории протяжённостью 10 км. Для рассмотрения метода принята известная типовая технология и простое конструктивное решение, чтобы в большей степени отразить различие в подходах при проектировании ПОС и ППР на основе разных нормативных баз. В составе ПОС расчеты выполнены на основе ГЭСН в двух вариантах: 1 – при стандартной продолжительности смены 8 ч, во втором варианте продолжительность смены принята 12 ч (с учетом вахтового метода). В таблице представлен расчет состава отряда и определена длительность выполнения работ на дороге по нормативам ГЭСН. При продолжительности смены 12 ч она составила 52 дня, сменный темп 190 м. При 8-часовой смене, если работы будут выполняться этим же составом отряда, длительность составит 80 дней, сменный темп 125 м.

Для расчета специализированного потока при выполнении работ подрядчиком была использована типовая технологическая карта по устройству двухслойного щебёночного основания автомобильных дорог по методу заклинки на дороге II технической категории³. Длина захватки в типовой карте принята 150 м. При разработке технологической карты на принятый объект объёмы работ на 1 км были пересчитаны с учетом III технической категории (ширина основания 8,3 м).

² Государственные элементные сметные нормы (ГЭСН), утв. приказами Минстроя России №№ 871/пр – 876/пр от 26.12.2019 г. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/trades/view.gesn-2020.php> (дата обращения: 27.09.2022).

³ Технологические карты на устройство земляного полотна и дорожной одежды. Введены в действие распоряжением Минтранса России от 23.05.2003 г. № ОС-468-р. Изд-во РОСАВТОДОР. М., 2004. 357с.



Рисунок 1 – Блок-схема моделирования специализированного линейного потока в компьютерной среде
Источник: составлено автором

Figure 1 – Block diagram of specialized linear flow modelling in a computer environment
Source: compiled by the author

Учитывая ограничения на сроки выполнения работ в ПОС (52 дня), подбор состава отряда выполнялся при длине захватки от 190 м и более. Производительность машин определена на основе расчётно-аналитического метода в соответствии с типовой технологической картой. Моделирование технологических операций при разной длине захватки выполнено в программе MS Project. Оптимальная захватка по критерию минимальных затрат на эксплуатацию машин отряда со-

ставляла 192 м. На рисунке 2 представлен сменный график выполнения технологических операций на пяти захватках специализированного отряда (после развёртывания потока). На рисунке 3 – эпюры потребности уплотняющих машин с часовой загрузкой по результатам расчета в Project. Выполнены условия ПОС, оптимизирован состав отряда по типовой технологической карте, установлены параметры специализированного потока.

Таблица
Подбор состава отряда и определение длительности работ по ГЭСН
при строительстве 2-слойного щебеночного основания
Источник: составлено автором

Table
Selection of the composition of the detachment and determination of the duration of work
on GESN during the construction of a 2-layer crushed stone base
Source: compiled by the author

Технологический процесс (вид работ) / вид ресурсов	ГЭСН / ед. изм.	Показатель на ед. изм. по ГЭСН	Показа- тель на объект в ед. изм. ГЭСН	Количество чел.-смен, машинно-смен работы на объекте (при стандартной смене 8 ч)	Количество чел.-смен, машинно-смен работы (при работе вахтовым методом 12 ч)	Состав отряда, чел., маш.	Расчетная длитель- ность работы, дни (при 8-часовой смене)	Расчетная длитель- ность работы, дни (при 12- часовой смене)	Принятая длитель- ность работы на объекте, дни/ч при 12- часовой смене	Коэф- фициент загрузки ресурса (гр.8/ гр.10)
1	2	3	4	5	6	7	9	8	10	11
Строительство двухслойного щебеночного основания толщиной 30 см	ГЭСН 27-04-006- 03+ 27-04-006-02 / 1000м2		83						52/624	
Затраты труда рабочих	чел.-ч	62,6	5196	649	433	9	72	48	52	0,93
Затраты труда машинистов	чел.-ч	66,68	5534	692	461	9,5	73	49	52	0,93
Бульдозеры, мощность 59 кВт (80 л.с.)	маш.-ч	2,35	195	24	16	0,5	49	33	52	0,63
Автогрейдеры среднего типа, мощность 99 кВт (135л.с.)	маш.-ч	1,96	163	20	14	0,3	68	45	52	0,87
Погрузчики, грузоподъемность 5 т	маш.-ч	11,65	967	121	81	1,5	81	54	52	1,03
Катки дорожные самоходные вибрационные, масса более 8 т	маш.-ч	30,7	2548	319	212	4	80	53	52	1,02
Катки дорожные самоходные вибрационные, масса до 8 т	маш.-ч	14,25	1183	148	99	2	74	49	52	0,95
Распределители каменной мелочи	маш.-ч	0,57	47	6	4	0,25	24	16	52	0,30
Машины поливомоечные 6000 л	маш.-ч	5,2	432	54	36	0,8	67	45	52	0,86

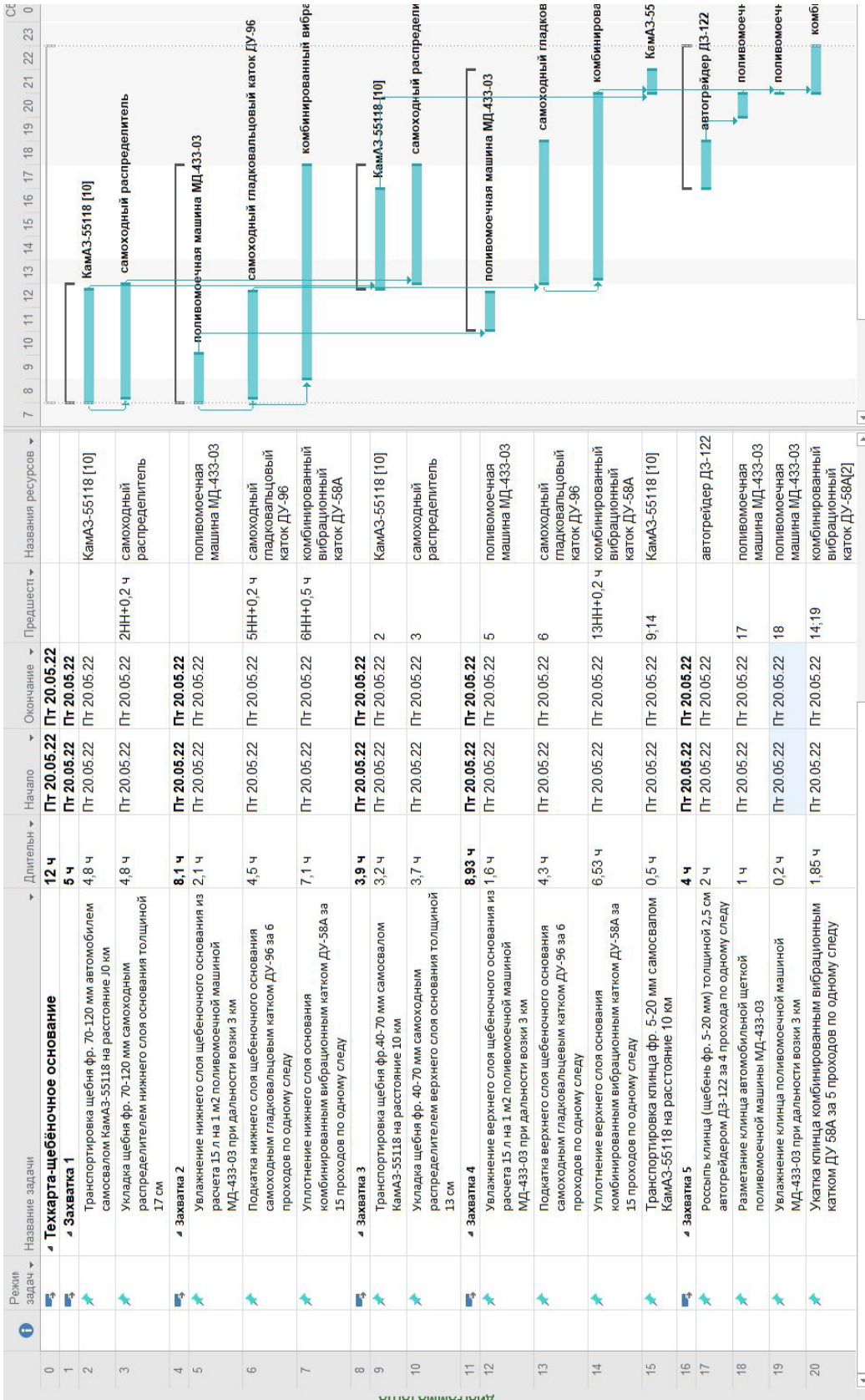


Рисунок 2 – Фрагмент диаграммы Ганта из MS Project: технологический процесс развёрнутого потока по строительству 2-слойного щебеночного основания (длительность смены 12 ч)

Источник: составлено автором

Figure 2 – A fragment of the Gantt chart from MS Project: the technological process of the developed flow for the construction of a 2-layer crushed stone base (12h shift duration)

Source: compiled by the author

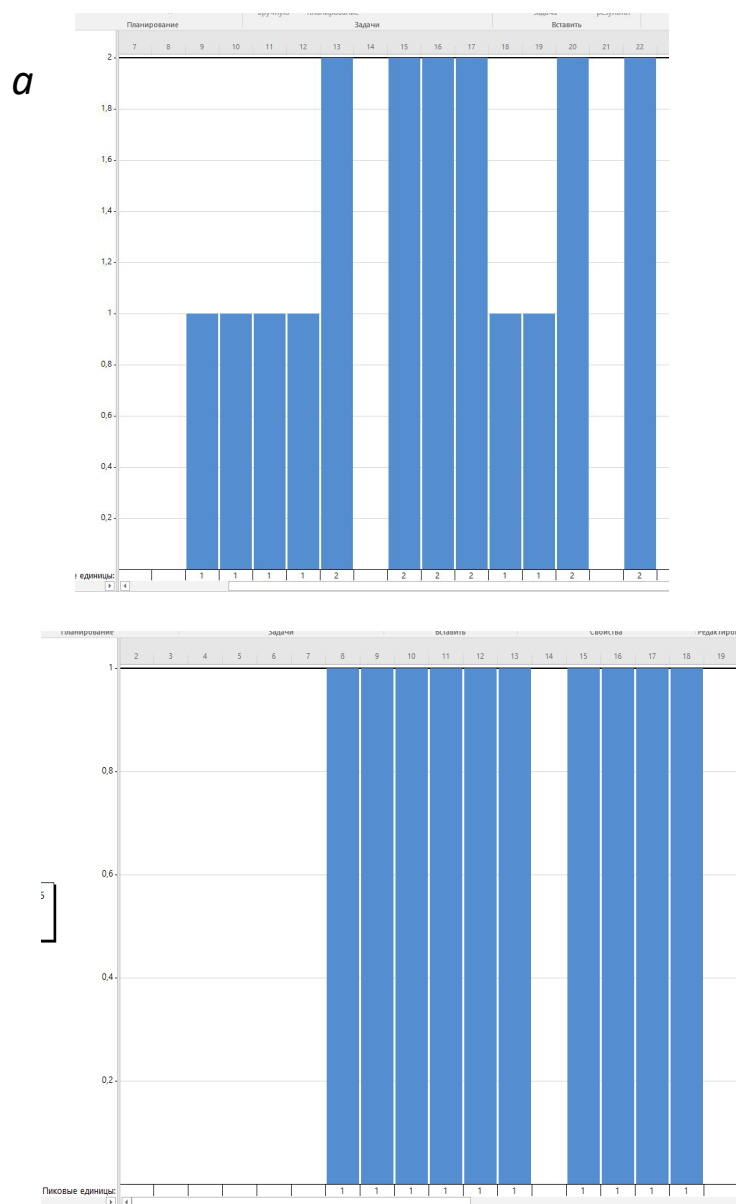


Рисунок 3 – Эпюры почасовой загрузки катков на захватках специализированного потока в программе MS Project:
 а – комбинированный вибрационный каток ДУ-58А;
 б – самоходный гладковальцовый каток ДУ-96
 Источник: составлено автором

Figure 3 – Diagrams of the hourly loading of rollers on the grippers of a specialized flow in the MS Project program:
 а) combined vibratory roller DU-58A;
 б) self-propelled smooth roller DU-96
 Source: compiled by the author

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проектировать организацию работ на стройплощадке подрядчика на основе нормативной базы ГЭСН нельзя, так в ней не отражаются все необходимые технологические операции, их последовательность и взаимосвязи. Для разработки проектов производства работ необходимо создавать и шире использовать современные карты трудовых процессов, типовые технологические карты на все, в том числе и на инновационные технологии.

2. В настоящее время в большинстве методических рекомендаций по разработке технологических карт операции на захватках отображаются в виде линейных графиков загрузки машин. Так учат студентов в автодорожных вузах. Однако это представление не даёт четкой картины перехода машин при работе на разных захватках. Использование инструментов информационного моделирования позволяет более четко установить взаимодействие машин в форме почасовой диаграммы Ганта и получить оптимальное решение.

3. Использование информационного моделирования создаёт широкие возможности для анализа и контроля хода работ на строительной площадке линейного потока в режиме визуализации, а также позволяет выполнять оперативную автоматизированную реструктуризацию загрузки машин отряда при корректировке объемов работ на захватках.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Возгомент Н. В. Современные вызовы и перспективы развития BIM-моделирования в России в эпоху цифровизации // E-Management. 2020. Т. 3, № 3. С. 20–27. DOI 10.26425/2658-3445-2020-3-3-20-27.
2. Khodabandelu A. Agent-based modeling and simulation in construction / A. Khodabandelu, J. W. Park // Automation in Construction. 2021. Vol. 131. P. 103882. DOI 10.1016/j.autcon.2021.103882.
3. Doukari O. Automatic generation of building information models from digitized plans / O. Doukari, D. Greenwood // Automation in Construction. 2020. Vol. 113. P. 103129. DOI 10.1016/j.autcon.2020.103129.
4. T. Omar and M.L. Nehdi. Automated Data Collection for Progress Tracking Purposes: A Review of Related Techniques. Springer International Publishing AG 2018 H. Rodrigues et al. (eds.), Facing the Challenges in Structural Engineering, Sustainable Civil Infrastructures, DOI 10.1007/978-3-319-61914-9_30.
5. Баранник С. В. Национальный BIM-стандарт – Соединенные Штаты Америки, Версия 3. Разд. 5. Практические документы (рус.) // BIM-стандарты Англии и США на русском языке. URL: <http://bimstandart.ru> (дата обращения: 12.04.2017).

