

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



научный рецензируемый журнал

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

“Vestnik SibADI”

Том 19, № 4. 2022
Vol.19, No. 4. 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, № 4. 2022

VOL. 19, No. 4. 2022

Сквозной номер выпуска – 86

Continuous issue – 86

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 серьезно занимаются научными исследованиями по тематике журнала.

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

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

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

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).

Журнал является членом:

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), CrossRef

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Подписано в печать 27.08.2022. Дата выхода в свет 31.08.2022. 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)

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 27.08.2022. Publication date is 31.08.2022. 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** 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. Разакова, г. Бишкек, Киргизская Республика
Researcher ID P-2811-2017, **ORCID ID** 0000-0001-5393-7700

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

М. С. Корытов, А. Е. Безродина

СТЕЛЛАЖНЫЙ КРАН-ШТАБЕЛЕР С ПОВОРОТНОЙ СТРЕЛОЙ 474

В. А. Николаев

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ, НЕОБХОДИМОЙ
ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТИ НОЖА И НИЖНЕЙ ЧАСТИ
ОТВАЛА БУЛЬДОЗЕРА НА ГРУНТ В НАЧАЛЕ ПРОХОДА 484**

Н. Т. Сурашов, Р. Б. Асматулаев, Д. Н. Толымбек

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ОТВАЛА БУЛЬДОЗЕРА 500**

И. П. Трояновская, А. О. Жаков

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕУПРАВЛЯЕМОГО
СДВИГА БУЛЬДОЗЕРА 514**

Р. Ю. Сухарев

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА «ЧИСТОЕ ПРЕСЛЕДОВАНИЕ» (PURE PURSUIT)
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ АВТОГРЕЙДЕРОМ..... 522**

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

Н. А. Амосов, Е. Ю. Кузнецова

**«ВЫТЯГИВАЮЩАЯ» МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УЧАСТНИКОВ
КОНТРАКТА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ..... 524**

Ли Бинчжан

**СХЕМА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН
В ЦЕПОЧКАХ ПОСТАВОК В ТРАНСПОРТНЫХ УЗЛАХ 536**

А. Н. Котомчин

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
НА ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ С ПОДЛОЖКОЙ
ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАНСПОРТА,
РАБОТАЮЩИХ ПРИ ГИДРОАБРАЗИВНОМ ИЗНАШИВАНИИ 546**

Е. В. Феклин

**ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ ТЕХНИЧЕСКОГО
ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА АВТОБУСНОГО ПАРКА 560**

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Ю. В. Буртыль, Д. В. Капский

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ РОВНОСТИ
И ПРОЧНОСТИ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД НА ОСНОВАНИИ
ТЕОРЕТИЧЕСКО-ПРАКТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ 570**

Д. С. Махортов, Л. Х. Загороднюк, Н. А. Шаповалов, Д. А. Сумской

**ВЯЖУЩИЕ КОМПОЗИЦИИ ИЗ ЦЕМЕНТА
И КЕРАМЗИТОВОЙ ПЫЛИ..... 584**

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Mikhail S. Korytov, Angela E. Bezrodina

SWING JIB RACK STACKER CRANE 475

Vladimir A. Nikolayev

**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..... 485**

Nurgali T. Surashov, Ruslan B. Asmatulaev, Damir N. Tolymbek

BLADE OPTIMAL DESIGN PARAMETERS DETERMINATION 501

Irina P. Troyanovskaya, Andrey O. Zhakov

**EXPERIMENTAL STUDIES OF THE UNCONTROLLED SHIFT
OF THE BULLDOZER 515**

Roman Yu. Sukharev

**PURE PURSUIT METHOD USE TO CONTROL UNMANNED
MOTOR GRADER 522**

PART II. TRANSPORT

Nikita A. Amosov, Elena Yu. Kuznetsova

**"PULL" MODEL OF INTERACTION OF PARTICIPANTS
OF A LIFE CYCLE CONTRACT OF VEHICLES 525**

Li Binzhang

**BLOCKCHAIN TECHNOLOGY USE CASE IN SUPPLY CHAINS
IN TRANSPORT HUBS 537**

Aleksei N. Kotomchin

**EFFECT OF ELECTROCHEMICAL TREATMENT ON SUBSTRATE ADHESION
STRENGTH IN THE RESTORATION OF MOTOR VEHICLE PARTS
OPERATING UNDER HYDROABRASIVE WEAR 547**

Evgeny V. Feklin

**OPERATIONAL MANAGEMENT OF THE BUS FLEET MAINTENANCE
AND REPAIR SYSTEM..... 561**

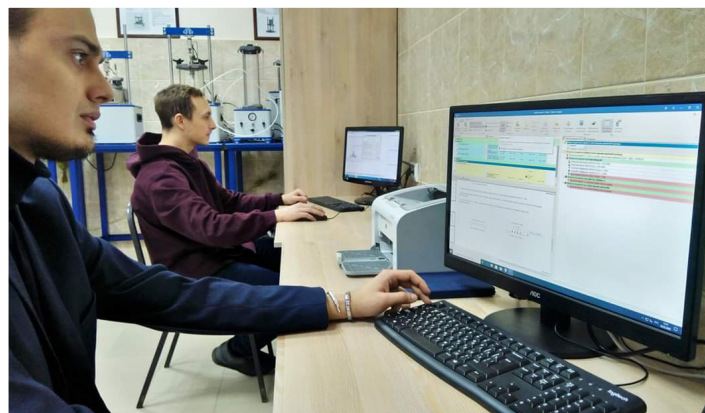
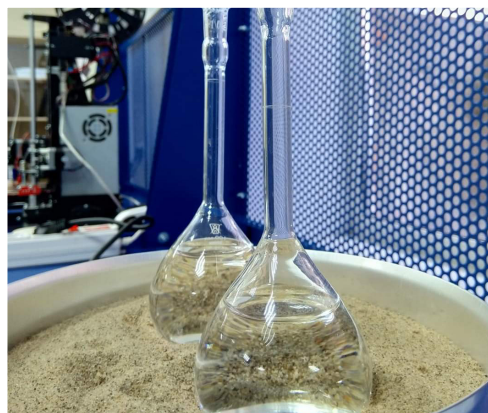
PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Yury V. Burtyl, Denis V. Kapski

**MODELLING THE RELATIONSHIP OF SMOOTHNESS
AND RESISTIBILITY IN NON-RIGID PAVEMENTS BASED
ON THEORETICAL AND PRACTICAL STUDIES..... 571**

Denis S. Makhortov, Liliya Kh. Zagorodnyuk, Nikolay A. Shapovalov, Dmitry A. Sumskoy

CEMENT AND CLAYDITE DUST BINDING COMPOSITIONS 585



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



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

УДК 62-752.2
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-474-483>
EDN: GYYWCD
Научная статья



СТЕЛЛАЖНЫЙ КРАН-ШТАБЕЛЕР С ПОВОРОТНОЙ СТРЕЛОЙ

М. С. Корытов*, А. Е. Безродина

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

kms142@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5104-7568>

likasedova@list.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6362-8557>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Стеллажные краны-штабелеры являются основной подъемно-транспортной машиной для обслуживания многоуровневых стеллажных складов. От их эффективности зависит продуктивность и экономичность работы склада. Традиционная конструкция крана-штабелера включает ходовую тележку, которая движется по рельсам на полу склада, установленную вертикально на тележке колонну, по которой поднимается каретка с грузозахватным устройством и грузом. Недостатками традиционной конструкции крана являются сравнительно большая масса тележки, необходимость ее перемещения вместе с колонной в горизонтальном направлении при перемещении по складу, сравнительно большой расход энергии, необходимость усиления пола склада. Крановые рельсовые пути на полу склада необходимо очищать от падающих сверху предметов, что сопряжено с остановкой работы крана и снижает производительность.

Материалы и методы. Конструкция крана-штабелера связана с формой его рабочего пространства. В целях совершенствования крана-штабелера была разработана его конструкция на основе поворотной стрелы с противовесом, при работе которой не требуются рельсовые крановые пути. Кран предложенной конструкции способен обслуживать склады в ангарах полукруглой формы. Для двух складов: традиционной прямоугольной и полукруглой форм был выполнен сравнительный анализ сумм геометрических расстояний при перемещениях грузозахватного устройства из точки загрузки в выбранные случайным образом целевые ячейки. В качестве критерия сравнения использовалась сумма декартовых расстояний перемещений грузозахватного устройства между точкой загрузки склада и целевыми точками, выбираемыми случайным образом по закону равномерного распределения. Исследовались три вида циклов работы кранов – простой одиночный, двойной и смешанный.

Результаты. Приведены сравнительные диаграммы значений критерия. Установлено, что при всех видах исследованных циклов, в наибольшей степени при работе по одиночному циклу, применение крана предложенной конструкции при одинаковой вместимости склада существенно уменьшает суммарное геометрическое расстояние, которое необходимо пройти грузозахватному приспособлению.

Обсуждение и заключение. Уменьшение суммы геометрических расстояний перемещения грузозахватного устройства нового крана позволяет сделать заключение, что затраты времени на перемещения, определяющие производительность выполняемых краном работ, а также сопряженные с ними затраты энергии, могут быть существенно снижены. Снижение энергетических затрат возможно за счет замены поступательного перемещения массивной ходовой тележки на вращательное движение уравновешенной стрелы сравнительно небольшой массы у крана предложенной конструкции. Не тратится время на регулярную очистку крановых путей, сопряженную с остановкой крана. Количество пар трения в предложенной конструкции крана уменьшено по сравнению с традиционной.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кран-штабелер, стеллажный, стрела, противовес, полукруглый ангар.