6. Баранник С. В. Обзор британских стандартов семейства PAS 1192 // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2016. № 1(6). С. 24–27. DOI: 10.17273/CADGIS.2016.1.4.
7. Скворцов А. В. Модели данных BIM для инфраструктуры // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2015. № 1(4). С. 16–23. DOI: 10.17273/CADGIS.2015.1.2.
8. Скворцов А. В. Нормативно-техническое обеспечение BIM автомобильных дорог // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2014. № 2(3). С. 22–32. DOI: 10.17273/CADGIS.2014.2.4.
9. Сарычев Д. С. Информационное моделирование при разработке проектной и рабочей документации // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2015. № 2(5). С. 20–24. DOI: 10.17273/CADGIS.2015.2.3.
10. Скворцов А. В. Общая среда данных как ключевой элемент информационного моделирования автомобильных дорог // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2015. № 2(5). С. 37–41. DOI: 10.17273/CADGIS.2015.2.6.
11. Сарычев Д. С., Скворцов А. В. Элементы моделей автомобильных дорог и уровни проработки как основа требований к информационным моделям // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2015. № 1(4). С. 30–36. DOI: 10.17273/CADGIS.2015.1.4.
12. Бойков В. Н., Скворцов А. В. Эволюция ГИС автомобильных дорог // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2017. № 1(8). С. 46–53. DOI: 10.17273/CADGIS.2017.1.7.
13. Бойков В. Н., Скворцов А. В., Сарычев Д. С. Цифровая автомобильная дорога как отраслевой сегмент цифровой экономики // Транспорт Российской Федерации. 2017. №2(75). С.56–60.
14. Максимычев О. И., Бойков В. Н. Поддержка жизненных циклов проектов дорожно-строительных работ в парадигме цифровой экономики. САПР и ГИС автомобильных дорог. 2019. № 1(12). С. 11–15. DOI: 10.17273/CADGIS.2019.1.2.
15. Бойков В. Н., Скворцов А. В. InfraBIM для автомобильных дорог // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2019. № 1(12). С. 4–9. DOI: 10.17273/CADGIS.2019.1.1.
16. Брызгалова Р. М., Воробьев В. С., Каталымова К. В. Имитационная модель управления стоимостью железнодорожного строительства // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2008. № 2. С. 51–57.
17. Воробьев В. С., Манаков А. Л. Концепция имитационного моделирования организации производства инфраструктурного комплекса железных дорог // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2013. № 1. С. 81–85.
18. Bobrova T., Vorobyev V. Linear structure taxonomy with the account of environmental polystructures impact. MATEC Web of Conferences 216, 01003 (2018). URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821601003>.
19. Боброва Т. В., Дубенков А. А., Титарь И. В. Совершенствование организационно-технологического проектирования линейных транспортных объ-

ектов на основе моделирования их пространственной декомпозиции // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 4(32). С. 169–175. DOI 10.18324/2077-5415-2016-4-169-175.

20. Боброва Т. В., Дубенков А. А. Календарно-сетевое планирование строительства линейных объектов в среде MS PROJECT // Вестник СибАДИ. 2017; 56 (4-5(56-57)). С. 68–77. DOI:10.26518/2071-7296-2017-4-5(56-57). С.68–77.

21. Волков В. А., Чудинов С. М. Системный анализ для структурно-параметрического синтеза // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: экономика. информатика. 2012. № 19 (138) Выпуск 24/1. С. 153–157.

22. Акимов С. В. Анализ проблемы автоматизации структурно-параметрического синтеза // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2011. №. 2-2 (24). С.204–211.

23. Аристов А. О. Теория квазиклеточных сетей: научная монография. М: МИСиС, 2014. 188 с. URL: https://vk.com/wall1563794_1577.

24. Аристов А. О. Модели организации движения транспортных потоков на основе дискретных структур // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. Т. 6, №. 12. С. 662– 675.

25. Боброва Т. В. Структурно-модульная параметризация дорожно-строительного потока в системе информационного моделирования // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (61). С. 86–95. DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_86.

26. Микони С. В. Теория и практика рационального выбора: монография. М.: Маршрут, 2004. 463 с.

REFERENCES

1. Vozgoment N.V. Modern challenges and prospects for the development of BIM-modeling in Russia in the age of digitalization. *E-Management*. 2020;3(3):20-27. (In Russ.) <https://doi.org/10.26425/2658-3445-2020-3-3-20-27>

2. Khodabandelu. A., Park J. W. Agent-based modeling and simulation in construction. *Automation in Construction*. 2021; Vol. 131: 103882. DOI 10.1016/j.autcon.2021.103882.

3. Doukari O., Greenwood D. Automatic generation of building information models from digitized plans. *Automation in Construction*. 2020; Vol. 113:103129. DOI 10.1016/j.autcon.2020.103129.

4. Omar T. and Nehdi M. L. Automated Data Collection for Progress Tracking Purposes: A Review of Related Techniques. Springer International Publishing AG 2018 H. Rodrigues et al. (eds.). Facing the Challenges in Structural Engineering. *Sustainable Civil Infrastructures*. DOI 10.1007/978-3-319-61914-9_30.

5. Barannik S. V. Natsionalnyy BIM-standart – Soyedinennyye Shtaty Ameriki. Versiya 3. Razd. 5. Prakticheskiye dokumenty (rus.). *BIM-standarty Anglii i SShA na russkom yazyke*. Available at: <http://bimstandart.ru> (accessed 12.04.2017).

6. Barannik S. V. Obzor britanskikh standartov semeystva PAS 1192 [Overview of the British standards of the PAS 1192 family]. *SAPR i GIS avtomobilnykh dorog*. 2016; 1 (6): 24?27. DOI: 10.17273/CADGIS.2016.1.4. (In Russ.)

7. Skvortsov A. V. Modeli dannykh BIM dlya infrastruktury [BIM data models for infrastructure]. *SAPR i GIS avtomobilnykh dorog*. 2015; 1(4): 16-23. DOI: 10.17273/CADGIS.2015.1.2. (In Russ.)

8. Skvortsov A. V. Normativno-tekhnicheskoye obespecheniye BIM avtomobilnykh dorog [Regulatory and technical support of BIM of motor roads]. *SAPR i GIS avtomobilnykh dorog*. 2014; 2(3): 22?32. DOI: 10.17273/CADGIS.2014.2.4. (In Russ.)

9. Sarychev D. S. Informatsionnoye modelirovaniye pri razrabotke proyektnoy i rabochey dokumentatsii [Informational modeling during the development of design and working documentation]. *SAPR i GIS avtomobilnykh dorog*. 2015; 2(5): 20?24. DOI: 10.17273/CADGIS.2015.2.3. (In Russ.)

10. Skvortsov A. V. Obshchaya sreda dannykh kak klyuchevoy element informatsionnogo modelirovaniya avtomobilnykh dorog [General data environment as a key element of information modeling of highways]. *SAPR i GIS avtomobilnykh dorog*. 2015; 2(5): 37?41. DOI: 10.17273/CADGIS.2015.2.6. (In Russ.)

11. Sarychev D. S. Skvortsov A. V. Elementy modelirovaniya avtomobilnykh dorog i urovni prarabotki kak osnova trebovaniy k informatsionnym modelyam [Elements of road models and development levels as the basis for requirements for information models]. *SAPR i GIS avtomobilnykh dorog*. 2015; 1(4): 30–36. DOI: 10.17273/CADGIS.2015.1.4. (In Russ.)

12. Boykov V. N. Skvortsov A. V. Evolyutsiya GIS avtomobilnykh dorog. [Evolution of GIS of highways]. *SAPR i GIS avtomobilnykh dorog*. 2017; 1(8): 46-53. DOI: 10.17273/CADGIS.2017.1.7. (In Russ.)

13. Boykov V. N., Skvortsov A. V., Sarychev D. S. Tsifrovaya avtomobilnaya doroga kak otraslevoy segment tsifrovoy ekonomiki [Digital highway as a branch segment of the digital economy]. *Transport Rossiyskoy Federatsii*. 2017; 2 (75):56-60. (In Russ.)

14. Maksimychyev O. I. Boykov V. N. Podderzhka zhiznennykh tsiklov proyektov dorozhno-stroitelnykh rabot v paradigme tsifrovoy ekonomiki [Support of life cycles of road construction projects in the paradigm of the digital economy]. *SAPR i GIS avtomobilnykh dorog*. 2019; 1 (12): 11-15. DOI: 10.17273/CADGIS.2019.1.2 (In Russ.)

15. Boykov V. N. Skvortsov A. V. InfraBIM dlya avtomobilnykh dorog [InfraBIM for highways]. *SAPR i GIS avtomobilnykh dorog*. 2019; 1(12): 4-9. DOI: 10.17273/CADGIS.2019.1.1. (In Russ.)

16. Bryzgalova R. M., Vorobyev V. S. Katalymova K. V. Imitatsionnaya model upravleniya stoimostyu zheleznodorozhnogo stroitelstva [Imitation model of management of the cost of railway construction]. *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka*. 2008; 2: 51-57. (In Russ.)

17. Vorobyev V. S., Manakov A. L. Kontseptsiya imitatsionnogo modelirovaniya organizatsii proizvodstva infrastrukturalnogo kompleksa zheleznnykh dorog [Kon-

septsiya imitatsionnogo modelirovaniya organizatsii proizvodstva infrastruktornogo kompleksa zheleznykh dorog]. *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka*. 2013; 1: 81-85. (In Russ.)

18. Bobrova T., Vorobyev V. Linear structure taxonomy with the account of environmental polystructures impact. *MATEC Web of Conferences* 216. 01003 (2018). URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821601003>

19. Bobrova T. V., Dubenkov A. A., Tytar I. V. Sovershenstvovaniye organizatsionno-tekhnologicheskogo proyektirovaniya lineynykh transportnykh ob'yektov na osnove modelirovaniya ikh prostranstvennoy dekompozitsii. [Sovershenstvovaniye organizatsionno-tekhnologicheskogo proyektirovaniya lineynykh transportnykh ob'yektov na osnove modelirovaniya ikh prostranstvennoy dekompozitsii] *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2016; 4(32): 169-175. DOI 10.18324/2077-5415-2016-4-169-175. (In Russ.)

20. Bobrova T. V., Dubenkov A. A. Calendar-network planning of construction of linear objects in the medium of ms project. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017;56(4-5(56-57)):68-77. (In Russ.) [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-4-5\(56-57\)-68-77](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-4-5(56-57)-68-77)

21. Volkov V. A., Chudinov S. M. Sistemnyy analiz dlya strukturno-parametricheskogo sinteza [System analysis for structural-parametric synthesis]. *Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. seriya: ekonomika. informatika*. 2012; 19 (138) Vypusk 24/1: 153-157. (In Russ.)

22. Akimov S. V. Analiz problemy avtomatizatsii strukturno-parametricheskogo sinteza [Analysis of the problem of automation of structural and parametric synthesis]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo*

universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki. 2011; 2-2 (24): 204-211. (In Russ.)

23. Aristov A. O. Teoriya kvazikletochnykh setey nauchnaya monografiya [Theory of quasi-cell networks scientific monograph]. M: MISiS. 2014: 188. Available at: https://vk.com/wall1563794_1577 (In Russ.)

24. Aristov A. O. Modeli organizatsii dvizheniya transportnykh potokov na osnove diskretnykh struktur [Models of the organization of traffic flows based on discrete structures]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiiy zhurnal)*. 2011; T. 6. №. 12: 662- 675. (In Russ.)

25. Bobrova T. V. Strukturno-modulnaya parametrizatsiya dorozhno-stroitel'nogo potoka v sisteme informatsionnogo modelirovaniya [structural and modular parameterization of road construction flow in the information modeling system]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*. 2022; 2 (61): 86–95. DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_86. (In Russ.)

26. Mikoni S. V. Teoriya i praktika ratsionalnogo vybora: monografiya [Theory and practice of rational choice: monograph]. Moscow.: Marshrut. 2004: 463. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Боброва Татьяна Викторовна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Проектное управление и информационное моделирование в строительстве».

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Tatyana V. Bobrova – Dr. of Sci., Professor, Project Management and Information Modelling in Construction Department.

УДК 691.32:666.97
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-928-935>
EDN: VTDBAG
Научная статья



ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ БАКТЕРИАЛЬНЫМИ РАСТВОРАМИ, ИНИЦИИРУЮЩИМИ ОТЛОЖЕНИЕ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ. ОБЗОР

Л. В. Ильина*, Л. Н. Тацки, К. С. Дьякова

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин), г. Новосибирск, Россия

nsklika@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8520-4453>

stf@sibstrin.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0184-5489>

kseniya-perevalova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3412-555X>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Обработка поверхности играет важную роль в защите декоративного камня и бетона от воздействия вредных факторов внешней среды. Для защиты каменных поверхностей могут быть использованы биодобавки в виде карбонатогенных бактерий, продуктом жизнедеятельности которых является карбонат кальция.

Материалы и методы. Проведен подбор и анализ публикаций, содержащих в себе результаты исследований и экспериментов, позволяющих сделать выводы о целесообразности применения бактериальных растворов при поверхностной обработке.

Выводы. Образование слоя карбоната кальция на поверхности материала уменьшает газопроницаемость, снижает водопоглощение, повышая долговечность бетона.

Установлено, что поверхностная обработка цементного камня растворами, содержащими культуры уробактерий, упрочняет поверхностный слой камня, однако не восстанавливает его прочность. Важно, чтобы образованный слой карбоната кальция на поверхности материала не закупоривал его поры. Должно соблюдаться химическое и структурное сходство между обрабатываемым материалом и образующимися карбонатными соединениями. Дозировка мочевины и хлорида кальция должна соответствовать количеству бактериальных клеток, так как избыток компонентов питательной среды приводит к их накоплению в порах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: обработка поверхности, известняк, бетон, уробактерии, образование карбоната кальция (кальцита), газопроницаемость, водопоглощение, долговечность бетона.

Статья поступила в редакцию 21.09.2022; одобрена после рецензирования 10.11.2022; принята к публикации 19.12.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Ильина Л. В., Тацки Л. Н., Дьякова К. С. Обработка поверхности материалов бактериальными растворами, инициирующими отложение карбоната кальция. Обзор // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 6 (88). С. 928-935. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-928-935>

© Ильина Л. В., Тацки Л. Н., Дьякова К. С., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-928-935>
EDN: VTDBAG

TREATMENT OF MATERIAL SURFACES WITH BACTERIAL SOLUTIONS TO INITIATE THE DEPOSITION OF CALCIUM CARBONATE. REVIEW

Liliya V. Ilyina*, Lyudmila N. Tatski, Kseniya S. Dyakova
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)
Novosibirsk, Russia
nsklika@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8520-4453>
stf@sibstrin.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0184-5489>
kseniya-perevalova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3412-555X>
*corresponding author

ABSTRACT.