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

Статья поступила в редакцию 28.02.2022; одобрена после рецензирования 18.03.2022; принята к публикации 27.07.2022.

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: Корытов М. С., Безродина А. Е. Стеллажный кран-штабелер с поворотной стрелой // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 4 (86). С. 474-483. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-474-483>

© Корытов М. С., Безродина А. Е., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-474-483>
EDN: GYYWCD

SWING JIB RACK STACKER CRANE

Mikhail S. Korytov*, Angela E. Bezrodina

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

kms142@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5104-7568>

likasedova@list.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6362-8557>

**corresponding author*

ABSTRACT

Introduction. Rack stacker cranes are the main hoisting and transport machine for maintenance of multi-level rack warehouses. The efficiency and profitability of the warehouse depends on their efficiency. The traditional design of a rack stacker crane includes a trolley that moves along the rails on the floor of a warehouse, a column mounted vertically on the trolley, along which a carriage with a load gripping device and a load rises. The disadvantages of the traditional crane design are the relatively large mass of the trolley, the need to move it along with the column in a horizontal direction when moving around the warehouse, the relatively high energy consumption and the need to strengthen the floor of the warehouse. The crane rail tracks on the floor of the warehouse must be cleared of objects falling from above, which is associated with stopping the operation of the crane and reducing productivity.

Materials and Methods. The design of a stacker crane is related to the shape of its working space. In order to improve the stacker crane, its design was developed on the basis of a jib with a counterweight, which does not require rail crane tracks. The crane of the proposed design is capable of storage in the hangars of a semicircular shape. For two warehouses: traditional rectangular and semicircular shapes, a comparative analysis of the sums of geometric distances was performed when the load gripping device moved from the loading point to randomly selected target cells. As a comparison criterion, the sum of the Cartesian distances of the load gripping device movements between the warehouse loading point and the target points, randomly selected according to the law of uniform distribution, was used. Three types of crane operation cycles were studied – simple single, double and mixed.

Results. Comparative diagrams of criterion values are given. It has been established that for all types of cycles studied, to the greatest extent when working on a single cycle, the use of a crane of the proposed design with the same storage capacity significantly reduces the total geometric distance that the load gripping device must pass.

Discussion and conclusions. Reducing the sum of the geometric distances of movement of the load handling device of the new crane allows to conclude that the time spent on the movements that determine the productivity of the work performed by the crane, as well as the energy costs associated with them, can be significantly reduced. Reducing energy costs is possible by replacing the translational movement of a massive undercarriage with the rotational movement of a balanced jib of a relatively small mass at the crane of the proposed design. Time is not wasted on regular cleaning of the crane tracks, associated with stopping the crane. The number of friction pairs in the proposed design of the crane is reduced compared with the traditional one.

KEYWORDS: stacker crane, rack, jib, counterweight, semicircular hangar.

ACKNOWLEDGMENTS: The authors of the article express their gratitude for the reviewer's hard work and expert opinion.

The article was submitted 28.02.2022; approved after reviewing 18.03.2022; accepted for publication 27.07. 2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Korytov M.S., Bezrodina A.E. Swing jip rack stacker crane. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2022; 19 (4): 474-483. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-474-483>

© Korytov M. S., Bezrodina A. E., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

Важной и неотъемлемой частью логистической системы поставок материалов и заготовок в машиностроительном производстве, товаров народного потребления и продуктов питания во всем мире являются стеллажные многоярусные склады [1]. В подобных многоярусных складах и логистических центрах используют стальные либо бетонные полы, армированные стальной сеткой [2], поскольку в дополнение к статическим нагрузкам полы таких складских помещений подвергаются значительным динамическим нагрузкам, возникающим от перемещения по ним кранов-штабелеров. Металлические плиты или железобетон, армированный стальной сеткой, применяемые для таких строительных проектов, имеют относительно высокую себестоимость изготовления [3].

Краны-штабелеры, используемые для обслуживания стеллажных многоярусных складах традиционной конструкции, представляют собой подъемно-транспортные машины,

основным ходовым элементом которых выступает тележка, перемещающаяся по напольному рельсовому крановому пути, расположенному между двумя вертикальными рядами стеллажей [4]. На тележке вертикально располагается колонна, по которой перемещается каретка грузоподъемного механизма, перемещающаяся по колонне в вертикальном направлении (рисунок 1). На каретке расположено грузозахватное устройство с перемещаемым грузом [5]. Грузозахватное приспособление может иметь различную конструкцию для захвата разных видов грузов.

Наличие на колонне верхней направляющей с роликами и, соответственно, верхнего рельса, не является обязательным во всех конструкциях кранов-штабелеров, однако их отсутствие при значительной высоте колонны может приводить к деформациям и вибрациям колонны и расположенных на ней других узлов крана-штабелера [6]. Вес колонны целесообразно минимизировать по экономическим соображениям для уменьшения затрат энергии при перемещении краном грузов [7].

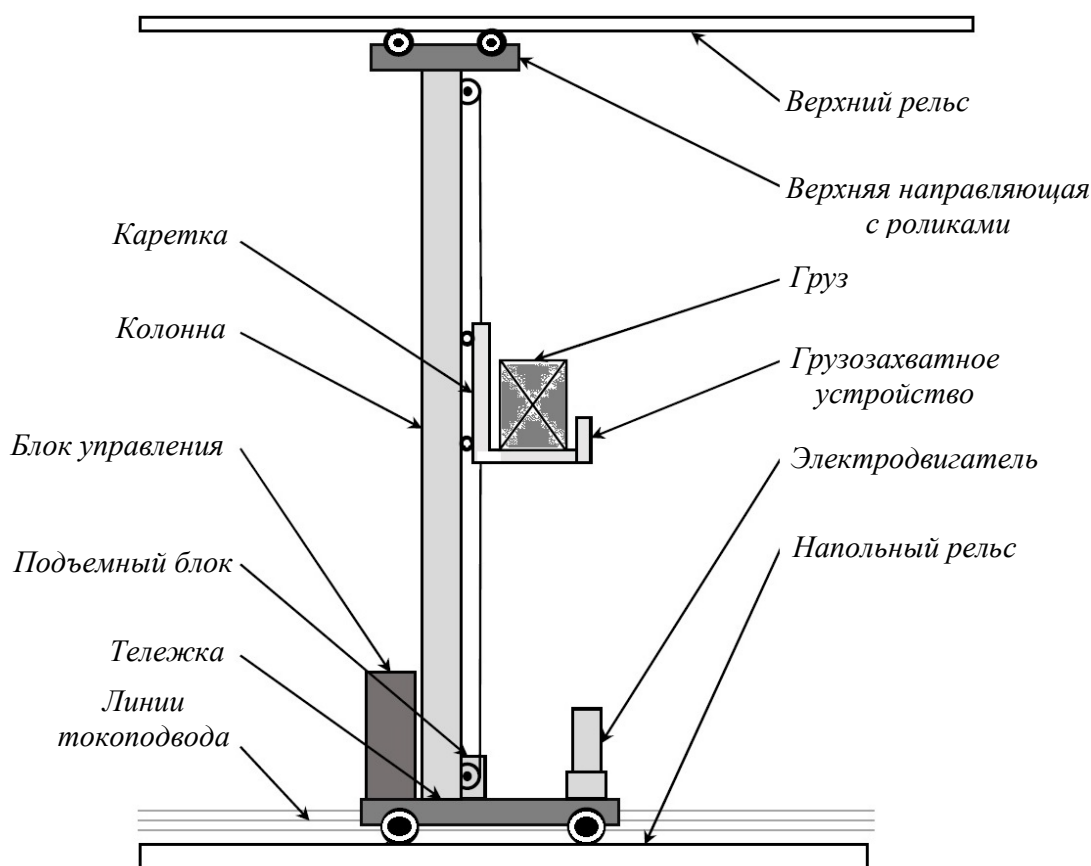


Рисунок 1 – Стеллажный кран-штабелер традиционной конструкции [9]

Figure 1 – Traditional design of a rack stacker crane [9]

Применение кранов-штабелеров предполагает полную или частичную автоматизацию работы склада [8]. Автоматизированный склад для хранения паллетированных грузов представляет собой стеллажи с ячейками хранения, расположенными в несколько ярусов или уровней (рисунок 2). Такие подъемно-транспортные средства, как стеллажные краны-штабелеры, наиболее широко используются в автоматизированных многоуровневых складских системах для погрузочно-разгрузочных работ: транспортировки в вертикальном и горизонтальном направлениях, закладки на хранение и извлечения грузов. Необходимо отметить, что современный стеллажный кран-штабелер обслуживает как минимум два стеллажа (см. рисунок 2), для чего грузозахватное устройство имеет возможность выдвижения в обе

стороны относительно плоскости движения тележки. Ширина ходовой тележки не превышает ширину прохода между стеллажами. Ходовая тележка имеет как минимум два колеса, которые катятся по рельсу, расположенному на полу склада (велосипедный кран).

Направлениями совершенствования кранов-штабелеров в настоящее время являются: повышение экономичности, неразрывно связанное с повышением производительности кранов, снижение энергоемкости перемещений грузов, а также повышение точности позиционирования грузов. С этой целью стеллажные краны-штабелеры обычно представляют собой легкие конструкции, включающие в себя гибкие колонны мачтового типа [9]. Имеется тенденция к постоянному увеличению высоты кранов-штабелеров [10].



Рисунок 2 – Рабочее пространство крана-штабелера традиционной конструкции, склад для хранения паллетированных грузов

Источник: Режим доступа: <https://www.mm-logistik.vogel.de/ssi-schaefer-fritz-schaefer-gmbh-c-163709/> (дата обращения: 20.02.2022)

Figure 2 – Working space of the traditional stacker crane, palletized cargo storage
Source: Available at: <https://www.mm-logistik.vogel.de/ssi-schaefer-fritz-schaefer-gmbh-c-163709/> (assessed: 20.02.2022)

Для снижения затрат энергии при работе стеллажных кранов-штабелеров, особенно работающих на многоярусных складах большой высоты, предлагаются различные подходы, в том числе предлагается энергосбережение за счет использования регенерации потенциальной энергии при опускании складываемых грузов [11]. Оценка производительности, надежности, точности, затрат времени и энергии автоматизированных систем погрузочно-разгрузочных работ, главным звеном которых выступают стеллажные краны-штабелеры, является актуальной темой при проведении сравнительных исследований различных систем и конструкций данных видов кранов¹ [12].

В англоязычных статьях применительно к стеллажным кранам-штабелерам была сформулирована научная проблема, которая получила название проблемы крана-штабелера (stacker crane problem). Она заключается в оптимальной маршрутизации работы крана-штабелера, т. е. построении маршрута, в том числе составного, с минимальными затратами времени и/или энергии [13]. Проблема маршрутизации усложняется, если рассматриваются сложные, составные циклы крана-штабелера, неполная загрузка склада, грузы различной массы и т. п. Частным случаем данной задачи выступает задача о кране-штабелере, работающем в складе, ячейки которого расположены на регулярной сетке и имеют одинаковое прямоугольное сечение.

Снижение энергопотребления работающего крана-штабелера зачастую имеет решающее значение для повышения как экономической, так и экологической устойчивости автоматизированных многоуровневых складских систем [14].

В работах [15, 16] предлагаются модели на основе генетического алгоритма для совместного планирования и оптимизации работы как отдельных кранов-штабелеров, так и прочих автоматически управляемых транспортных средств и рабочих станций комплектования в гибридном производственном цехе, который включает в себя автоматизированный стеллажный склад.

Часть работ по стеллажным кранам-штабелерам посвящена оптимизации управления их приводами в плане повышения устойчивости и точности позиционирования с учетом колебаний и вибраций колонны вследствие уменьшения ее массы и жесткости [9, 17].

Некоторые работы посвящены оптимизации конструкции колонны крана-штабелера, чтобы при минимальной массе обеспечить достаточную жесткость конструкции и снизить таким образом амплитуду неуправляемых колебаний и вибраций колонны [5, 18].

Для автоматизированных складов, которые обслуживают одновременно два или более стеллажных крана-штабелера, имеющих совместную рабочую область, актуальной является проблема предотвращения столкновений [19].

В работе [20] предложено оптимизировать рабочее пространство хранения товаров, т. е. форму склада. Результаты данного исследования показали, что оптимизация рабочего пространства и оптимизация маршрута работы крана-штабелера могут повысить общую эффективность работы. Эти результаты подтверждают гипотезу о том, что повысить эффективность работы стеллажного крана-штабелера можно, используя комплексный подход, который заключается в изменении и совершенствовании как конструкции самого крана-штабелера, так и формы рабочего пространства, которое данный кран обслуживает.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поскольку форма рабочего пространства, которое обслуживает стеллажный кран-штабелер, неразрывно связана с его конструкцией, для повышения эффективности работы кранов-штабелеров на складах средней и малой вместимости в СибАДИ была предложена и разработана новая конструкция стеллажного крана-штабелера с поворотной стрелой и противовесом (рисунок 3)².

¹ Безродина А.Е. Краны-штабелеры: классификация, назначение, тенденции развития / А.Е. Безродина, М.С. Корытов // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: сборник материалов IV Национальной научно-практической конференции. Омск: СибАДИ, 2021. С. 78–82. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_46355521_89395120.pdf (дата обращения: 20.02.2022).

² Пат. 209045 Российская Федерация, МПК B66C 23/00, B65G 1/04. Стреловой стеллажный кран-штабелер / Корытов М. С., Безродина А. Е.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» (RU); № 2021110085; заявл. 13.04.21; опубл. 31.01.22. Бюл. № 4. 8 с.

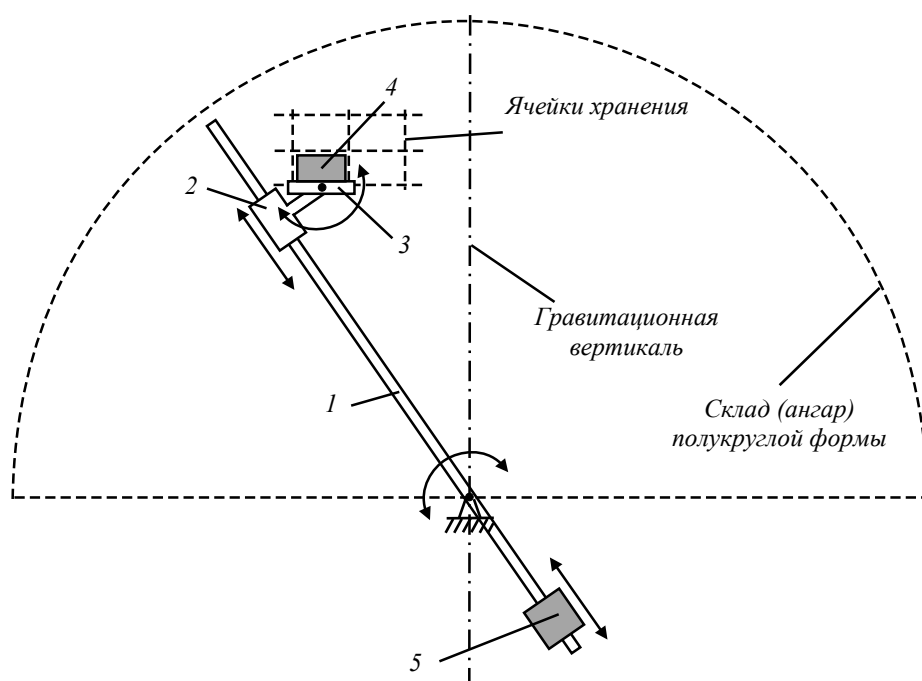


Рисунок 3 – Предложенная конструкция крана-штабелера с поворотной стрелой и противовесом
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Proposed swing jib stacker crane design and counterweight
Source: compiled by the authors.

Традиционная конструкция стеллажного крана-штабелера имеет целый ряд недостатков, среди которых невозможность применения внутри складских сооружений, имеющих полукруглую форму свода, арочные ангары, в которых стеллажи расположены под сводом. Неповоротная колонна крана-штабелера традиционной конструкции имеет постоянную высоту и всегда ориентирована вертикально. Энергозатраты крана-штабелера традиционной конструкции повышены, поскольку для горизонтального перемещения вдоль стеллажей ему необходимо каждый раз перемещать ходовую тележку, обладающую сравнительно большой массой.

Кран-штабелер с поворотной стрелой (см. рисунок 3) в отличие от традиционной конструкции, не содержит ходовой тележки. Он включает в себя стрелу 1, совершающую повороты вокруг горизонтальной оси, которая находится в центре окружности свода полукруглого ангара. Стрела 1 является в данной конструкции аналогом колонны в традиционной конструкции. По направляющим стрелы 1 перемещается в радиальном направлении подвижная грузовая каретка 2. На грузовой каретке 2 закреплено грузозахватное приспособление 3,

на котором размещается транспортируемый груз 4 (в случае перемещения с грузом). По направляющим стрелы 1, с противоположной от оси вращения стороны, также в радиальном направлении перемещается противовес 5.

Вертикальная плоскость возможных положений стрелы расположена между вертикальными плоскостями торцов двух стеллажей, обслуживаемых краном. Точка загрузки склада (точка ввода-вывода грузов) для предложенной конструкции крана должна располагаться максимально близко к оси вращения стрелы. Отметим, что в стеллажном складе для крана-штабелера традиционной конструкции, имеющем прямоугольную форму, точка загрузки обычно располагается в первом вертикальном ряду стеллажей, также на самом нижнем уровне (рисунок 4).

Для двух складов традиционной прямоугольной и полукруглой форм был выполнен сравнительный анализ сумм геометрических расстояний при перемещениях грузозахватного устройства из точки загрузки в выбранные случайным образом целевые ячейки складов. Приведенные в качестве примеров на рисунке 4 два склада имели размеры ячеек: ширина 1 м, высота 1,02 м (без учета уменьшения

свободного пространства в ячейках за счет толщины перекрытий и боковых стенок). Количество ячеек при данных размерах было одинаковым: 324.

При указанном одинаковом количестве ячеек радиус полукруглого склада для крана предлагаемой конструкции составил 15 м. Склад прямоугольной формы имел размеры: в единицах 18×18 ячеек, или $18 \times 18,36$ м (ширина $\times$ высота).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнение результатов работы двух конструкций кранов проводилось по критерию суммы декартовых расстояний S для циклов из 10^7 случайных перемещений грузозахватного устройства. Номер целевой ячейки (двух целевых ячеек в двойном цикле) выбирался из общего количества ячеек склада как случайное целое число от 1 до 324 с равномерным законом распределения.