Introduction. Surface treatment plays an important role in protecting decorative stone and concrete from the effects of harmful environmental factors. To protect stone surfaces, dietary supplements in the form of carbonatogenic bacteria, the product of which is calcium carbonate, can be used.

Materials and methods. The selection and analysis of publications containing the results of research and experiments, which allow to draw conclusions about the feasibility of using bacterial solutions for surface treatment, has been carried out.

Conclusions. The formation of a layer of calcium carbonate on the surface of the material reduces gas permeability, reduces water absorption, increasing the durability of concrete.

It was found that the surface treatment of cement stone with solutions containing cultures of urobacteria strengthens the surface layer of the stone, but does not restore its strength. It is important that the formed layer of calcium carbonate on the surface of the material does not clog its pores. The chemical and structural similarity between the processed material and the resulting carbonate compounds must be observed. The dosage of urea and calcium chloride should correspond to the number of bacterial cells, since excess components of the nutrient medium leads to their accumulation in the pores.

KEYWORDS: surface treatment, limestone, concrete, urobacteria, formation of calcium carbonate (calcite), gas permeability, water absorption, durability of concrete.

The article was submitted 21.09.2022; approved after reviewing 10.11.2022; accepted for publication 19.12.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Liliya V. Ilyina, Lyudmila N. Tatski, Kseniya S. Dyakova Treatment of material surfaces with bacterial solutions to initiate the deposition of calcium carbonate. Review. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (6): 928-935. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-928-935>

© Ilyina L. V., Tatski L. N., Dyakova K. S., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

Способность карбонатогенных бактерий в процессе своей жизнедеятельности выделять карбонат кальция может быть использована для получения поверхностных защитных покрытий [1]. Авторы предлагают использовать процесс биоминерализации в качестве средства защиты и восстановления каменных поверхностей. При этом отмечается, что приобретаемая защита усиливается с возрастом.

В публикации [2] указывается, что образование кальцита (CaCO_3) некоторыми видами бактерий является обычным явлением. Карбонат кальция может образовывать поверхностное покрытие на каменных материалах (биоосаждение) или образовывать связующий материал для ремонта трещин (биоцементация) [1, 3].

На пористой поверхности известняка авторами [4] удалось получить способом биоосаждения слой CaCO_3 , толщиной до 500 мкм. Для получения защиты на поверхности песчаника использовали методы покрытия и погружения [5]. Установлено, что оба метода дают возможность получить слой толщиной 50–100 мкм, однако последний нецелесообразен по экологическим соображениям.

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

При обработке поверхностных трещин их предварительно заполняют частицами наполнителя с бактериями, а затем вводят обрабатывающий реагент. Возможно введение частиц наполнителя с бактериями одновременно с реагентом в виде пасты [1, 4]. Эти методы уменьшают пористость трещин, что приводит к сокращению необходимого объема карбоната кальция для их залечивания. Глубина трещины, которую возможно закрывать таким способом, ограничена несколькими сантиметрами [4].

Авторы [1] поместили статуи из известняка в климатическую камеру ускорения старения. Установлено, что необработанные экземпляры имели поверхностные следы повреждений, а обработанные остались без изменения.

В 1990 г. получен европейский патент на обработку зданий из известняка, основанную на способности ряда бактерий осаждать карбонат кальция [6], и создано общество Calcite SA. Процесс заключается в опрыскивании обрабатываемой поверхности бактериальной суспензией. После этого культуру подкармливают ежедневно или раз в два дня специальной средой для образования поверхностного слоя CaCO_3 . Суточная частота кормления

оказалась пригодной для мелкозернистого известняка, а двухсуточная – для крупнозернистого известняка. Постепенно образующиеся минеральные частицы заполняют поры на поверхности и внедряются в структуру камня, обеспечивая его защиту от внешней среды с сохранением газопроницаемости [1].

ВЛИЯНИЕ БИОДОБАВОК НА ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

В статье [7] сравниваются свойства материалов на основе портландцемента при введении биодобавок в состав твердеющего цементного раствора или путём обработки поверхности уже затвердевшего раствора. Использовались уробактерии *Bacillus pasteurii*, *Bacillus subtilis* и *Bacillus sphaericus*. Культивация бактерий осуществлялась в питательных растворах различных составов. Оптимальной средой для бактерий является питательный раствор «Дика», состоящий: пептон – 3 г/л, карбомид $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ – 10 г/л и NaHCO_3 – 2 г/л. После 36 ч культивации в растворе «Дика» концентрация бактерий в растворе составила $(2-5) \cdot 10^7$ клеток/мл³.

Контрольными являлись образцы из портландцемента, затворённые водой и твердевшие 3, 7, 14 и 28 сут в воздушно-влажных условиях. Определялись пределы прочности при сжатии и изгибе. Часть образцов затворялась раствором «Дика» с введением бактерий *Bacillus subtilis* и *Bacillus sphaericus*. Установлено, что в возрасте 3 сут прочностные свойства цементных образцов при сжатии ниже, чем контрольных. Однако уже к 7 сут твердения прочностные свойства образцов с бактериями начинают превышать прочность контрольных, причём к возрасту 14–28 сут превышение составляет 30–50%. Открытая пористость снизилась при этом с 39,4 до 30,1% [7].

Улучшение физико-технических свойств цементного камня авторы [7] объясняют образованием карбоната кальция, при взаимодействии H_2CO_3 – продукта жизнедеятельности бактерий с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, выделяющимся при твердении цемента [8, 3].

Следующим этапом исследования было определение возможности улучшения свойств цементного камня путем обработки поверхности оболочек растворами, содержащими культуры бактерий *Bacillus subtilis* и *Bacillus sphaericus*. Образцы твердели 28 сут в воздушно-влажных условиях, а затем погружались в раствор, содержащий культуру бактерий. Использовались растворы следующего состава: раствор «Дика» (без NaHCO_3) с 20 г/л карбами-

да $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ и 5 г/л CaCl_2 (как источник Ca^{2+}). После 7 сут хранения в растворе образцы ополаскивались водой и испытывались. Установлено, что $R_{\text{сж}}$ и $R_{\text{изг}}$ образцов, дополнительно хранившихся в растворе «Дика», на 5–8% выше, чем контрольных, испытанных через 28 сут хранения в воздушно-влажных условиях. Хранение образцов в растворах, содержащих бактерии, выше чем контрольных на 12–18% при снижении капиллярной пористости цементного камня на 20–24%. Это авторы объясняют уплотнением поверхностного слоя цементного камня образовавшимся CaCO_3 .

Таким образом, поверхностная обработка цементного камня растворами, содержащими культуры уробактерий, уплотняет и упрочняет поверхностный слой за счёт заполнения пор кристаллами CaCO_3 .

Авторами [7] также изучалась возможность «залечивания» трещин и восстановления прочности цементного камня путем его обработки культурами бактерий. Для этого образцы-балочки 10х10х30 мм разламывались, поверхности разлома совмещались и фиксировались, после чего они помещались на 7–35 сут в питательный раствор, содержащий культуры бактерий. Установлено, что через 7–14

сут поверхности разлома образцов полностью зарастают, что чётко представлено на микрофотографиях (рисунок). Однако прочность образцов не восстанавливается и через 35 сут хранения в растворах с бактериями составляет всего 3–5% от прочности контрольных образцов 28-суточного возраста. Таким образом, поверхностная обработка цементного камня растворами, содержащими культуры бактерий, «залечивает» трещины, но не восстанавливает прочность цементного камня.

Ввиду ограниченного времени хранения растворов, содержащих культуры бактерий, предлагается использовать способность ряда видов бактерий образовывать споры, которые могут храниться длительное время и «оживать», попадая в благоприятные условия. Установлено, что сухие биодобавки на основе спор уробактерий по эффективности не уступают культурам живых бактерий [7].

Целью исследования [9] было повышение прочности и водостойкости гипсового камня за счёт осуществления процесса биоминерализации – осаждения карбоната кальция в порах под воздействием штамма уробактерий *Bacillus sphaericus*, помещённого в среду, содержащую мочевины и кальций.

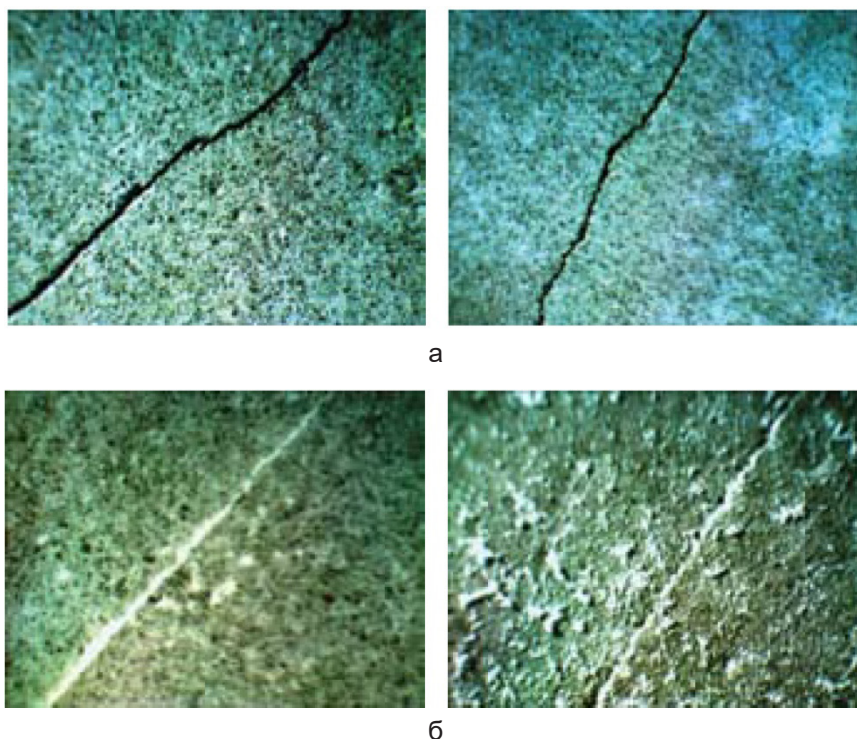
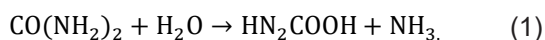


Рисунок – Поверхность разлома образцов [7]: а – исходные трещины; б – после обработки 14 сут раствором, содержащим культуру *B. Subtilis* [7]

Figure – Fracture surface of samples [7]: a) - initial cracks; b) after treatment for 14 days with a solution containing *B. Subtilis* culture [7]

Уробактерии вызывают осаждение CaCO_3 при гидролизе мочевины ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) на NH_3 и угольную кислоту (NH_2COOH) (1).



Аммиак, растворяясь в воде, повышает pH раствора, сдвигая при диссоциации угольной кислоты равновесие в сторону образования CO_3^{2-} . При наличии в растворе ионов Ca^{2+} они осаждаются в виде карбоната кальция (2).



Если указанные реакции происходят в затвердевшем гипсовом камне, то образующийся карбонат кальция оседает на стенках пор, понижая капиллярную пористость материала.

Образцы-балочки 10x10x30 мм твердили на воздухе 7 сут, а затем высушивались в течение 3 ч при температуре 60 °С. Контрольные образцы до испытания хранились в сухих условиях, а остальные погружались на 24 ч в растворы, содержащие различные добавки. После извлечения из раствора образцы промывались водой и сушились 3 ч при 60 °С. Определялись $R_{\text{сж}}$ и $R_{\text{изг}}$, капиллярная пористость, коэффициент водостойкости, микроструктура методом сканирующей электронной микроскопии.

Составы растворов были следующими:

1. Питательная среда и мочевины.
2. Питательная среда, мочевины и *Bacillus sphaericus*.
3. Питательная среда, мочевины и CaCl_2 .
4. Питательная среда, мочевины, CaCl_2 и *Bacillus sphaericus*.

Результаты испытания образцов показали следующее. Образцы составов 1–3 имеют физико-механические свойства, близкие к контрольному составу. Иные результаты продемонстрировал состав 4. Наличие в нём мочевины, CaCl_2 – источника ионов Ca^{2+} и бактерий привело к образованию микроструктур карбоната кальция, разместившихся в порах гипсового камня. В результате открытая пористость по сравнению с контрольными образцами уменьшалась в 2,25 раза, водостойкость повысилась в 1,82 раза, предел прочности при изгибе увеличился на 19%, при сжатии – на 10%. Таким образом, обработка гипсового камня водными растворами, содержащими уробактерии, мочевины и источник ионов Ca^{2+} , способствует улучшению физико-механических свойств за счёт осаждения в порах карбоната кальция. Информация может быть полезна при проведении реставрационных работ.

ПРИМЕНЕНИЕ КАРБОНАТОГЕННЫХ БАКТЕРИЙ *MUCOSOCOCCUS XANTHUS*

Бактериальная биоминерализация карбоната кальция (карбонатогенез) приводит к образованию различных фаз CaCO_3 . Известны три безводные модификации (кальцит, ватерит и арагонит), причём наиболее распространены первые две из них. В работе [10] утверждается, что карбонатная фаза не зависит от штамма бактерий. Вид полиморфной модификации карбоната кальция и её продуктивность во многом зависят от минерального субстрата.

Кальцитовые субстраты благоприятствуют прикреплению к ним бактерий и образованию кальцита. Степень прикреплённости бактерий к силикатным субстратам ниже, чем кальцитовым, в таких условиях образовывался ватерит. Таким образом, должно соблюдаться химическое и структурное сходство между подложкой и бактериальными образованиями.

При применении бактериальной обработки известняковых горных пород карбонатогенными бактериями, например, *B. diminuta* или *M. xanthus*, образуется так называемый «кальцитовый цемент». Это является основой для бактериального лечения строительных материалов [11]. Существенно, что лечение эффективно глубиной в несколько сантиметров, что полностью обеспечивает требуемую консервацию.