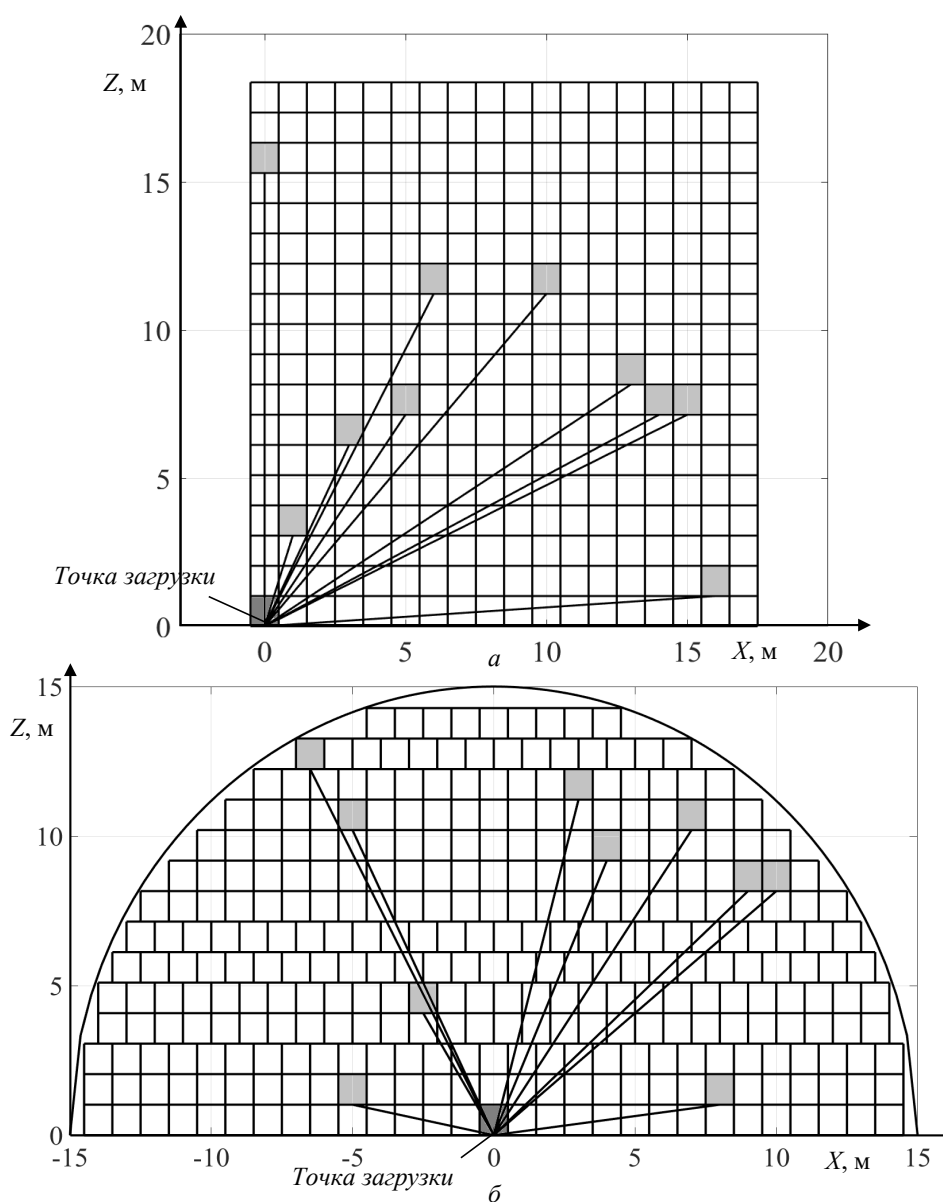


Рисунок 4 – Примеры складов различной формы и одинаковой вместимости для кранов-штабелеров: а – традиционной конструкции; б – предложенной конструкции
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Examples of warehouses of different shapes and the same capacity for stacker cranes of traditional (a) and proposed (b) structures
Source: compiled by the authors.

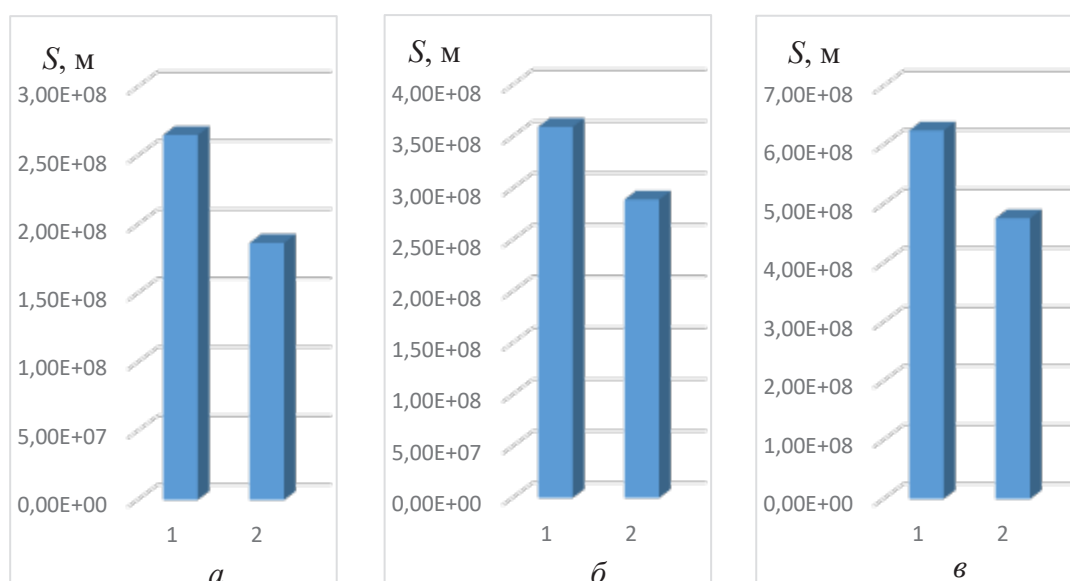


Рисунок 5 – Суммы декартовых расстояний S для 10^7 случайных циклов перемещений крана-штабелера традиционной (1) и предложенной (2) конструкций: а – простой одиночный цикл; б – двойной цикл; в – смешанный цикл
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – S Cartesian distances sums for 10^7 random cycles of stacker crane movements of traditional (1) and proposed (2) structures: simple single cycle; б) double cycle; в) mixed cycle
Source: compiled by the authors.

Рассматривались три варианта циклов: 1) простой одиночный цикл (точка загрузки – целевая ячейка – точка загрузки); 2) двойной цикл (точка загрузки – целевая ячейка № 1 – целевая ячейка № 2 – точка загрузки); 3) смешанный цикл (чередуются простой одиночный и двойной циклы).

На рисунке 4 показаны в качестве примера 10 первых случайных траекторий перемещения грузозахватного устройства в простом одиночном цикле для кранов-штабелеров двух конструкций. На рисунке 5 приведены результаты в виде сумм декартовых расстояний перемещений грузозахватного устройства для трех указанных видов циклов работы кранов-штабелеров.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ диаграмм, приведенных на рисунке 5, показывает, что для всех трех видов циклов перемещения имеет место снижение суммы декартовых расстояний S для крана-штабелера предложенной конструкции относительно крана-штабелера традиционной конструкции. При одиночном цикле значение критерия S для предложенной конструкции составляет 70,4% от значения критерия для традиционной конструкции. Для двойного и смешанного циклов значения S для предложенной кон-

струкции составляют 80,38 и 76,15% от значения критерия для традиционной конструкции соответственно.

Уменьшение суммы геометрических расстояний перемещения грузозахватного устройства крана-штабелера предложенной конструкции с поворотной стрелой при одинаковой вместимости склада и количестве циклов позволяет предполагать, что затраты времени на данные перемещения, определяющие производительность выполняемых краном работ, а также затраты энергии, могут быть существенно снижены. Поскольку затраты времени и энергии на перемещение безусловно коррелируют с геометрическим расстоянием перемещения.

Использование стеллажного крана-штабелера новой конструкции обеспечивает возможность его применения внутри складского помещения, имеющего форму в виде полукруглого арочного ангара, когда стеллажи, каждый из которых имеет переменную высоту и форму, близкую к полукруглой, располагаются вдоль арки ангара.

Снижение энергетических затрат при периодических подъемах стрелы и грузов происходит за счет замены поступательного перемещения массивной ходовой тележки с колонной у крана традиционной конструкции на вращательное движение уравновешенной стрелы сравнительно небольшой массы у крана предложен-

ной конструкции. Для уравнивания стрелы относительно оси ее вращения используется противовес, он снижает либо полностью устраняет затраты энергии на подъем общего центра масс всех подвижных звеньев крана с грузом. Также снижение затрат энергии происходит за счет уменьшения количества подвижных соединений звеньев крана с неподвижными опорами. Минимум четыре высокоскоростных вращательных соединения (двух колес ходовой тележки с рельсовыми опорами и двух роликов сверху на колонне с направляющими) прототипа заменяются на два шарнирных низкоскоростных вращательных соединения устройства с противовесом (соединение стрелы с неподвижной стойкой и соединение грузозахватного приспособления с грузовой кареткой), что снижает общие потери энергии на трение.

Отсутствие необходимости в прокладке подкрановых и потолочных рельсовых путей значительно снижает требования к качеству пола складского помещения, что уменьшает общие капитальные затраты на строительство склада. Повышение производительности крана предложенной конструкции происходит и за счет уменьшения частоты периодического осмотра и очистки поверхности рельсов и пола склада от предметов, падающих сверху вследствие нарушения упаковки грузов, что сопряжено с остановкой работы крана традиционной конструкции.