К. Родригес-Наварро с соавторами использовали бактерии *Mucosococcus xanthus* для создания слоя карбоната кальция глубиной до 500 мкм на поверхности пористого известняка без закупоривания пор. Установлено, что подобная обработка с точки зрения гидроизоляции аналогична часто применяемому покрытию этилсиликатами [12]. Испытания ультразвуком показали, что вновь образованные кристаллы CaCO_3 прочно прикреплены к исходному камню и представляют собой органо-минеральные композиты. Установлено, что *M. xanthus* способны индуцировать осаждение карбонатов, фосфатов и сульфатов в твёрдых и жидких средах. Недостаток бактерий *Bacillus* в том, что при образовании эндоспор (при изменении температуры, наличии питания и т.д.) может произойти неконтролируемый рост бактерий и образование биоплёнки [13].

Для развития бактерий *M. xanthus* необходим фосфор. Авторами [12] изготовлены две среды М-3 и М-3П, отличающиеся тем, что во второй из них содержался фосфатный буфер. Вследствие этого среда М-3П способна обеспечивать более высокую и продолжительную бактериальную активность и, как следствие, образование ромбоэдрических кристаллов кальция [12]. Вновь образованные карбонаты могут содержать некоторое количество органических молекул, про-

изведённых бактериями, эти органические молекулы могут укреплять кальцит, как, например, у иглокожих моллюсков, имеющих раковистый излом, типичный для твёрдых стёкол и металла.

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА СРЕДЫ И ТИПА БАКТЕРИАЛЬНОЙ КУЛЬТУРЫ НА МОРФОЛОГИЮ ОБРАЗУЮЩИХСЯ КРИСТАЛЛОВ

Целью исследования [14] являлось изучение влияния дозировки мочевины и хлорида кальция и зависящего от него количества образованного карбоната кальция, на эффективность обработки известняка с пористостью 15,8%. Образцы известняка погружали в растворы различного состава. Использованы микроорганизмы *Bacillus sphaericus*. Результаты сравнивались с экспериментами с этилсиликатами [15].

Установлено, что образцы, обработанные биоосаждением, показывали такое же водопоглощение и устойчивость к обработке ультразвуком, как образцы, обработанные этилсиликатом. Обработка поверхности последним даёт склонность к растрескиванию при высыхании [16, 17]. Для образцов из известняка обработка биоосаждением имеет преимущество из-за химической совместимости вновь образованного покрытия с матрицей. Этилсиликаты обладают способностью мигрировать внутрь камня, что безусловно является отрицательным моментом.

Авторы публикации [14] сделали следующие выводы. Дозировка мочевины и хлорида кальция должна соответствовать количеству бактериальных клеток, находящихся в камне. Дополнительное осаждение CaCO_3 будет значительно меньше по сравнению с вредными эффектами, связанными с накоплением солей и мочевины в порах известняка. Гидроизоляционный эффект увеличивается с увеличением количества кальция. Оптимальное количество кальция предварительно оценено обработкой погружением известняка в раствор, содержащий 20 г/л мочевины и 50 г/л хлорида кальция. Образцы, обработанные биоосаждением, имеют водопоглощение, близкое к величине для образцов, обработанных этилсиликатами [15].

Обработка поверхности играет большую роль в ограничении просачивания воды и различных вредных веществ в бетон. Известно множество покрытий для защиты поверхности бетона. Им свойственны следующие недостатки:

- 1) различный коэффициент теплового расширения основы и наносимого слоя;
- 2) разрушение с течением времени;
- 3) необходимость постоянного технического обслуживания.

Использование некоторых растворителей загрязняет окружающую среду [19]. В этой связи

предложен способ бактериальной минерализации с целью защиты строительного материала [6].

В публикации [18] для восстановления строительного раствора и бетона использовались чистые культуры *Bacillus sphaericus*, а также уреолетические смешанные культуры. Эффективность бактериальной обработки сравнивали с результатами, полученными при обработке поверхности акрилатами (3 варианта), комбинированными составами (3 варианта), проникающими герметиками (11 способов). Бактериальная обработка осуществлялась питательными средами из мочевины с хлоридом кальция или с уксусом (5 вариантов). Таким образом, выполнен большой объём экспериментов (27 вариантов). При этом показано, что тип бактериальной культуры и состав среды оказывают существенное влияние на морфологию образующихся кристаллов. В частности, установлено, что присутствие органических веществ, например, белка, в питательной среде изменяет морфологию кристаллов образующегося карбоната кальция. Разрушение бетона начинается с приповерхностных слоёв [20].

Использование чистой культуры бактерий привело к более выраженному снижению водопоглощения. Смешанные культуры дешевле, однако нанесённый слой в виде пасты имеет тенденцию к отслоению [18]. Образование слоя кальцита на поверхности уменьшает газопроницаемость, вместе с тем именно это свойство может рассматриваться как критерий долговечности бетона [21].

В [8] изучали влияние бактериального осаждения CaCO_3 на долговечность строительного раствора с различной пористостью, изменяющейся за счёт водоцементного отношения. Установлено, что осаждение карбоната на поверхности снижает водопоглощение в зависимости от пористости образцов, повышая морозостойкость. Результаты, полученные при обработке биоосаждением, аналогичны таковым при обычной обработке водоотталкивающими средствами.

В работе [22] рекомендуется наряду с эффектом от микробного осаждения карбонатов учитывать экономические показатели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ рассмотренных публикаций позволяет сделать следующие выводы:

- обработка поверхности известняка и бетона растворами, содержащими культуры бактерий, упрочняет поверхностный слой, не закупоривая поры, но не восстанавливает прочность основы;
- для прочного прикрепления образующегося карбоната кальция к основе необходимо химическое и структурное родство между основой и бактериальными образованиями;

- дозировка питательной среды должна соответствовать количеству бактериальных клеток, так как избыток мочевины и хлорида кальция приводит к их накоплению в порах материала;
- вновь образованные карбонаты кальция могут содержать некоторое количество органических молекул, произведённых бактериями, что способствует укреплению кальцита;
- образование слоя карбоната кальция на поверхности снижает водопоглощение и газопроницаемость, повышает морозостойкость бетона;
- несмотря на повышенную стоимость, рекомендуется использовать чистые бактериальные культуры, а не их смеси;
- основной полиморфной модификацией карбоната кальция должен быть кальцит.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. G. Le Metayer-Levrel, S. Castanier, G. Orialb, J.-F. Loubiere, J.-P. Perthuisot. Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony // *Sedimentary Geology*. 1999. Vol. 126(1-4). P. 25-34.
2. Boquet E., Boronat A., Ramos-Cormenzana A. Production of calcite (calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a common phenomenon // *Nature*. 1973. Vol. 246. P. 527-529.
3. De Muynck W., De Belie N., Verstraete W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review // *Ecological Engineering*. 2010. Vol. 36. P. 118-136.
4. Minto J., Tan Q., Lunn R., Mountassir El G., Guo H., Cheng X. Microbial mortar – restoration of degraded marble structures with microbially induced carbonate precipitation // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 180. P. 44-54.
5. Wen Kun Zhu, Tao Mu, Youkui Zhang, Tao Duan, XueGang Luo. Coating of microbially produced calcium carbonate onto stone materials // *Science China Technological Sciences*. 2015. Vol. 58. P. 266-272.
6. Adolphe J.-P., Loubiere J.-F., Paradas J., Soleilhavoup F. Procédé de traitement biologique d'une surface artificielle // *European patent*. 1990. №9040097.0 (after French patent No. 8903517, 1989).
7. Сивков С. П., Логинова Т. В., Мырина А. К. Биодобавки для сухих строительных смесей // *Сухие строительные смеси*. 2017. № 5. С. 20–23.
8. De Muynck W., Debrouwer D., De Belie N., Verstraete W. Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials // *Cem. Concr. Res.* 2008. Vol. 38(7). P. 1005-1014.
9. Улучшение свойств затвердевшего гипсового камня методами биотехнологии / Логинова Т. В., Мырина А. К., Сергеева Н. А., Карамаш А. О., Сивков С. П., Градова Н. Б. // *Успехи в химии и химической технологии*. 2015. Т. 29, № 7 (166). С. 53–55.
10. Rodriguez-Navarro C., Fadwa J., Schiro M., Ruiz-Agudo E., Gonzalez-Muñoz M.T. Influence of substrate mineralogy on bacterial mineralization of calcium carbonate: implications for stone conservation // *Applied and Environmental Microbiology*. 2012. Vol. 78. P. 4017-4029.
11. Gonzalez Muñoz, M.T., Rodriguez-Navarro C., Jimenez-Lopez C., Rodriguez-Gallego M. Method and product for protecting and reinforcing construction and ornamental materials. WO 2008/009771 A1 (2008).
12. Rodriguez-Navarro C., Rodriguez-Gallego M., Ben Chekroun K., Gonzalez-Munoz M.T. Conservation of Ornamental Stone by *Myxococcus xanthus*-Induced Carbonate Biomineralization // *Appl. Environ. Microbiol.* 2003. Vol. 69 (4). P. 2182-2193.
13. Tiano P., Biagiotti L., Mastromei G. Bacterial bio-mediated calcite precipitation for monumental stones conservation: methods of evaluation. // *J. Microbiol. Method*. 1999. Vol. 36. P. 139-145.
14. De Muynck W., Verbeken K., De Belie N., Verstraete W. Influence of urea and calcium dosage on the effectiveness of bacterially induced carbonate precipitation on limestone // *Ecological Engineering*. 2010. Vol. 36. P. 99-111.
15. Dick J., De Windt W., De Graef B., Saveyn H., Van der Meeren P., De Belie N., Verstraete W. Bio-deposition of a calcium carbonate layer on degraded limestone by *Bacillus* species // *Biodegradation*. 2006. Vol. 17(4). P. 357-367.
16. Maravelaki-Kalaitzaki P., Kallithrakas-Kontos N., Agioutantis Z., Maurigiannakis S., Korakaki D. A comparative study of porous limestones treated with silicon-based strengthening agents // *Prog. Org. Coat*. 2008. Vol. 62(1). P. 49-60.
17. Moropoulou A., Kouloumbi N., Haralampopoulos G., Konstanti A., Michailidis P. Criteria and methodology for the evaluation of conservation interventions on treated porous stone susceptible to salt decay // *Prog. Org. Coat*. 2003. Vol. 48. P. 259-270.
18. De Muynck W., Cox K., De Belie N., Verstraete W. Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. // *Constr. Build. Mater.* 2008. Vol. 22. (5). P. 857-885.
19. Perez J. L., Villegas R., Vale J. F., Bello M. A., Alcalde M. Effects of consolidant and water repellent treatments on the porosity and pore size distribution of limestone // *Preprints of International Colloquium on Methods of Evaluating Products For the Conservation of Porous Building Materials in Monuments, ICCROM*. 1995. P. 203-211.
20. Basheer L., Kropp J., Cleland D.J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review // *Construction and Building Materials*. 2001. Vol. 15. P. 93-103.
21. RILEM. RILEM TC116-PCD. Permeability of concrete as a criterion of its durability // *Materials and Structures*. 1999. Vol. 32. P. 174-179.
22. Okwadha G, Li J. Optimum conditions for microbial carbonate precipitation // *Chemosphere*. 2010. Vol. 81. P. 1143-1148.

REFERENCES

1. Metayer-Levrel G. Le, Castanier S., Orialb G., Loubiere J.-F., Perthuisot J.-P. Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony. *Sedimentary Geology*. 1999; Vol. 126(1-4): 25-34.
2. Boquet E., Boronat A., Ramos-Cormenzana A. Production of calcite (calcium carbonate) crystals by

soil bacteria is a common phenomenon. *Nature*. 1973; Vol.246: 527-529.

3. De Muynck W., De Belie N., Verstraete W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review. *Ecological Engineering*. 2010; Vol. 36: 118-136.

4. Minto J., Tan Q., Lunn R., Mountassir El G., Guo H., Cheng X. Microbial mortar – restoration of degraded marble structures with microbially induced carbonate precipitation. *Construction and Building Materials*. 2018; Vol. 180: 44-54.

5. Wen Kun Zhu, Tao Mu, Youkui Zhang, Tao Duan, XueGang Luo. Coating of microbially produced calcium carbonate onto stone materials. *Science China Technological Sciences*. 2015; Vol. 58: 266-272.

6. Adolphe J.-P., Loubiere J.-F., Paradas J., Soleil-havoup F. Procédé de traitement biologique d'une surface artificielle. *European patent*. 1990. №9040097.0 (after French patent No. 8903517, 1989).

7. Sivkov S. P., Loginova T. V., Mymrina A. K. Bioadditives for dry building mixes. *Suhie stroitel'nye smesi*. 2017; 5: 20-23. (in Russ.)

8. De Muynck, W., Debrouwer, D., De Belie, N., Verstraete, W. Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. *Cem. Concr. Res.* 2008; Vol. 38(7): 1005-1014.

9. Loginova T.V., Mymrina A.K., Sergeeva N.A., Karamash A.O., Sivkov S.P., Gradova N.B. Improving the properties of hardened gypsum stone by methods of biotechnology. *Uspehi v himii i himicheskoy tehnologii*. 2015; Vol. 29 No. 7 (166): 53-55. (in Russ.)

10. Rodriguez-Navarro C., Fadwa J., Schiro M., Ruiz-Agudo E., Gonzalez-Muñoz M.T. Influence of substrate mineralogy on bacterial mineralization of calcium carbonate: implications for stone conservation. *Applied and Environmental Microbiology*. 2012; Vol. 78: 4017-4029.

11. Gonzalez Muñoz M. T., Rodriguez-Navarro C., Jimenez-Lopez C., Rodriguez-Gallego M. Method and product for protecting and reinforcing construction and ornamental materials. WO 2008/009771 A1 (2008).

12. Rodriguez-Navarro C., Rodriguez-Gallego M., Ben Chekroun K., Gonzalez-Munoz M. T. Conservation of Ornamental Stone by *Myxococcus xanthus*-Induced Carbonate Biomineralization. *Appl. Environ. Microbiol.* 2003; Vol. 69 (4): 2182-2193.

13. Tiano P., Biagiotti L., Mastromei G. Bacterial bio-mediated calcite precipitation for monumental stones conservation: methods of evaluation. *J. Microbiol. Method.* 1999; Vol. 36: 139-145.

14. De Muynck W., Verbeken K., De Belie N., Verstraete W. Influence of urea and calcium dosage on the effectiveness of bacterially induced carbonate precipitation on limestone. *Ecological Engineering*. 2010; 36: 99-111.

15. Dick J., De Windt W., De Graef B., Saveyn H., Van der Meeren P., De Belie N., Verstraete W. Bio-deposition of a calcium carbonate layer on degraded limestone by *Bacillus* species. *Biodegradation*. 2006; Vol. 17(4): 357-367.

16. Maravelaki-Kalaitzaki P., Kallithrakas-Kontos N., Agioutantis Z., Maurigiannakis S., Korakaki D. A comparative study of porous limestones treated with silicon-based strengthening agents. *Prog. Org. Coat.* 2008; 62(1): 49-60.

17. Moropoulou A., Kouloumbi N., Haralampopoulos G., Konstanti A., Michailidis P. Criteria and methodology for the evaluation of conservation interventions on treated porous stone susceptible to salt decay. *Prog. Org. Coat.* 2003; Vol. 48: 259-270.

18. De Muynck W., Cox K., De Belie N., Verstraete W. Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. *Constr. Build. Mater.* 2008; Vol. 22. (5): 857-885.

19. Perez J. L., Villegas R., Vale J. F., Bello M. A., Alcalde M. Effects of consolidant and water repellent treatments on the porosity and pore size distribution of limestone. *Preprints of International Colloquium on Methods of Evaluating Products For the Conservation of Porous Building Materials in Monuments, ICCROM*. 1995: 203-211.

20. Basheer L.; Kropp J.; Cleland D.J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. *Construction and Building Materials*. 2001; 15: 93-103.

21. RILEM. RILEM TC116-PCD. Permeability of concrete as a criterion of its durability. *Materials and Structures*. 1999; Vol. 32: 174-179.

22. Okwadha G, Li J. Optimum conditions for microbial carbonate precipitation. *Chemosphere*. 2010; Vol. 81: 1143-1148.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Ильина Л. В. Организация работы авторов, постановка задачи исследования, доработка и правка текста статьи.

Тацки Л. Н. Обзор предшествующих исследований, обработка полученных данных, систематизация материала.

Дьякова К. С. Обзор предшествующих исследований, подготовка материала для статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Liliya V. Ilyina. Organization of the authors' work, setting the research problem, finalizing and editing the text of the article.

Lyudmila N. Tacki. Review of previous studies, processing of the data obtained, systematization of the material.

Kseniya S. Dyakova. Review of previous studies, preparation of material for the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ильина Лилия Владимировна – д-р техн. наук, проф., советник РААСН.

Тацки Людмила Николаевна – канд. техн. наук, доц.

Дьякова Ксения Сергеевна – аспирант.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Liliya V. Ilyina – Dr. of Sc., Councilor of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences

Lyudmila N. Tatski – Cand. Of Sc., Associate Professor.

Kseniya S. Dyakova – Post graduate student.

УДК 624.075
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-936-948>
EDN: WVVQNT
Научная статья



УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЯСОВ АНТЕННЫХ ОПОР

Ю. В. Краснощеков^{1*}, М. Ю. Заполева²

¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет «СибАДИ»

²ООО СМУ-175 «Радиострой»

г. Омск, Россия,

uv1942@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6695-1648>

m18kras@spartak.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7123-6457>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье решаются вопросы устойчивости сжатых поясов решетчатой конструкции как систем в виде неразрезных стержней, состоящих из элементов-панелей. В настоящее время расчетная длина сжатых элементов установлена нормами проектирования для расчета устойчивости без учета изменчивости, обусловленной влиянием многочисленных случайных и системных факторов. Такой подход не стимулирует к совершенствованию конструктивных решений, качеству их исполнения и контролю сооружения. И, самое главное, не позволяет реализовать заложенные нормами резервы несущей способности конструкций. Цель данного исследования – выявление и обоснование резервов несущей способности антенных опор решетчатой конструкции по критерию устойчивости сжатых поясов.

Материалы и методы. Показано, что значения коэффициента расчетной длины установлены нормами с запасом, обусловленным, в частности, обеспечением надежности конструктивных систем сжимаемых элементов. Предлагается рассматривать расчетную длину сжатых элементов как случайную величину. Решается задача по вероятностной оценке свободной (расчетной) длины центрально сжатого элемента как параметра критической силы потери устойчивости. Приведены возможные нормативные и расчетные значения коэффициента расчетной длины, обеспечивающие надежность расчета сжатых поясов антенных опор, принятой в действующих нормах проектирования. Для оценки изменчивости показателей устойчивости ставится задача проведения экспериментальных исследований, в частности, с измерением частот колебаний натурных конструкций. Управляя показателями изменчивости коэффициента расчетной длины можно регулировать не только надежностью, но и запасами несущей способности, предусмотренными нормами проектирования.

Выводы. Предлагаемый подход к расчету на устойчивость позволяет управлять расчетными значениями коэффициента расчетной длины путем контроля статистической изменчивости (коэффициента вариации). При наличии доступных способов измерения показателей описанный в статье подход к расчету сжатых элементов на устойчивость может быть эффективным средством и инструментом совершенствования конструктивных решений, качества их исполнения и контроля сооружения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: антенная опора, решетчатая конструкция, стержневая система, устойчивость элементов металлических конструкций, коэффициент расчетной длины, вероятностный расчет.

Статья поступила в редакцию 13.09.2022; одобрена после рецензирования 17.10.2022; принята к публикации 19.12.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Краснощеков Ю. В., Заполева М. Ю. Устойчивость поясов антенных опор // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 6 (88). С. 936-948. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-936-948>

© Краснощеков Ю. В., Заполева М. Ю., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-936-948>

EDN: WVVQNT

STABILITY OF ANTENNA SUPPORT BELTS

Yuriy V. Krasnoshchekov^{1*}, Maria Y. Zapoleva²

¹Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)

uv1942@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6695-1648>

²ООО SMU-175 «Radiostroy»

Omsk, Russia,

m18kras@spartak.ru

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The article deals with the issues of stability of compressed belts of lattice construction, as systems in the form of continuous rods consisting of panel elements. Currently, the estimated length of compressed elements is established by design standards for calculating stability without taking into account variability due to the influence of numerous random and systemic factors. This approach does not encourage the improvement of design solutions, the quality of their execution and the control of the structure. And most importantly, it does not allow to realize the reserves of the bearing capacity of structures laid down by the norms. The purpose of this study is to identify and substantiate the reserves of the bearing capacity of antenna supports of a lattice structure according to the criterion of stability of compressed belts.

Materials and methods. It is shown that the values of the calculated length coefficient are set by norms with a margin, due, in particular, to ensuring the reliability of structural systems of compressible elements. It is proposed to consider the estimated length of compressed elements as a random variable. The problem of probabilistic estimation of the free (calculated) length of a centrally compressed element as a parameter of the critical force of loss of stability is solved. The possible normative and calculated values of the calculated length coefficient are given, ensuring the reliability of the calculation of compressed antenna support belts, adopted in the current design standards. To assess the variability of stability indicators, the task is to conduct experimental studies, in particular, with the measurement of vibration frequencies of full-scale structures. By controlling the variability indicators of the calculated length coefficient, it is possible to regulate not only reliability, but also the load-bearing capacity reserves provided for by design standards.

Conclusions. The proposed approach to the calculation of stability allows to control the calculated values of the calculated length coefficient by controlling statistical variability (coefficient of variation). If there are available methods for measuring indicators, the approach described in the article to calculating compressed elements for stability can be an effective means and tool for improving design solutions, the quality of their execution and control of the structure.

KEYWORDS: antenna support, lattice structure, rod system, stability of elements of metal structures, coefficient of design length, probabilistic calculation.

The article was submitted 13.09.2022; approved after reviewing 17.10.2022; accepted for publication 19.12.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Krasnoshchekov Yuriy V., Zapoleva Maria Y. Stability of antenna support belts. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (6): 936-948. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-936-948>

© Krasnoshchekov Y. V., Zapoleva M. Y., 2022



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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. В настоящее время расчетная длина сжатых элементов решетчатых конструкций установлена нормами проектирования для расчета устойчивости без учета изменчивости величины коэффициента расчетной длины, обусловленной влиянием многочисленных случайных факторов. Такой подход не стимулирует к совершенствованию конструктивных решений, качеству их исполнения и контролю сооружения. И, самое главное, не позволяет реализовать заложенные нормами резервы несущей способности конструкций. Цель данного исследования – выявление и обоснование резервов несущей способности антенных опор решетчатой конструкции по критерию устойчивости сжатых поясов.

2. Предлагается рассматривать расчетную длину сжатых элементов как случайную величину. Решается задача по вероятностной оценке свободной (расчётной) длины центрально сжатого элемента как параметра критической силы потери устойчивости. Приведены возможные нормативные и расчетные значения коэффициента расчетной длины, обеспечивающие надежность расчета сжатых поясов антенных опор, принятой в действующих нормах проектирования. Основная проблема реализации такого подхода заключается в оценке изменчивости коэффициента расчетной длины. Дана оценка влияния на этот параметр изменчивости внешних воздействий и прочности стали. Для уточнения характеристик изменчивости показателей устойчивости ставится задача проведения экспериментальных исследований, в частности, с измерением частот колебаний натурных конструкций. Управляя показателями изменчивости коэффициента расчетной длины, можно регулировать не только надежностью, но и запасами несущей способности, предусмотренными нормами проектирования.

3. Установлено, что расчетные значения коэффициента расчетной длины μ приняты нормами с запасом, обусловленным как минимум необходимостью обеспечения надежности конструктивных систем сжимаемых элементов. Предлагаемый подход к расчету на устойчивость позволяет управлять расчетными значениями коэффициента расчетной длины путем контроля статистической изменчивости (коэффициента вариации). При наличии доступных способов измерения показателей описанный в статье подход к расчету сжатых элементов на устойчивость может быть эффективным средством и инструментом совершенствования конструктивных решений, качества их исполнения и контроля сооружения.

ВВЕДЕНИЕ

Антенные опоры – распространенный вид инженерных сооружений связи. Несущая система антенных опор выполняется обычно в виде башни или мачты с оттяжками. Изначально предпочтение отдавалось более экономичным по расходу материалов мачтам, но при наличии проблем с площадью застройки применяют башни [1, 2].

В настоящее время в связи с развитием систем сотовой связи осуществляется широкомасштабное строительство и реконструкция существующих металлических антенных опор. В условиях рыночной экономики возрастает конкурентоспособность сооружений, требующая поиска и применения нетрадиционных подходов при проектировании вновь возводимых объектов и необходимость оценки несущей способности с учетом фактического состояния реконструируемых сооружений.

Башни и стволы мачтовых опор различного назначения, как правило, проектируют в виде пространственных решетчатых конструкций, представляющих системы стержневых элементов (рисунок 1). Основными элементами являются многоярусные пояса, сжатые или растянутые от действия собственного веса и ветровой нагрузки, а также распорки и раскосы, выполняющие опорную функцию для неразрезных систем поясов.

Пояса выполняют из труб круглого или прямоугольного сечения, уголкового или специального гнутого профиля и расчленяются на панели длиной l . Несущая способность каждой панели сжатых поясов определяется из расчета на устойчивость и характеризуется расчетной длиной l_{ef} и радиусом инерции сечения i . Пространственную решетчатую конструкцию с поясами из труб или спаренных уголков допущено рассматривать как систему плоских, и для определения расчетной длины панели используются указания по проектированию плоских ферм. В общем случае обычно принимают $l_{ef} = l$. Расчетная длина панели из одиночных уголков зависит от структуры решетки и принимается в большинстве случаев, согласно СП «Стальные конструкции», равной l .

Известно, что расчетная длина сжатых элементов зависит от условий закрепления их концов и вида нагрузки (рисунок 2), является основным параметром местной устойчивости элементов пояса и определяется по формуле

$$l_{ef} = \mu l, \quad (1)$$

где μ – коэффициент расчетной длины.

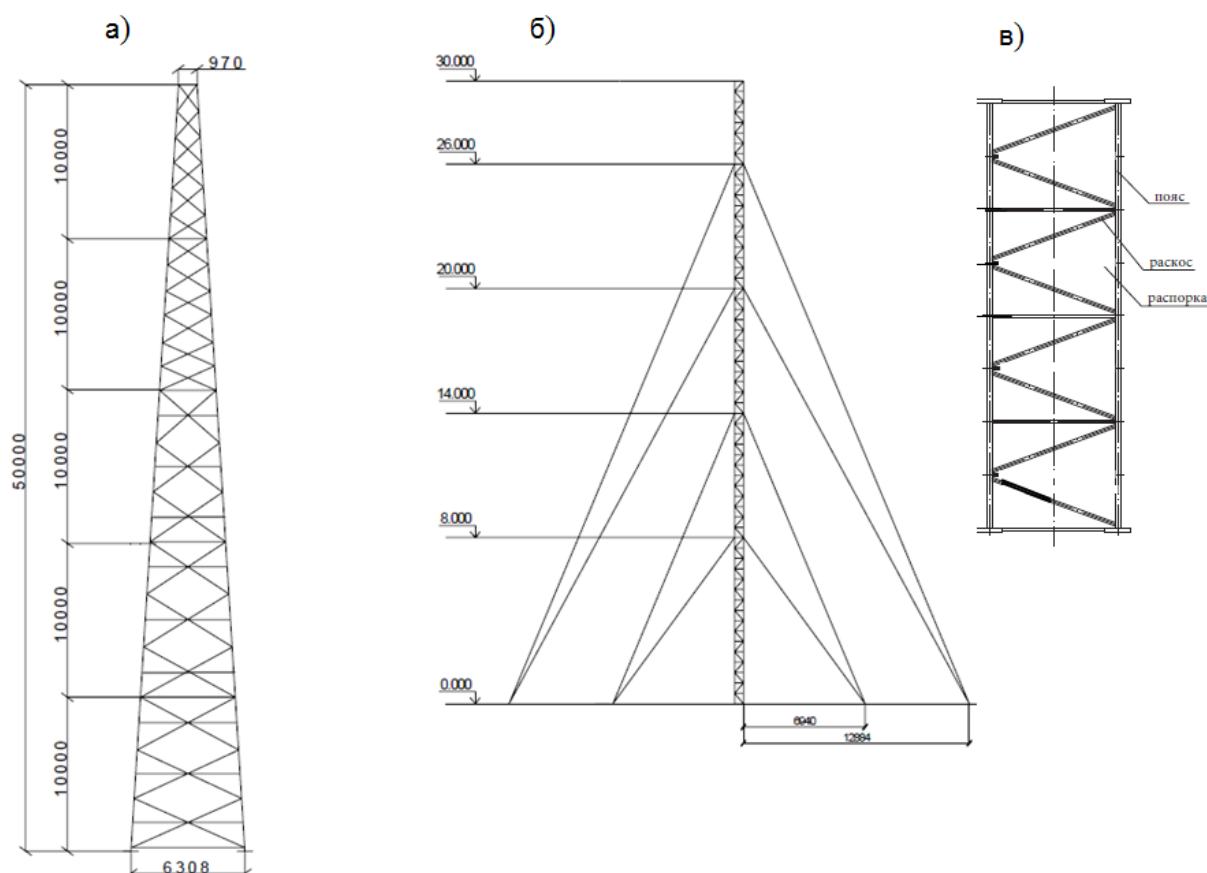


Рисунок 1 – Примеры конструктивных решений башни и мачты
 а – башня; б – мачта; в – вариант типовой секции ствола мачты
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Examples of tower and mast design solutions:
 a) tower; b) mast; c) a variant of a typical section of the mast trunk
 Source: compiled by the author.