При проведении дальнейших исследований предполагается разработка математических моделей и уточнение затрат энергии при перемещениях крана-штабелера предложенной конструкции сравнительно с традиционной конструкцией.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Hruševská D., Adla R., Krayem S., Pivnička M. Event-B model for increasing the efficiency of warehouse management. *Polish journal of management studies*. 2018. Vol. 17. No. 2 :63-74. DOI: 10.17512/pjms.2018.17.2.06
2. Schulz M., Oettel V. Use of steel fibre reinforced concrete in floor slab for automated high-bay warehouses. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2021. Vol. 116. pp. 70-76. DOI: 10.1002/best.202100008
3. Geyer E., Arndt T., Mehling U. Construction of a new logistics center in Fliesen. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2021. Vol. 116. pp. 88-90. DOI: 10.1002/best.202100003
4. Ecker L., Malzer T., Wahrburg A., Schoberl M. Observer design for a single mast stacker crane. *AT – Automatisierungstechnik*. 2021. Vol. 69. No. 9. pp. 806-816. DOI: 10.1515/auto-2021-0018
5. Baryshnikova O. Creating an efficient stacker crane design. *2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*. 2020. pp. 25-28. DOI: 10.1109/ICIEA49774.2020.9101916
6. Galkina A., Schlacher K. Flatness-based model predictive control with linear programming for a single mast stacker crane. *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51. pp. 31-36. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.03.006
7. Rucker A., Rief J., Fottner J. An investigation of mean energy demand, performance and reference cycles for stacker cranes. *FME Transactions*. 2020. Vol. 48. No. 2. pp. 307-312. DOI: 10.5937/fme2002307R
8. Huang Q., Ye Y., Zhu Z., Lu T. Route-optimization based storage allocation algorithm in intelligent high-bay warehouses. *2021 4th International conference on intelligent autonomous systems (ICOIAS 2021)*. 2021. pp. 240-245. DOI: 10.1109/ICOIAS53694.2021.00050
9. Rucker A., Rief J., Fottner J. Development of a method for the energy efficiency determination of stacker cranes in automated high-bay warehouses. *FME Transactions*. 2020. Vol. 48. No. 4. pp. 753-760. DOI: 10.5937/fme2004753R
10. Zaerpour N., Gharehgozli A., De Koster R. Vertical expansion: a solution for future container terminals. *Transportation Science*. 2019. Vol. 53. No. 5. pp. 1235-1251. DOI: 10.1287/trsc.2018.0884
11. Jerman B., Zrnica N., Jenko M., Lerher T. Energy regeneration in automated high bay warehouse with stacker cranes. *Tehniski vjesnik-technical gazette*. 2017. Vol. 24. No. 5. pp. 1411-1416. DOI: 10.17559/TV-20161219112306
12. Boysen N., Stephan K. A survey on single crane scheduling in automated storage/retrieval systems // *European journal of operational research*. 2016. Vol. 254. DOI: 10.1016/j.ejor.2016.04.008
13. Graf B. Preemptive stacker crane problem: Extending tree-based properties and construction heuristics. *European journal of operational research*. 2021. Vol. 292. No. 2, pp. 532-547. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.10.051
14. Fang Z., Mao J. Energy-efficient elevating transfer vehicle routing for automated multi-level material handling systems. *IEEE transactions on automation science and engineering*. 2020. Vol. 17. No. 3. pp. 1107-1123. DOI: 10.1109/TASE.2019.2921631
15. Sun B., Zhang X., Qiao H., Li G., Chen Y. Multi-type resources collaborative scheduling in automated warehouse with fuzzy processing time. *Journal of intelligent & fuzzy systems*. 2020. Vol. 39. No. 1. pp. 899-910. DOI: 10.3233/JIFS-191827
16. Wang Y., Man R., Zhao X., Liu H. Modeling of parallel movement for deep-lane unit load autonomous shuttle and stacker crane warehousing systems. *Processes*. 2020. Vol. 8. No. 1. pp. 80. DOI: 10.3390/pr8010080
17. Ismail J., Liu S. Nonlinear model predictive control of a distributed parameter system with time-varying soft constraints. *18th European Control Conference (ECC)*. 2019. pp. 2783-2788. DOI: 10.23919/ECC.2019.8795610
18. Jiao H., Li F., Jiang Z., Li Y. Periodic Topology Optimization of a Stacker Crane. *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp.186553-186562. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2960327
19. Ma C., Zhou B. Dual-rail-guided vehicle scheduling in an automated storage and retrieval system with loading and collision-avoidance constraints. *Engineering computations*. 2021. Vol. 38. No. 8. pp. 3290-3324. DOI: 10.1108/EC-11-2019-0517

20. Dong Y., Yaohua W., Wenkai M. Optimization of storage location assignment in automated warehouse. *Microprocessors and Microsystems*, 2021, Vol. 80, pp. 103356. DOI: 10.1016/j.micpro.2020.103356

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Корытов М. С. Общая идея работы и новой конструкции крана-штабелера, разработка программного кода для проверки гипотезы, написание заключения.

Безродина А. Е. Исследование состояния воя, написание введения, разработка новой конструкции крана-штабелера, разработка программного кода для проверки гипотезы.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Mikhail S. Korytov. The general idea of the work and a new design of a stacker crane, the development of a program code for testing a hypothesis, writing a conclusion.

Angela E. Bezrodina. Researching the issue, writing an introduction, developing a new stacker crane design, developing a software product to test the hypothesis.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Безродина Ангела Евгеньевна – аспирант каф. АиЭУ.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Mikhail S. Korytov – Dr. of Sci., Associate Professor, Automobiles and Energy Systems Department.

Angela E. Bezrodina – post-graduate student, Automobiles and Energy Systems Department.

УДК 625.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-484-499>

EDN: BDSSNW

Научная статья



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТИ НОЖА И НИЖНЕЙ ЧАСТИ ОТВАЛА БУЛЬДОЗЕРА НА ГРУНТ В НАЧАЛЕ ПРОХОДА

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Применение комплекса агрегатов непрерывного действия в строительстве автомобильных дорог позволит увеличить производительность труда, улучшить качество строительства автомобильных дорог. Поэтому целью проектирования является создание комплекса агрегатов для осуществления непрерывного строительства автомобильных дорог, преимущественно в автоматическом режиме. Для реализации этой цели на первом этапе правильным является сочетание теоретических расчётов параметров рабочих органов технических средств непрерывного действия и конструктивных разработок. Для удаления камней, кустов, деревьев с полосы отвода будущей дороги целесообразно использовать агрегаты с бульдозерным оборудованием. Хотя теоретические основы разработки грунта весьма подробно рассмотрены, но, основываясь на них, сложно выявить и сопоставить частные затраты энергии воздействия на грунт элементов технических средств. Поэтому необходим подробный анализ взаимодействия с грунтом элементов различных технических средств, в частности бульдозерного оборудования. Прежде чем рассматривать первичный псевдосдвиг грунта, следует рассчитать действующие силы и затраты энергии, необходимой для воздействия поверхности ножа и нижней части отвала бульдозера на грунт.

Методика исследования. Если заглубление ножа небольшое, поверхность ножа транспортирует грунт вверх, осуществляя вторичное смещение грунта после первичного псевдосдвига; поднятие грунта на высоту; преодоление силы инерции разрабатываемого грунта; ускорение грунта; преодоление силы трения грунта о поверхность. Разработана методика определения затрат энергии, необходимой для воздействия поверхности ножа и нижней части отвала бульдозера на грунт в начале прохода, учитывающая указанные составляющие.

Результаты. На основе данной методики определены затраты энергии: на смещение грунта после первичного сдвига, поднятие грунта на высоту, преодоление силы инерции разрабатываемого грунта, ускорение грунта, преодоление силы трения грунта о поверхность. Исходя из начальных условий выявлены общие затраты энергии, мощность, сила тяги. Получены результаты расчётов затрат энергии, необходимой для осуществления перемещения поверхности ножа и нижней части отвала, во время резания грунта при различном заглублении ножа. Построены зависимости параметров от заглубления ножа бульдозерного оборудования.

Заключение. Анализируя рисунки, можно заметить, что точка P приложения сосредоточенной нормальной реакции ножа и нижней части отвала, проходящая через центр масс O смещаемого грунта, с увеличением заглубления ножа бульдозера сдвигается вниз, переходя на лезвие ножа. Так, при заглублении ножа более чем на 200 мм точка P приложения сосредоточенной нормальной реакции ножа и нижней части отвала расположена вне лезвия ножа. Во время работы бульдозера этого может не произойти, если заглубление ножа происходит постепенно. По мере заглубления ножа бульдозера общие объёмные затраты энергии, необходимые для перемещения в грунте поверхности ножа и нижней части отвала, в начале прохода увеличиваются.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грунт, бульдозерное оборудование, нож, нижняя часть отвала, резание, анализ, затраты энергии.

Статья поступила в редакцию 08.04.2022; одобрена после рецензирования 29.05.2022; принята к публикации 27.07.2022.

© Николаев В. А., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

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. 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>

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-484-499>

EDN: BDSSNW

Original article

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

Vladimir A. Nikolayev

Yaroslavl Technical University,

Yaroslavl, Russia

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

ABSTRACT

Introduction. The use of a complex of continuous units in the construction of roads will increase labour productivity, improve the quality of road construction. Therefore, the purpose of the design is to create a complex of units for the continuous construction of roads, mainly in automatic mode. In the first stage, a combination of theoretical calculations of the parameters of the continuous technology tools and design developments is the right way to achieve this goal. To remove stones, bushes, trees from the right-of-way of the future road, it is advisable to use units with bulldozer equipment. Although the theoretical foundations of soil development are considered in great detail, but based on them it is difficult to identify and compare the partial energy costs of the impact on the soil of the elements of technical means. Therefore, a detailed analysis of the interaction with the soil of the elements of various technical means, in particular, bulldozer equipment, is necessary. Before considering the primary pseudo-shift of the soil, it is necessary to calculate the effective forces and energy costs necessary for the impact of the surface of the knife and the lower part of the bulldozer blade on the ground.

The method of research. If the depth of the knife is small, the surface of the knife transports the soil upwards, carrying out: secondary displacement of the soil after the primary pseudo-shift; raising the soil to a height; overcoming the force of inertia of the developed soil; acceleration of the soil; overcoming the force of friction of the soil on the surface. A method for determining the energy costs required for the impact of the surface of the knife and the lower part of the bulldozer blade to the ground at the beginning of the passage, taking into account these components, has been developed.

Results. On the basis of the developed methodology, energy costs have been determined: for the displacement of the soil after the primary shift, raising the soil to a height, overcoming the inertial force of the developed soil, accelerating the soil, overcoming the friction force of the soil on the surface. The total energy costs, power, traction force are revealed, based on the initial conditions. The results of calculations of the energy costs required to move the surface of the knife and the lower part of the blade, during the cutting of the soil with different depths of the knife, are obtained. The parameter dependencies on the depth of the knife of the bulldozer equipment are constructed.

Conclusion. Analysing the drawings, it can be seen that the P-point of application of the concentrated normal reaction of the knife and the lower part of the blade, passing through O mass center of the displaced soil, with an increase in the depth of the bulldozer knife, shifts down, passing to the knife blade. So, when the knife is buried by more than 200 mm, P point of application of the concentrated normal reaction of the knife and the lower part of the blade is located outside the blade of the knife. During the operation of the bulldozer, this may not happen if the knife is deepened gradually. As the bulldozer knife is deepened, the total volumetric energy required to move the surface of the knife and the lower part of the blade at the beginning of the passage increases in the ground.

KEYWORDS: soil, bulldozer equipment, knife, blade bottom, cutting, analysis, energy consumption.

© Nikolayev V. A., 2022



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

The article was submitted 08.04.2022; approved after reviewing 29.05.2022; accepted for publication 27.07.2022.

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. 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>

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1) приведены этапы создания комплекса технических средств непрерывного строительства автодорог;

2) разработана методика определения затрат энергии, необходимой для воздействия поверхности ножа и нижней части отвала бульдозера на грунт в начале прохода;

3) приведён пример расчёта затрат энергии, необходимой для воздействия поверхности ножа и нижней части отвала бульдозера на грунт в начале прохода, исходя из начальных условий;

4) построены зависимости параметров от заглубления ножа бульдозерного оборудования.

ВВЕДЕНИЕ

Применение комплекса агрегатов непрерывного действия в строительстве автомобильных дорог позволит увеличить производительность труда, улучшить качество строительства автомобильных дорог. Поэтому целью проектирования является создание комплекса агрегатов для осуществления непрерывного строительства автомобильных дорог, преимущественно в автоматическом режиме. Для реализации этой цели на первом этапе правильным является сочетание теоретических расчётов параметров рабочих органов технических средств непрерывного действия и конструктивных разработок (рисунок 1).

Для удаления камней, кустов, деревьев с полосы отвода будущей дороги целесообразно использовать агрегаты с бульдозерным оборудованием. Хотя теоретические основы разработки грунта весьма подробно рассмотрены в [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25], но, основываясь на них, сложно выявить и сопоставить частные затраты энергии воздействия на грунт элементов технических средств. Поэтому необходим подробный анализ взаимодействия с грунтом элементов различных технических средств, в частности бульдозерного оборудования [26, 27].

Так как передний угол ножа больше угла трения грунта о сталь $\alpha > \varphi_{с-г}$ (рисунок 2, а), то резание грунта ножом близко к резанию пуансоном. Первичный сдвиг грунта должен бы происходить по поверхности, которой в продольно-вертикальной плоскости соответствует линия $АН$, отклоняющейся от нормали к передней поверхности ножа на угол трения грунта о сталь $\varphi_{с-г}$. Однако ввиду большой площади поверхности сдвига реального сдвига грунта не произойдёт. В пределах объёма, которому в продольно-вертикальной плоскости соответствует площадь $АНСВ$, грунт от воздействия ножа будет находиться в сложном напряжённом состоянии, сочетающем напряжения сдвига, объёмного сжатия и смятия. Поэтому предположим, что по поверхности, которой в продольно-вертикальной плоскости соответствует линия $АН$, произойдёт первичный псевдосдвиг. Допустим, что первичный псевдосдвиг грунта происходит дискретно, путём микросдвигов. Каждый микросдвиг грунта происходит на пути, которому соответствует на передней поверхности ножа расстояние AB микросдвига, $l_{мсд}$.

Усилие псевдосдвига зависит от многих факторов, в частности от давления, которое оказывает смещаемый грунт в пределах объёма, которому в продольно-вертикальной плоскости соответствует площадь $СВЕД$ (см. рисунок 2, а). Поэтому, прежде чем рассматривать первичный псевдосдвиг грунта, следует рассчитать действующие силы и затраты энергии, необходимой для воздействия поверхности ножа и нижней части отвала бульдозера на грунт в пределах объёма, которому в продольно-вертикальной плоскости соответствует площадь $СВЕД$.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Поверхность ножа и нижней части отвала транспортирует грунт вверх, осуществляя:

- вторичное смещение грунта после первичного псевдосдвига [27];
- поднятие грунта на высоту $h_{под}$ (см. рисунок 2, а);

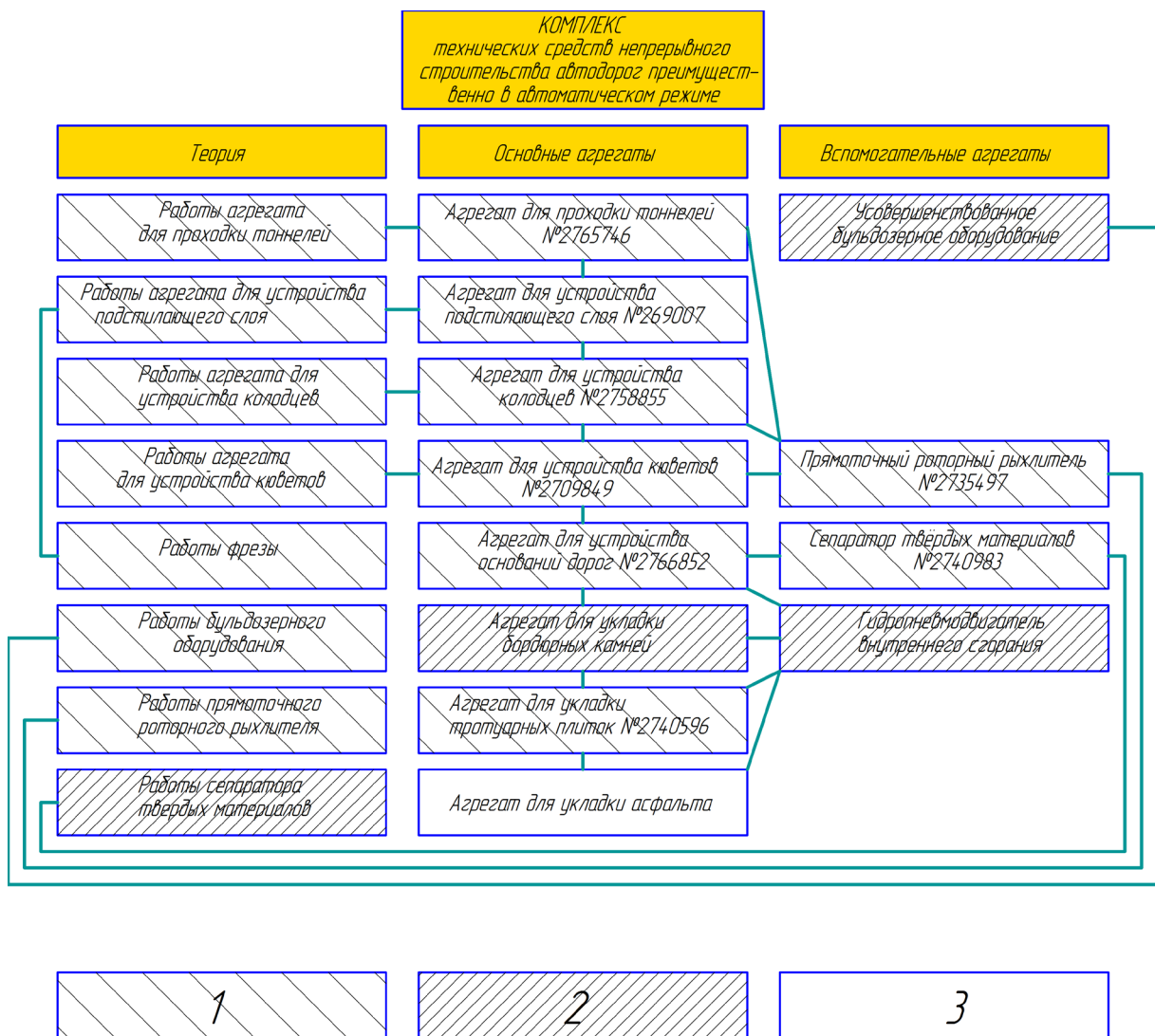


Рисунок 1 – Комплекс технических средств непрерывного строительства автодорог:
1 – разработано, запатентовано;
2 – в стадии разработки, патентования;
3 – следует разработать
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Complex of technical means of continuous roads construction:
1 – developed, patented;
2 – under development, patenting;
3 – should be developed
Source: compiled by the author.

- преодоление силы инерции разрабатываемого грунта;
 - ускорение грунта;
 - преодоление силы трения грунта о поверхность.
- Объём грунта, воздействующего на поверхность ножа и нижнюю часть отвала в секунду,

$$\frac{V_{н+н\ ч\ о}}{\tau} = a \cdot B \cdot v_a,$$

(1)

где a – глубина хода ножа; B – ширина отвала; v_a – скорость агрегата.