Применительно к пространственным решетчатым конструкциям расчетная длина панели из одиночных уголков принимается в зависимости от типа пространственной решетки и способа крепления элементов решетки к поясу при значениях μ от 0,64 до 1. Если пояса из труб или спаренных уголков рассматривать как неразрезанный стержень постоянного сечения с различными усилиями в панелях, то из

предположения шарнирного сопряжения элементов решетки коэффициент μ определяется по эмпирической формуле

$$\mu = (0,17\alpha^3 + 0,83) \geq 0,8, \quad (2)$$

где α – отношение усилия, соседнего с максимальным, к максимальному усилию в панелях; при этом $1 \geq \alpha \geq 0,55$.

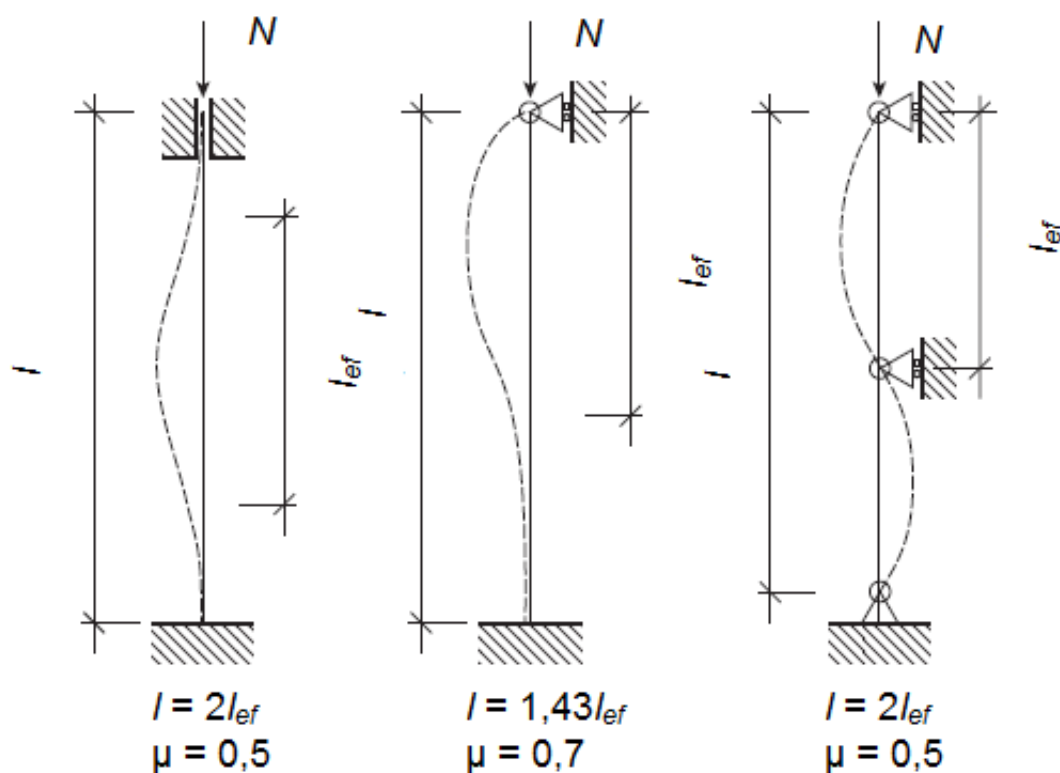


Рисунок 2 – Основные формы потери устойчивости центрально сжатых стержней
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – The main forms of loss of stability for centrally compressed rods
Source: compiled by the author.

Зависимость расчетной длины панели от числа панелей в неразрезном поясе в нормах проектирования напрямую не отмечена. Однако в косвенном виде такая зависимость просматривается. Например, в сооружении с элементами из одиночных уголков и структурой решетки по рисунку 1, в при отсутствии распорок в пределах длины расчетного участка l_m , которая принята равной длине двух панелей l , исходя из условия потери устойчивости в двух смежных панелях одновременно. При этом расчетная длина участка принимается $l_{ef} = \mu l_m$ и $\mu = 0,64$. Такая же ситуация складывается по причине возможности потери устойчивости в разных плоскостях конструкций с не совмещенными в смежных гранях узлами.

Таким образом, в настоящее время расчетная длина сжатых элементов решетчатых конструкций установлена нормами без учета изменчивости величины коэффициента расчетной длины, обусловленной влиянием

многочисленных случайных факторов. Такой подход не стимулирует к совершенствованию конструктивных решений, качеству их исполнения и контролю сооружения и не позволяет реализовать заложенные нормами резервы несущей способности конструкций.

Цель данного исследования – выявление и обоснование резервов несущей способности антенных опор решетчатой конструкции по критерию устойчивости сжатых поясов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

До внедрения метода расчета по предельным состояниям решались только вопросы общей устойчивости радиомачт и радиобашен (антенных опор). В расчетах конструкция ствола мачты рассматривалась как шарнирно-сочлененный многопролетный стержень, который может потерять устойчивость только из-за недостаточного учета податливости оттяжных опор.

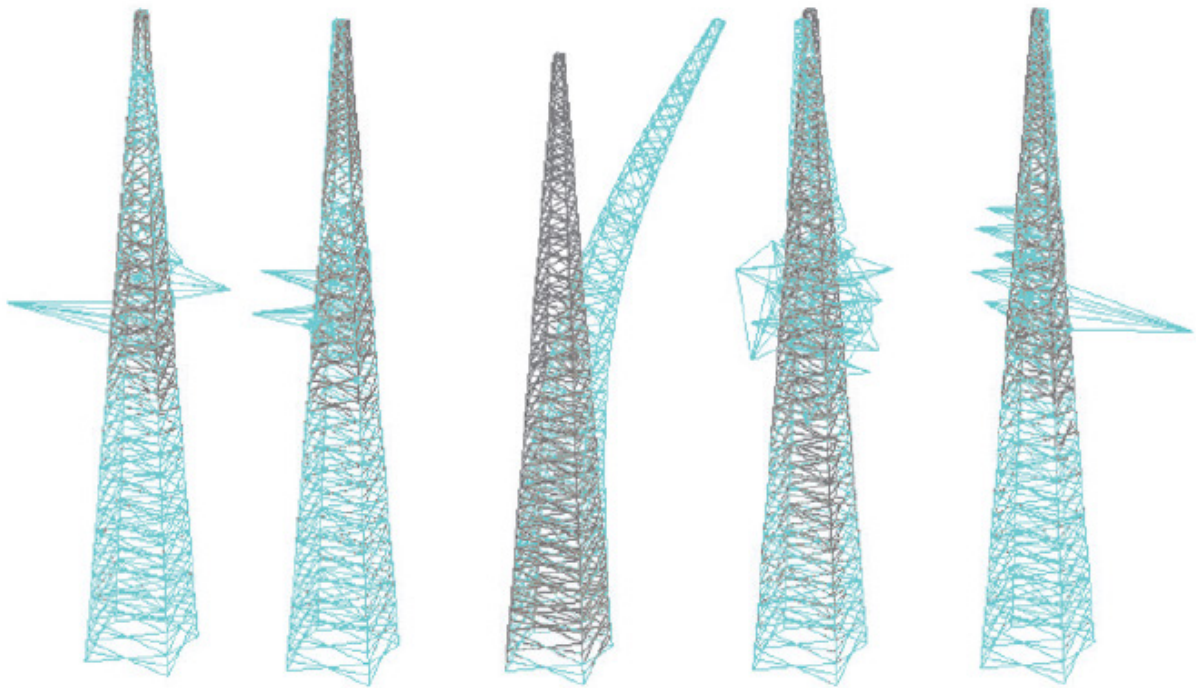


Рисунок 3 – Первые пять форм потери устойчивости [сноска 3]

Figure 3 – The first five forms of stability loss [footnote 3]

Радиобашню представляли в виде консольного стержня, потеря устойчивости сжатого пояса которого не может произойти, так как считалось, что этому препятствует решетка башни. Существовало мнение, что в вопросе об устойчивости радиобашен опыт их эксплуатации убедительнее теоретических исследований [3].

Требования к расчетным параметрам конструктивных элементов антенных сооружений с момента издания специального нормативного документа¹ для объектов связи как дополнение к главе СНиП «Стальные конструкции» практически не изменились, несмотря на значительный объем в основном теоретических исследований, выполненных, в том числе за последнее время. Расчетные длины элементов башни определялись и определяются в настоящее время как для плоских конструкций ферм.

Авторами работы [4] при расчете решетчатых башен традиционных форм и соотноше-

ний между жесткостями элементов допускается рассматривать в виде пространственной стержневой системы с шарнирными узлами соединений элементов.

Син Вань Сян решал задачу для определения упругих пространственных деформаций сжатых поясов решетчатых ферм как многопролетных в двух плоскостях систем с учетом начальных несовершенств [5]. Задача решается в несколько этапов. Сначала выполняется деформационный расчет пояса по неразрезной схеме и определяется наиболее загруженная панель, а затем осуществляется переход к эквивалентной однопролетной модели и проверка пространственной устойчивости пояса и отдельных панелей с общепринятыми условиями закрепления. Выявлены 15–30% резервов пространственной устойчивости отдельных панелей по сравнению с результатами расчета по нормам проектирования. Экспериментальная проверка результатов исследования не проводилась.

¹ Указания по проектированию металлических конструкций антенных сооружений объектов связи. СН 376-67. М.: Стройиздат, 1968. 26 с.

Подобное исследование применительно к башенным конструкциям выполнял А. А. Артёмов² [6]. При расчете по реализованной им расчетной методике получено увеличение несущей способности поясов антенных опор из одиночных уголков на 15–20%. По мнению автора, эффект достигнут за счет учета реальной жесткости узловых соединений элементов. Основанием этого являются результаты экспериментального исследования жесткости заделки концов стержня в зависимости от многочисленных факторов. Выявлено, что реальная жесткость далека от «шарнирной» и принимает средние значения по отношению к абсолютной заделке.

В монографии [7] описан метод расчета общей и местной устойчивости сжатых упруго-пластичных и хрупких стержневых элементов конструкций. Метод позволяет отказаться от понятия расчетной длины, благодаря чему, по мнению автора, расчет становится менее трудоемким и более точным.

В статье [8] приведены результаты анализа конструктивной формы антенных опор и разработан типовой ряд оптимальных решений.

Задача о потере устойчивости высотных сооружений часто сводится к задаче о поиске собственных частот или форм колебаний. В книге³ приведены результаты моделирования башни с целью оценки влияния различных отказов на общую устойчивость башенного сооружения (рисунок 3). Анализируя показатели запаса общей устойчивости, можно сделать вывод о незначительном влиянии на них отказов из-за потери местной устойчивости отдельных элементов.

Оценке влияния крутильной жесткости узлового соединения балка-стойка на несущую способность, устойчивость и долговечность конструкции из тонкостенных элементов посвящена статья [9]. Результаты, полученные в ходе натурных испытаний с упрощенным вариантом конструкции, сравнивались с данными компьютерного моделирования.

По результатам расчета мачт с дефектом в виде отклонения угла крепления оттяжек от

проектного положения отмечена возможность снижения несущей способности до 25% [10].

Диссертация А. Р. Олуромби посвящена изучению напряженно-деформированного состояния стальных труб⁴ [11]. Натурные испытания труб показали, что на несущую способность существенное влияние оказывают характер и величина начальных несовершенств стенок труб. Результаты испытаний отличаются от расчетных данных по нормам проектирования.

В работах [12, 13] для расчета НДС конструкций башенных сооружений сплошнотенчатых и решетчатых сечений и их узлов рекомендуются методы компьютерного моделирования, позволяющие получать достоверные сведения о прочности и устойчивости сооружений и принимать оптимальные их характеристики. В статье [14] приведены результаты сравнения расчета башни по ПБК SCAD Office и Лира-САПР.

Исследована устойчивость решетчатой колонны с учетом промежуточных упругих опор и переменного продольного усилия [15].

В [16, 17] выполнен анализ работы башен под нагрузкой с оценкой влияния различных типов решетки.

В статье [18] выполнен анализ влияния на устойчивость стержней из стальных труб случайных факторов: начальной кривизны (максимальной стрелки и формы погиби), расцентровки и остаточных напряжений, возникающих при изготовлении.

В монографии [19] приведено решение задачи по определению эффективной длины панели верхнего пояса фермы с постоянным поперечным сечением в зависимости от числа панелей n . Исходя из предположения распределения сжимающих усилий в поясе по параболе, получено выражение для коэффициента эффективной длины наиболее напряженной панели (при $n = 3 \dots 10$):

$$\mu = \sqrt{1 - 5/4n}. \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что при увеличении n коэффициент μ стремится к единице. Сде-

² Артёмов А. А. Устойчивость стержневых элементов, работающих в составе решетчатых конструкций / Автореферат кандидатской диссертации. М.: ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова», 2004. 25 с.

³ Проектирование металлических конструкций. Часть 2: «Металлические конструкции. Специальный курс»: учебник для вузов / А.Р. Туснин, В.А. Рыбаков, Т.В. Назмеева [и др.]; под общ. ред. А.Р. Туснина. М.: Издательство «Поро», 2020. 436 с.

⁴ Олуромби А. Р. Напряженно-деформированное состояние прямошовных и спиральношовных труб из сталей повышенной и высокой прочности при сжатии с изгибом / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2020. 162 с.

лан вывод, что сжатый пояс, элементы которого в пределах практических расчетов спроектированы одинаково безопасно, должен быть рассчитан так, как если бы они были шарнирно соединены в узлах.