Хотя мгновенное значение силы, необходимой для смещения грунта после первичного псевдосдвига, изменяется в широких пределах, среднее её значение

$$F_{\text{CM}} = \sigma_{\text{CM}}^B S_{\text{CM}}, \quad (2)$$

где σ_{CM}^B – среднее напряжение в грунте в период его смещения.

Общую площадь S_{CM} смещения первично сдвинутого грунта возьмём из [27]. Затраты энергии на смещение первично сдвинутого грунта поверхностью ножа и нижней части отвала определим из выражения

$$u_{\text{CM}} = F_{\text{CM}} s \cos \psi_B, \quad (3)$$

где s – путь бульдозера, необходимый для разработки одного кубического метра грунта; ψ_B – угол наклона равнодействующей силы к горизонтали (см. рисунок 2, а). Точка О приложения силы F_{CM} в центре масс смещаемого грунта.

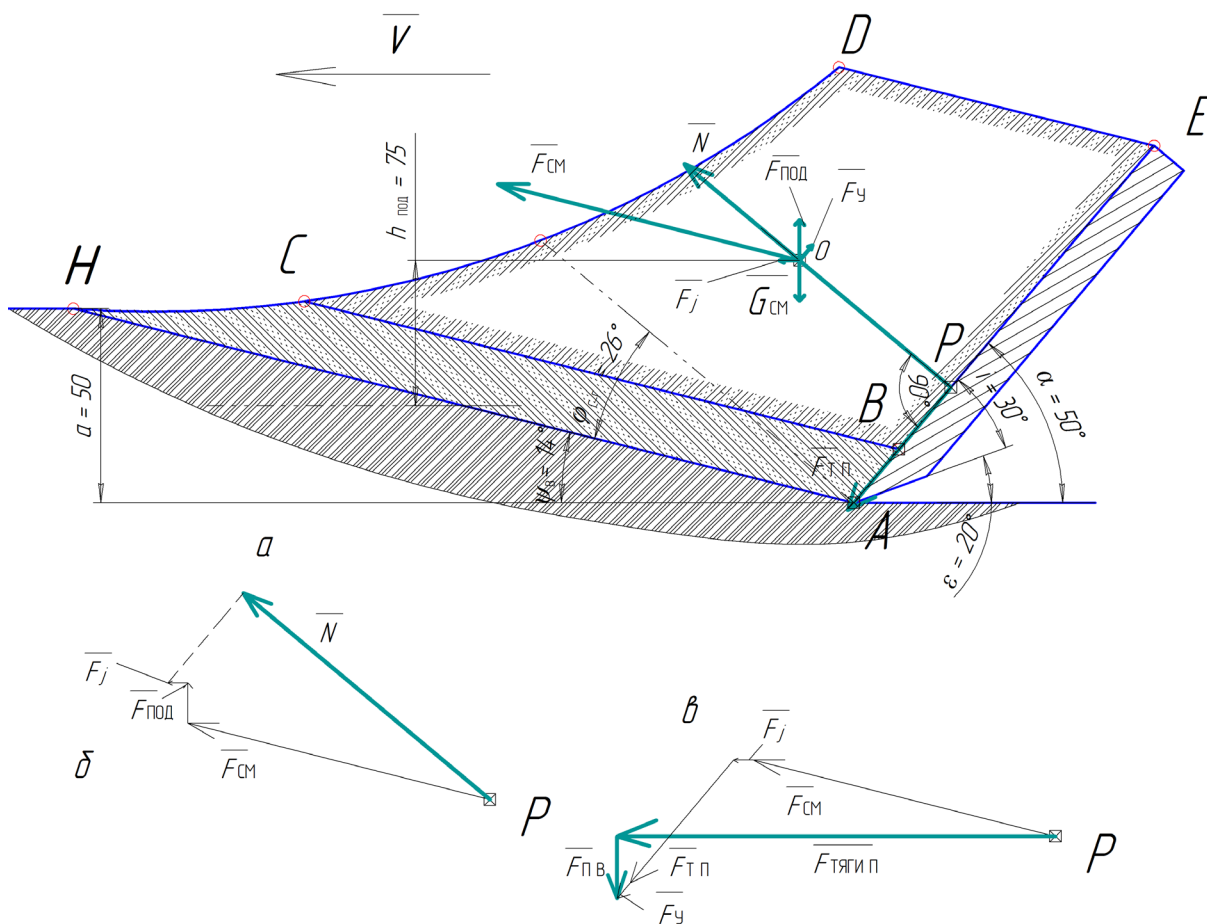


Рисунок 2 – Динамика воздействия поверхности ножа и нижней части отвала бульдозера на грунт:
а – схема сил, приложенных к участку смещаемого грунта;
б – схема определения нормальной реакции поверхности ножа и нижней части отвала на воздействие смещаемого грунта;
в – схема определения силы тяги
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Dynamics of the impact for the surface of the knife and the lower part of the bulldozer blade to the ground:
a – a diagram of the forces applied to the site of the displaced soil;
b – a scheme for determining the normal reaction of the surface of the knife and the lower part of the blade to the effect of the displaced soil;
c – scheme for determining the thrust force
Source: compiled by the author.

Допустим, одновременно весь первично разрыхлённый грунт, сосредоточенный в объёме один кубический метр, массой $m_{\text{пр}}$, поверхность ножа и нижняя часть отвала поднимает на условную высоту $h_{\text{под}}$ (см. рисунок 2, а). Потенциальная энергия, затрачиваемая на этот подъём,

$$u_{\text{под}} = g m_{\text{пр}} h_{\text{под}}. \quad (4)$$

Масса одного кубического метра первично разрыхлённого грунта

$$m_{\text{пр}} = \rho_{\text{пр}} V_{\text{пр}}.$$

Плотность первично сдвинутого и разрыхлённого грунта

$$\rho_{\text{пр}} = \frac{\rho}{k_{\text{р}}},$$

где $k_{\text{р}}$ – коэффициент, учитывающий разрыхление грунта; $V_{\text{пр}} = 1 \text{ м}^3$ – объём грунта.

Среднее значение силы, необходимой для подъёма смещаемого грунта, равно силе его тяжести:

$$F_{\text{под}} = G_{\text{см}} = g m,$$

где масса грунта, воздействующего на нож и нижнюю часть отвала,

$$m = \rho_{\text{пр}} V = \rho_{\text{пр}} S_{\text{см}} B. \quad (5)$$

Исходя из принципа независимости сил, допустим, что не бульдозер перемещается относительно грунта, а грунт с горизонтальной скоростью агрегата перемещается относительно ножа и нижней части отвала бульдозера. Сила инерции грунта воздействует на нож и нижнюю часть отвала бульдозера, вызывая их ответную реакцию F_j (см. рисунок 2, а). Величина этой реакции в каждый момент времени изменяется. Поэтому допустим, что первично псевдосдвинутый грунт объёмом один кубический метр одновременно тормозится поверхностью ножа и нижней частью отвала. Тогда условная сила, противодействующая инерции грунта,

$$F_{\Sigma j} = a_j m_{\text{пр}}, \quad (6)$$

где a_j – отрицательное ускорение (замедление) грунта поверхностью ножа и нижней частью отвала.

С достаточной степенью точности можно принять время замедления фрагмента грунта равным времени микросдвига. Расстояние микросдвига $l_{\text{мсд}}$. Скорость агрегата v_a . Время замедления грунта

$$\tau_j \approx \frac{l_{\text{мсд}} \cos \alpha}{v_a \cos \alpha} = \frac{l_{\text{мсд}}}{v_a}. \quad (7)$$

Примем конечную горизонтальную скорость грунта после его замедления $v_{\text{кон г}} = 0$.

Замедление грунта

$$a_j = \frac{v_{\text{кон г}} - v_a}{\tau_j} = \frac{0 - v_a}{\tau_j}. \quad (8)$$

Среднее мгновенное значение силы определим из пропорции

$$F_j = F_{\Sigma j} \frac{l_{\text{мсд}}}{s}. \quad (9)$$

Энергия на преодоление напора грунта объёмом один кубический метр на переднюю поверхность ножа и нижней части отвала

$$u_j = F_j \cdot s \text{ или } u_j = F_{\Sigma j} l_{\text{мсд}}. \quad (10)$$

Грунт – упруговязкопластичная среда. Его вязкопластичные свойства учитываем при расчёте смещения грунта. Упругие свойства грунта зависят от содержания глины, песка и других составляющих, его влажности. Поэтому расчёт ускорения грунта после его встречи с ножом и нижней частью отвала должен быть основан на экспериментальных данных. Кроме того, грунт состоит из отдельных частиц, расположенных в пласте. С поверхностью ножа и нижней части отвала контактируют только частицы грунта, расположенные внизу отделённого пласта. Остальные частицы в пласте непосредственно с ножом и нижней частью отвала не взаимодействуют. Они получают ускорение от частиц грунта, которые взаимодействуют с ножом и нижней частью отвала. Величина и направление вектора ускорения каждой частицы грунта является случайными. Грунт поступает на нож и нижнюю часть отвала непрерывно. Поле векторов частиц грунта меняется в каждый момент времени, то есть поле векторов частиц грунта является случайной величиной как в пространстве, так и во времени.

Чтобы рассчитать ускорение грунта от воздействия ножа и нижней части отвала, представим, что сечение грунта объёмом один кубический метр соответствует сечению BCDE (см. рисунок 2, а). При этом грунт объёмом один кубический метр представляет монолит. Этот монолит, обладая упругими свойствами, ударяясь о нож и нижнюю часть отвала, получает ускорение. Направление частных векторов ускорения частиц грунта может быть различным и зависит от многих факторов. Однако преимущественным общим является направление ускорения грунта параллельно поверх-

ности ножа. Направим вектор силы ускорения грунта F_y параллельно поверхности ножа. Закругление нижней части отвала не учитываем.