В результате обзора исследований конструкций и методов расчета устойчивости антенных опор установлено:

- основной объем исследований посвящен совершенствованию конструктивных решений антенных опор на основе нормативных требований к металлическим конструкциям;
- теоретические исследования общей и местной устойчивости решетчатых опор связаны с разработкой новых методов расчета, позволяющих реализовать резервы несущей способности конструкций, выполненных с учетом норм проектирования, и получить экономический эффект;
- традиционные обследования технического состояния сооружений ограничиваются фиксацией дефектов и повреждений без расчетной оценки их влияния;
- экспериментальные исследования проводятся методом компьютерного моделирования; не обнаружено сведений по исследованию натуральных конструкций или их моделей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Условием потери устойчивости центрально сжатых элементов являются деформации изгиба вследствие повышенной гибкости и (или) влияния многочисленных случайных факторов [18]. Поэтому для анализа устойчивости применимы вероятностные методы [20]. Решается конкретная задача по вероятностной оценке свободной (расчетной) длины центрально сжатого элемента l_{ef} необходимого параметра критической силы N_{cr} .

Расчет по критерию устойчивости обычно сводится к проверке условия

$$N \leq N_{cr}. \quad (4)$$

Для анализа исходим из предпосылки критической силы по формуле Эйлера, положенной в основу методик расчета отечественных и европейских норм проектирования [21]:

$$N_{cr} = \pi^2 EI / (\mu l)^2. \quad (5)$$

Отметим, что формула (5) определяет значение N_{cr} как критическую силу двухшарнирного сжатого стержня длиной μl . По мнению Блейха, значение коэффициента μ должно быть больше единицы, так как значение $\mu =$

1 соответствует предельному значению, которое не может быть превышено [20].

В дальнейшем анализе исходим из представления μ как случайной величины $\tilde{\mu}$, вероятностные характеристики которой зависят от изменчивости прочности стали и внешних воздействий. В вероятностных расчетах характеристики изменчивости прочности стали (среднее значение $\bar{R}_y$ и коэффициент вариации v_R) можно оценить из совместного решения уравнений для нормативного и расчетного значений сопротивления стали

$$\begin{aligned} R_{yn} &= \bar{R}_y(1 - 1,64v_R) \\ \text{и } R_y &= \bar{R}_y(1 - 3v_R). \end{aligned} \quad (6)$$

Например, для стали С345 получено $\bar{R}_y = 385 \text{ Н/мм}^2$ и $v_R = 0,033$ (0,06). Основными вероятностными характеристиками коэффициента также являются среднее значение и коэффициент вариации. При условии нормального распределения случайной величины расчетное значение определяется по формуле

$$\mu = \bar{\mu}(1 + \beta v_\mu). \quad (7)$$

Знак (+) в формуле означает, что для обеспечения необходимой надежности, которая характеризуется коэффициентом β , расчетное значение μ по сравнению со средним значением $\bar{\mu}$ следует увеличивать.

Для расчета элементов антенных опор на устойчивость расчетное значение μ следует назначать с необходимой обеспеченностью.

Реальные сведения об изменчивости случайной величины $\tilde{\mu}$ можно получить из анализа возможных (допускаемых) и обнаруженных при обследовании дефектов и повреждений, характеризующих отклонения фактического состояния конструкции от предусмотренного проектом, стандартами и нормами.

По нормированной (расчетной) величине μ , заданным значениям β и v_μ , можно из (7) определить среднее $\bar{\mu}$. Например, если принять обеспеченность расчетного значения равным 0,99865, которому соответствует $\beta = 3$, то при $v_\mu = 0,1 \dots 0,3$ (значения, характерные для изменчивости ветровой нагрузки [22]) имеем $\bar{\mu} = 0,77 \dots 0,53$ (значительно меньше $\mu = 1$).

Оценить влияние изменчивости $\tilde{\mu}$ можно из соотношения расчетных значений для отдельных элементов длиной l и элементов, являющихся частью конструктивной системы. Для этого рассмотрим сжатый пояс башни или ствола мачты как систему последовательно соединенных элементов-панелей (рисунок 4).

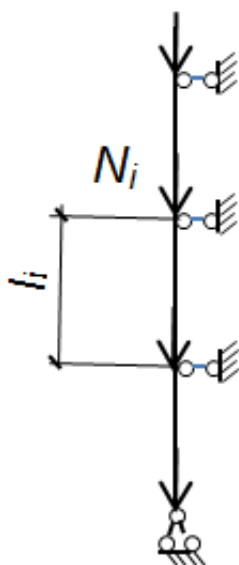


Рисунок 4 – Расчетная схема сжатого пояса
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Calculation scheme of the compressed belt
Source: complied by the author.

При последовательном соединении элементов разрушение происходит по наиболее слабому из них. Применительно к сжатым поясам отказ одного или даже нескольких панелей к разрушению не приводит, так как башня или ствол мачты являются статически неопределимыми системами, но нормальная эксплуатация сооружения будет нарушена. Поэтому рассматриваемое предельное состояние можно отнести ко 2-й группе предельных состояний с характеристиками безопасности системы $\beta = 1,64$, соответствующими вероятности неразрушения $P_s = 0,95$ при условии, что несущая способность подчиняется нормальному закону распределения. Надежность такой системы будет меньше надежности каждого элемента. Если все панели имеют одинаковые распределения несущей способности, то для системы из n элементов можно написать

$$P_s = (1 - P_f)^n, \quad (8)$$

где P_f – вероятность отказа одного элемента.

Например, если система состоит из 20 одинаковых элементов, то согласно (8) $P_f = 1 - \sqrt[20]{0,95} = 0,002561$. По таблицам интеграла вероятности получим характеристику безопасности элемента $\Phi(\beta) = 0,5 - 0,002561 = 0,4974$ и $\beta = 2,8$. По формуле (7) при $v_u = 0,1$ для системы имеем отношение $\mu/\bar{\mu} = 1,164$, для элемента $\mu/\bar{\mu} = 1,28$. Это означает, что расчетное значение коэффициента μ для от-

дельного элемента должно быть в $1,28/1,164 = 1,1$ раза больше, чем для системы в целом. Так, если для отдельного элемента (панели) для системы (пояса) $\mu = 1$, то для системы, рассмотренной в примере, $\mu = 1/1,1 = 0,9$.

Таким образом, из рассмотренного примера следует, что расчетные значения μ установлены нормами с запасом, обусловленным как минимум необходимостью обеспечения надежности конструктивных систем сжимаемых элементов.

В таблице 1 приведены возможные нормативные и расчетные значения коэффициента расчетной длины, обеспечивающие надежность расчета сжатых поясов антенных опор, принятой в действующих нормах проектирования.

Нормативное значение случайной величины коэффициента расчетной длины предлагается принять с обеспеченностью 0,95 как для прочностных характеристик материалов несущих конструкций из предположения распределения по нормальному закону.

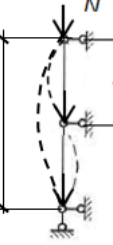
Для конструкций по схеме 1 таблицы 1 в качестве нормативного значения принята минимально допустимая величина, в некоторых расчетных ситуациях $\mu_n = 0,8$. Для оценки надежности при известном значении коэффициента вариации v_μ можно оценить среднее значение $\bar{\mu}$. Например, при $v_\mu = 0,1$ получаем $\bar{\mu} = 0,8/(1 + 1,64 \cdot 0,1) = 0,7$. Среднее значение $\bar{\mu} = 0,7$ соответствует усредненной величине, характеризующей форму потери устойчивости по идеализированным схемам (см. таблицу 1). Такое решение соответствует условию неразрезности пояса при свободном повороте относительно одной из опор.

Расчетная схема потери устойчивости принята традиционной для многопролетных систем и соответствует рекомендованной нормами проектирования. Значение $\mu = 1,0$ для этой формы потери устойчивости получается умножением нормативного значения на коэффициент надежности $\gamma_\mu = 1,25$, учитывающий не только вероятностную изменчивость случайной величины $\bar{\mu}$, но и изменчивость формы потери устойчивости.

На схемах 2 и 3 приведены данные для конструкций с разными длинами панелей в смежных плоскостях: в одной плоскости длина панели l , в смежной плоскости – $l_m \geq 2$. Формы потери устойчивости в отдельных плоскостях приняты одинаковыми. Значения параметров $\bar{\mu} = 1,0$ и $\mu_n = 1,164$ (при $v_\mu = 0,1$) для этих схем приняты одинаковыми с вероятностью 0,05 одновременной потери устойчивости пояса на длине l_m двух смежных панелей.

Таблица 1
Коэффициенты расчетной длины сжато-изогнутых стержней
Источник: составлено авторами.

Table 1
Coefficients of the estimated length for compressed-curved rods
Source: compiled by the author.

Элементы пояса	μ_n	μ
1. Трубы, спаренные уголки, одиночные уголки с совмещенными в смежных гранях узлами	 $\bar{\mu}(1 + 1,64\nu_{\mu})$	 $\gamma_{\mu}\mu_n; \gamma_{\mu} = 1,25$
2. Одиночные уголки с совмещенными в смежных гранях узлами	 $\bar{\mu}(1 + 1,64\nu_{\mu})$	 $\gamma_{\mu}\mu_n; \gamma_{\mu} = 1,25$
3. Одиночные уголки с не совмещенными в смежных гранях узлами (по рисунку 1,в)	 $\bar{\mu}(1 + 1,64\nu_{\mu})$	 $\gamma_{\mu}\mu_n; \gamma_{\mu} = 1,1$ или $\bar{\mu}(1 + 3\nu_{\mu})$

В схемах 2 и 3 отличаются коэффициенты γ_{μ} , значения которых приняты из условия равенства расчетного значения μ при $\nu_{\mu} = 0,1$ величине, установленной нормами. Так, для 2-й схемы получаем $\mu = 1,25 \cdot 1,164 = 1,46$ и расчетная длина панели $l_{ef} = 1,46l$ или, учитывая, что $l = l_m/2$, имеем $l_{ef} = 0,73l_m$ (это выражение соответствует потери устойчивости при отказе пояса на длине l_m) как установлено нормами. Для 3-й схемы получаем $\mu = 1,1 \cdot 1,164 = 1,28$ и расчетная длина панели $l_{ef} = 0,64l_m$ как и установлено нормами.

Предлагаемый подход к расчету на устойчивость позволяет управлять расчетными значениями путем контроля статистической изменчивости (коэффициента вариации), если

появится возможность измерения μ . Коэффициент вариации ν_{μ} реальной конструктивной системы можно получить также из анализа дефектов в каждом поясе, установленных в процессе обследования технического состояния. Основой методики такого обследования могут быть сведения о дефектах и повреждениях элементов, а также способах их получения, изложенные в справочнике⁵ и различных публикациях [11, 23].

Используя подобие форм устойчивости и собственных колебаний конструкций, можно производить непосредственные измерения частот колебаний в лабораторных условиях и на натурных конструкциях аппаратно-приборным диагностическим комплексом для экспе-

⁵ Металлические конструкции. В 3 т. Т. 3. Стальные сооружения, конструкции из алюминиевых сплавов. Реконструкция, обследование, усиление и испытание конструкций зданий и сооружений. (Справочник проектировщика) / Под общ. ред. В.В. Кузнецова) М.: Изд-во АСВ, 1999. 528 с.

риментального определения основных динамических характеристик «Стрела-П». Данный прибор используют, в частности, для оценки степени заделки элементов на опорах по формам собственных колебаний.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возрастающая потребность в антенных опорах заставляет искать эффективные конструктивные решения и методы расчета сооружений. В процессе поиска неизбежно возникает критическое отношение к нормам проектирования, общие положения которых иногда представляются недостаточно обоснованными, взятыми априорно. Подобная ситуация сложилась с установленными нормами расчетными длинами сжатых элементов для расчета на устойчивость элементов решетчатых конструкций.

Опыт проектирования и эксплуатации антенных опор, а также анализ исследований устойчивости свидетельствует о противоречивости принятых нормами расчетных схем для определения усилий, по которым проверяется прочность и устойчивость элементов неразрезных систем. Имеются данные о наличии серьезных запасов местной устойчивости, однако отсутствует методика реализации этих запасов, хотя бы для частных случаев. Представляется, что если расчетную длину сжатых элементов рассматривать как случайную величину, то управляя показателями изменчивости коэффициента расчетной длины можно регулировать не только надежностью, но и запасами несущей способности, предусмотренными нормами проектирования.

Предложенный в статье вариант нормируемых показателей случайной величины расчетной длины в виде системы коэффициентов следует рассматривать как пример, возможный для применения в частных случаях. Для разработки более общей методики необходимы детальные экспериментально-теоретические исследования показателей изменчивости коэффициента расчетной длины.

При наличии доступных способов измерения показателей описанный в статье подход к расчету сжатых элементов на устойчивость может быть эффективным средством совершенствования конструктивных решений, качества их исполнения и контроля сооружения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мельников Н. П. Антенные сооружения (Башни, мачты, радиотелескопы). М.: Знание, 1969. 48 с.
2. Краснощеков Ю. В. Эффективность антен-

ных опор, возводимых на ограниченной площади // Вестник СибАДИ. № 5 (27). 2012. С. 80–85.

3. Савицкий Г. А. Основы расчета радиомачт. М.: Гос. изд-во по вопросам связи и радио, 1953. 275 с.

4. Павловский В. Ф., Кондра М. П. Стальные башни (Проектирование и монтаж). Киев. Будівельник, 1979. 198 с.

5. Син Вань Сян. Исследование пространственной формы потери устойчивости верхнего пояса стальной фермы // Труды молодых ученых. Часть 1. СПб: 1998. С. 68–72.

6. Грудев И. Д., Артёмов А. А. Прямой метод расчета сжатых элементов стальных конструкций в составе сооружения // Промышленное и гражданское строительство. 2003. № 6. С. 34–35.

7. Грудев И. Д. Несущая способность сжатых элементов стержневых конструкций. М.: НИУ МГСУ. 2012. 387 с.

8. Горохов Е. В., Васылев В. Н., Алёхин А. М., Ягмур А. А. Анализ конструктивной формы антенных опор радиорелейной связи // Металлические конструкции. 2010. Том 16, № 1. С. 41–50.

9. Атавин И. В., Казакова Ю. Д., Мельников Б. Е. [и др.] Влияние жесткости узлового соединения на механические характеристики стеллажа // Строительство уникальных зданий и сооружений. 8 (71). 2018. С. 1–12.

10. Закурдаева О. Н., Голиков А. В. Повреждаемость антенно-мачтовых сооружений сотовой связи // Строительство уникальных зданий и сооружений. 4 (67). 2018. С. 1–12.

11. Ведяков И. И., Конин Д. В., Олуромбе А. Р. К вопросу об использовании прямошовных труб из сталей повышенной прочности в строительных металлических конструкциях // Вестник НИЦ «Строительство». 2018. № 3(18). С. 102–112.

12. Сабитов Л. С., Бадертдинов И. Р., Чепурненко А. С. Оптимизация формы поперечного сечения поясов трехгранных решетчатых опор // Строительство и архитектура. 2019. Т. 7, № 4. С. 5–8.

13. Зиганшин А. Д., Ахтямова Л. Ш., Сабитов Л. С. [и др.] Численное моделирование конструкций сооружений башенного типа в программных комплексах ANSYS и ЛИРА-САПР // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 2. С. 65–68.

14. Иоскевич А. В., Савченко А. В. Сравнение ПВК SCAD Office и Лира-САПР на примере расчета башни связи // Строительство уникальных зданий и сооружений. 10(25). 2014. С. 7–21.

15. Солодов Н. В., Пешкова Е. В. Исследование устойчивости стержней // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 4. С. 25–27.

16. Голиков А. В., Михальчонок Е. А. Определение рациональной конструктивной формы башен сотовой связи // Вестник Рос. ун-та дружбы народов. Сер.: Инженерные исследования. 2019. Т. 20, № 2. С. 163–173.

17. Голиков А. В., Михальчонок Е. А., Мельникова Ю. А. Анализ влияния типа решетки на распределение усилий в элементах башни // Инженерный вестник Дона. 2019. № 4 (55). 53 с.

18. Кользеев А. А. Сравнительная оценка коэффициентов продольного изгиба сжатых стальных

стержней из труб // Известия ВУЗ. Строительство. 2011. № 3. С. 105–110.

19. Блейх Ф. Устойчивость металлических конструкций / Пер. с англ. М.: Физматгиз, 1959. 544 с.

20. Райзер В. Д., Кириллов Б. Б. Метод статистических испытаний в расчете антенно-мачтовых сооружений на устойчивость // Стр. мех. и расчет сооружений. 1989. № 6. С. 32–35.

21. Галай В. С. Устойчивость стальных центрально сжатых стержней в методиках СП 16.13330.2011 и EN 1993-1-1 // Alfabuild. 2019. С. 82–91.

22. JCSS Probabilistic Model Code, Zurich: Joint Committee on Structural Safety, 2001. < www.jcss.byg.dtn.dk >.

23. Давыдов И. И., Чабан В. П. Проблемы диагностики и подходы к расчету стальных конструкций антенно-мачтовых сооружений для мобильной связи. Днепропетровск: ПДАБА. 2008. № 10. С. 28–34.

REFERENCES

1. Melnikov N.P. *Antennnye sooruzheniya (Bashni, machty, radioteleskopy)* [Antenna structures (Towers, masts, radio telescopes)]. Moscow. Isdatelstvo «Znanie», 1969. 48 p. (In Russ.)

2. Krasnoshchekov Yu. V. Effektivnost antennnykh opor, vosvodimyykh na ogranichennoy ploshchadi [Efficiency of antenna supports erected on a limited area]. *Vestnik Sibadi*. 2012; 1 (27):80-85. (In Russ.)

3. Savitskiy G. A. *Osnovy rascheta radiomacht* [Basics of calculating radio masts]. Moscow. Gos. Isd-vo po voprosam svyazi i radio [State Publishing House on Communications and Radio]. 1953. 275 p. (In Russ.)

4. Pavlovskiy V. F., Kondra M. P. *Stalnye bashni (Proektirovaniye i montazh)* [Steel towers (Design and installation)]. Kiev. Budivelnik, 1979. 198 p. (In Russ.)

5. Sin Van Syan. Issledovanie prostranstvennoy formy poteri Ustoychivosti verkhnego poyasa stalnoy fermy [Investigation of the spatial form of the loss of stability of the upper belt of the steel truss]. *Trudy molodykh uchyonnykh. Chast 1*. Sankt Petersburg. 1998:68-72. (In Russ.)

6. Grudev I. D., Artyomov A. A. Pryamoy metod rascheta szhatykh elementov stalnykh konstruktsey v sostave sooruzheniya [Direct method of calculation of compressed elements of steel structures in the structure]. Moscow. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2003; 6: 34-35. (In Russ.)

7. Grudev I. D. *Nesushchaya sposobnost szhatykh elementov sterzhnevnykh konstruktsey* [Bearing capacity of compressed elements of rod structures]. Moscow. NIU MGSU. 2012. 387 p. (In Russ.)

8. Gorokhov E. V., Vasylev V. N., Alyokhin A. M., Yagmur A. A. Analis konstruktivnoy formy antennnykh opor radioreleynoy svyazi [Analysis of the constructive form of radio relay antenna supports]. *Metallicheskie konstruktsey*. 2010; 1, volume 16: 41-50. (In Russ.)

9. Atavin I. V., Kazakova Yu. D., Melnikov B. E., etc. Vliyanie zhyostkosti uzlovogo soedineniya na mekhanicheskie kharakteristiki stellazha [The effect of the stiffness of the nodal joint on the mechanical characteristics of the rack]. *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy*. 2018; 8(71):1-12. (In Russ.)

10. Zakurdaeva O. N., Golikov A. V. Povrezhdamost antenno-machtovykh sooruzheniy sotovoy svyazi [Damage to antenna-mast structures of cellular communications]. *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy*. 2018; 4(67):1-12. (In Russ.)

11. Vedyakov I. I., Konin D. V., Olurombe A. R. K voprosu ob ispolzovanii pryamoshovnykh trub is staley povyshennoy prochnosti v stroitelnykh metallicheskiykh konstruktseyakh [On the issue of the use of straight-seam pipes made of high-strength steels in building metal structures]. *Vestnik NITS «Stroitelstvo»*. 2018; 3 (18):102-112. (In Russ.)

12. Sabitov L. S., Badertdinov I. R., Chepurnenko A. S. Optimizatsiya formy poperechnogo secheniya poyasov tryokhgrannykh reshetchatukh opor [Optimization of the cross-sectional shape of the belts of triangular lattice supports]. *Stroitelstvo i arkhitektura*. 2019; Vol. 7. No. 4: 5-8. (In Russ.)

13. Ziganshin A. D., Akhtyamova L. Sh., Sabitov L. S., etc. Chislennoe modelirovaniye konstruktsey sooruzheniy bashennogo tipa v programmnykh kompleksakh ANSYS i LIRA-SAPR [Numerical modeling of tower-type structures in ANSYS and LIRA-CAD software complexes]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzhya*. 2021; No. 2: 65-68. (In Russ.)

14. Ioskevich A. V., Savchenko A. V. Sravnenie PVK SCAD Oficce i lira-SAPR na primere rascheta bashni svyazi [Comparison of PVC SCAD Office and Lira-CAD on the example of calculating the communication tower]. *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy*. 2014; 10(25). 2014: 7-21. (In Russ.)

15. Solodov N. V., Peshkova E. V. Issledovanie ustoychivosti sterzhney [Investigation of the stability of rods]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2015; 4: 25-27. (In Russ.)

16. Golikov A. V., Mikhachonok E. A. Opredeleniye ratsionalnoy konstruktivnoy formy bashen sotovoy svyazi [Determination of the rational constructive form of cellular towers]. *Vestnik Ros, un-ta druzhby narodov. Ser.: Inzhenernye issledovaniya*. 2019; Vol. 20. No. 2: 163-173. (In Russ.)

17. Golikov A. V., Mikhachonok E. A., Melnikova Yu. A. Analis vliyaniya tipa reshetki na raspredeleniye usilyi v elementakh bashni [Analysis of the effect of the lattice type on the distribution of forces in the tower elements]. *Inzhener. vestn. Dona*. 2019; No. 4 (55): 53. (In Russ.)

18. Kolseev A. A. Sravnitel'naya otsenka koeffitsientov prodol'nogo isgiba szhatykh stalnykh sterzhney is trub [Comparative evaluation of longitudinal bending coefficients of compressed steel rods from pipes]. *Isvestiya VUS. Stroitelstvo*. 2011; 3: 105-110. (In Russ.)

19. Bleykh F. Ustoychivost metallicheskiykh konstruktsey [Stability of metal structures / Trans. from English]. Moscow. Fizmatgiz, 1959. 544 p. (In Russ.)

20. Rayser V.D., Kirillov B.B. Metod statisticheskikh ispytaniy v raschete antenno-machtovykh sooruzheniy na ustoychivost [Method of statistical tests in the calculation of antenna-mast structures for stability]. *Str. mekh. i raschet sooruzheniy*. 1989; 6: 32-35. (In Russ.)

21. Galay V. S. Ustoychivost stalnykh tsentralno szhatykh sterzhney v metodikakh SP 16.13330.2011

I EN 1993-1-1 [Stability of steel centrally compressed rods in the methods of SP 16.13330.2011 and EN 1993-1-1]. *Alfabuild*. 2019: 82-91. (In Russ.)

22. JCSS Probabilistic Model Code, Zurich: Joint Committee on Structural Safety, 2001. < www.jcss.bygdtn.dk>.

23. Davydov I. I., Chaban V. P. *Problemy diagnostiki i podkhody k raschetu stalnykh konstruksiy any-enno-machtobykh sooruzheniy dlya mobilnoy svyazi* [Diagnostic problems and approaches to the calculation of steel structures of antenna-mast structures for mobile communications]. Dnepropetrovsk. PDABA. 2008; 10: 28-34. (In Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Краснощечков Ю. В. Общая идея работы, разработка расчетной модели, написание статьи.

Заполева М. Ю. Постановка задачи, сбор и анализ материалов, выполнение расчетов.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Yuriy V. Krasnoshchekov. *The general idea of the work, development of a computational model, writing the article.*

Mariya Y. Zapolova. *Tasks statement, collecting and analyzing the material, performing calculations.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Краснощечков Юрий Васильевич – д-р. техн. наук, проф. кафедры «Строительные конструкции».

Заполева Мария Юрьевна – гл. инженер проекта.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuriy V. Krasnoshchekov – Dr. of Sci, Professor of the Building Structures Department.

Maria Y. Zapolova – Chief Engineer of the project.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются рукописи по направлениям: Транспорт. Транспортные и технологические машины; Строительство. Строительные материалы и изделия; Редакция принимает к рассмотрению **оригинальные научные статьи** объемом 8–10 стр. машинописного текста через 1 интервал, 5–8 рисунков и (или) таблиц, 20–40 ссылок; **обзорные статьи** – (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – от 10 и более страниц, от 5 и более рисунков, до 80 ссылок.

Статья должна быть неопубликованной ранее в других изданиях, написана в контексте современной литературы, обладать новизной и соответствовать профилю журнала. Автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирования и ссылок на официальные документы и другие источники. Редакция принимает на себя обязательство ограничить круг лиц, имеющих доступ к присланной в редакцию рукописи, сотрудниками редакции, членами редколлегии, а также рецензентами данной работы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий статья будет **ретрагирована** (отозвана из печати).

Следует уделить особенное внимание качеству перевода. Недопустимо при переводе пользоваться машинами-переводчиками. Перевод должен быть выполнен профессиональными переводчиками, а лучше – носителем английского языка. Необходимо учесть, что законодательство охраняет права переводчиков авторским правом наравне с правами авторов оригинальных произведений. Перевод текста – творческий процесс, производный объект авторского права, т.е. переводчик – соавтор нового произведения.

1 УДК. На первой странице, слева в верхнем углу без отступа, указываются индекс по универсальной десятичной классификации (УДК) (размер шрифта 10 пт).

2. Заглавие статьи. Заголовок (максимально 10-12 слов) должен быть информативным, лаконичным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы. Приводится на русском и английском языках, по центру полужирным шрифтом размером 12 пт. прописными буквами.

3. Фамилии авторов. Количество авторов не должно превышать четырех. Для англоязычных метаданных важно соблюдать вариант написания сведений об авторе в последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия (Anna V. Ivanova). При латинизации фамилии можно воспользоваться системой 1 BSI – Британский Институт Стандартов (British Standards Institution) транслитерации на сайте <http://translit.ru>, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи обычным шрифтом (размер шрифта 12 пт.).

4. Аннотация. Аннотация включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе научная статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению, объем от 200 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Приводится на русском и английском языках. Начинается словом «Аннотация» с прописной буквы (шрифт полужирный, курсив, 10 пт); точка; затем с прописной буквы текст (курсив, 10 пт).

5. Ключевые слова служат ориентиром для читателя и используются для поиска статей в электронных базах, поэтому должны отражать дисциплину (область науки, в рамках которой написана статья), тему, цель и объект исследования.

Рекомендуемое количество ключевых слов – 10–12, количество слов внутри ключевой фразы – не более трех.

Размещаются после аннотации, на русском и английском языках.

6. Благодарности. Раздел включен в требования всеми крупными издательствами. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

7. Основные положения. Отражают ключевые результаты исследования, основное содержание статьи, изложенные тезисно и оформленные в виде 3–5 пунктов маркированного списка.

8. Основной текст статьи излагается на русском или английском языках, в электронном и бумажном виде (шрифт «Arial» (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный), в следующей последовательности:

Введение (1–4 стр.) В этом разделе описываются общая тема исследования, цели и задачи планируемой работы, теоретическая и практическая значимость, приводятся наиболее известные и авторитетные публикации по изучаемой теме, обозначаются нерешенные проблемы. Данный раздел должен содержать обоснование необходимости и актуальности исследования. Информация во Введении должна быть организована по принципу «от общего к частному».

Подразделы введения представлены на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Методы и материалы (от 2 стр. и более) В этом разделе в деталях описываются методы, которые использовались для получения результатов. Обычно сначала дается общая схема экспериментов/исследования, затем они представляются настолько подробно и с таким количеством деталей, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, организационных или структурных диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. Если было получено много похожих зависимостей, представляемых в виде графиков, то приведите только один типичный график, а данные об имеющихся количественных отличиях между ними, представьте в таблице.

Способы представления результатов представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Обсуждение и заключение. Раздел содержит интерпретацию полученных результатов исследования, предположения о полученных фактах, сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

9. Список источников (References)

В список источников включаются только те источники, которые автор использовал при подготовке статьи. Оформление библиографического списка регламентируется ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 20–40 источников, но не более 50. Из них за последние 3 года – рекомендуется указать не менее 20, иностранных – не менее 15. Важно правильно оформить ссылку на источник.

Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет.

Источники указываются в конце статьи в алфавитном порядке либо в порядке упоминания в тексте статьи.

Приводится на русском языке и в латинице по образцу, представленному на сайте журнала.

Аффилиация. Фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, ORCID i, Scopus Author ID, ResearcherID, далее указать все места работы, должность, название организации, служебный адрес, электронная почта, телефон, e-mail.

Приводится на русском и английском языках.

Технические требования к оформлению.

Формат A4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом употреблении должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной 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 – 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.