Допустим, после его горизонтального замедления до $v_{\text{кон } \Gamma} = 0$, грунт в момент касания ножа и нижней части отвала имеет начальную скорость параллельно поверхности ножа $v_{\text{нач } y} = 0$. Предположим, конечная скорость грунта от воздействия ножа и нижней части отвала равна скорости агрегата, $v_{\text{кон } y} = v_a$. Примем время ускорения

$$\tau_{\text{пн}} \approx \tau_j = \frac{l_{\text{мсд}}}{v_a}. \quad (11)$$

Тогда ускорение грунта

$$a_y = \frac{v_{\text{кон } y} - v_{\text{нач } y}}{\tau_y} = \frac{v_{\text{кон } y}}{\tau_y}. \quad (12)$$

Сила, необходимая для придания грунту ускорения,

$$F_{\Sigma y} = a_y m_{\text{пн}}. \quad (13)$$

Аналогично (9) среднее мгновенное значение силы определим из пропорции

$$F_y = F_{\Sigma y} \frac{l_{\text{мсд}}}{s}. \quad (14)$$

Энергия на придание ускорения грунту объёмом один кубический метр передней поверхностью ножа и нижней частью отвала

$$u_y = F_y \cdot s \text{ или } u_y = F_{\Sigma y} l_{\text{мсд}}. \quad (15)$$

При движении пласт грунта преодолевает силу $F_{\text{тп}}$ трения грунта о поверхность ножа и нижней части отвала. Нанеся все силы и спроецировав их на направление, перпендикулярное поверхности ножа и нижней части отвала (рисунок 2, б), получим общую нормальную реакцию $N_{\text{см}}$ этой поверхности. Сила трения грунта о поверхность ножа и нижней части отвала

$$F_{\text{тп}} = f_{\text{с-г}} N_{\text{см}}. \quad (16)$$

Сосредоточенная сила трения направлена под углом α к направлению движения бульдозера и приложена к точке P . Составляющая силы трения $F_{\text{тп}} \sin \alpha$ воздействует на элементы конструкции бульдозера, создавая в них дополнительные напряжения. Составляющая силы трения $F_{\text{тп}} \cos \alpha$ препятствует движению агрегата. Поэтому затраты энергии на преодоление силы трения о поверхность ножа и нижней части отвала грунта объёмом один кубический метр:

$$u_{\text{тп}} = F_{\text{тп}} s \cos \alpha. \quad (17)$$

Общие затраты энергии на перемещение поверхности ножа и нижней части отвала в грунте объёмом один кубический метр равны сумме частных объёмных затрат энергии:

$$u_{\Sigma \text{п}} = u_{\text{см}} + u_{\text{под}} + u_j + u_y + u_{\text{тп}}. \quad (18)$$

Путь s , необходимый для разработки одного кубического метра грунта, бульдозер пройдёт за время

$$\tau = \frac{s}{v_a}. \quad (19)$$

Мощность, затрачиваемая трактором на перемещение поверхности ножа и нижней части отвала,

$$N_{\text{п}} = \frac{u_{\Sigma \text{п}}}{\tau}. \quad (20)$$

Силу $F_{\text{тяги п}}$ тяги трактора для смещения грунта поверхностью ножа и нижней части отвала бульдозера определим, сложив и спроецировав полученные силы на горизонталь (рисунок 2, в).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для расчёта примем следующие исходные данные. Грунт – суглинки плотностью $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$. Движение агрегата со скоростью $v_a = 1 \text{ м/с}$. Ширина отвала $B = 2,5 \text{ м}$. Глубина разработки $a = 0,05 \text{ м}$. Приняты допущения:

- предел прочности грунта на смещение после первичного псевдосдвига лезвием ножа бульдозера при полузажатом резании $\sigma_{\text{см}}^B = 0,2 \text{ МПа}$;
- коэффициент, учитывающий разрыхление грунта, $k_p = 1,5$;
- коэффициент трения грунта о сталь $f_{\text{с-г}} = 0,5$;
- расстояние микросдвига $l_{\text{мсд}} = 18 \text{ мм}$.

а) Затраты энергии на смещение грунта после первичного сдвига

Объём грунта, воздействующего на поверхность ножа и нижнюю часть отвала в секунду (1),

$$\frac{V_{\text{н+нч о}}}{\tau} = 0,05 \cdot 2,5 \cdot 1 = 0,125 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Если глубина разработки грунта бульдозером $a = 50 \text{ мм}$, площадь сечения грунта, смещаемого после первичного псевдосдвига лезвием ножа, $S_{\text{см}} = 10004 \text{ мм}^2$ [27]. Сила, необходимая для смещения первично сдвинутого грунта ножом и нижней частью отвала бульдозера (2),

$$F_{\text{см}} = 0,2 \cdot 10004 = 2000 \text{ Н}.$$

Путь бульдозера, необходимый для разработки одного кубического метра грунта,

$$s = \frac{V}{Ba} = \frac{1}{2,5 \cdot 0,05} = 8 \text{ м.}$$

Затраты энергии на смещение первично сдвинутого грунта поверхностью ножа и нижней части отвала (3).

$$u_{\text{см}} = 2000 \cdot 8 \cdot \cos 14^\circ = 15530 \text{ Дж/м}^3.$$

б) Энергия, затрачиваемая на подъём смещаемого грунта

Плотность первично сдвинутого и разрыхлённого грунта

$$\rho_{\text{п р}} = \frac{1600}{1,5} = 1067 \text{ кг/м}^3.$$

Масса одного кубического метра первично разрыхлённого грунта $m_{\text{п р}} = 1067 \text{ кг}$.

Средняя масса грунта, воздействующего на нож и нижнюю часть отвала (5),

$$m = 1067 \cdot 10004 \cdot 10^{-6} \cdot 2,5 = 26,7 \text{ кг.}$$

Сила, необходимая для подъёма смещаемого грунта, равна силе его тяжести

$$F_{\text{под}} = G_{\text{см}} = 9,8 \cdot 26,7 = 261 \text{ Н.}$$

Из рисунка 2, а высота подъёма грунта от воздействия ножа и нижней части отвала $h_{\text{под}} = 0,075 \text{ м}$. Объёмная энергия, затрачиваемая на подъём смещаемого грунта (4),

$$u_{\text{под}} = 9,8 \cdot 1067 \cdot 0,075 = 784 \text{ Дж/м}^3.$$

в) Энергия на преодоление напора грунта объёмом один кубический метр на переднюю поверхность ножа и нижней части отвала

Время замедления грунта при столкновении с поверхностью ножа и нижней части отвала (7):

$$\tau_j = \frac{0,018}{1} = 0,018 \text{ с.}$$

Замедление грунта (8):

$$a_j = \frac{1}{0,018} = 55,5 \text{ м/с}^2.$$

Условная сила, противодействующая инерции грунта (6),

$$F_{\Sigma j} = 55,5 \cdot 1067 = 59278 \text{ Н/м}^3.$$

Среднее мгновенное значение силы определим из пропорции (9):

$$F_j = 59278 \frac{0,018}{8} = 133 \text{ Н.}$$

Энергия на преодоление напора грунта объёмом один кубический метр на переднюю поверхность ножа и нижней части отвала (10):

$$u_j = 59278 \cdot 0,018 = 1067 \text{ Дж/м}^3.$$

г) Энергия на придание ускорения грунту

Конечная скорость грунта от воздействия ножа и нижней части отвала $v_{\text{кон у}} = v_a = 1 \text{ м/с}$. Время ускорения грунта (11):

$$\tau_{\text{н}} \approx \tau_j = 0,018 \text{ с.}$$

Ускорение грунта (12):

$$a_y = \frac{1}{0,018} = 55,5 \text{ м/с}^2.$$

Условная сила, необходимая для придания грунту ускорения, (13):

$$F_{\Sigma y} = 55,5 \cdot 1067 = 59278 \text{ Н/м}^3.$$

Среднее мгновенное значение силы определим из пропорции (14):

$$F_y = 59278 \frac{0,018}{8} = 133 \text{ Н.}$$

Энергия на придание ускорения грунту, объёмом один кубический метр, передней поверхностью ножа и нижней частью отвала (15)

$$u_y = 59278 \cdot 0,018 = 1067 \text{ Дж/м}^3.$$

д) Затраты энергии на преодоление трения грунта о поверхность ножа и нижней части отвала

Нанесём все силы на рисунок 2, б в принятом масштабе, приложив их к точке Р. Спроецируем силы на направление, перпендикулярное поверхности ножа и нижней части отвала. Сила F_y направлена параллельно поверхности ножа, поэтому не влияет на нормальную реакцию. Из рисунка нормальная реакция поверхности ножа $N = 2067 \text{ Н}$.

Сила трения грунта о поверхность ножа и нижней части отвала (16):

$$F_{\text{т н}} = 0,5 \cdot 2067 = 1033 \text{ Н.}$$

Объёмные затраты энергии на преодоление трения грунта о поверхность ножа и нижней части отвала грунта (17):

$$u_{\text{т н}} = 1033 \cdot 8 \cdot \cos 50^\circ = 5315 \text{ Дж/м}^3.$$

е) Общие затраты энергии, мощность, сила тяги

Общие объёмные затраты энергии на перемещение поверхности ножа и нижней части отвала равны сумме частных объёмных затрат энергии (18):

$$u_{\Sigma \Pi} = 15530 + 784 + 1067 + 1067 + 5315 = 23763 \text{ Дж/м}^3 \approx 23,8 \text{ кДж/м}^3.$$

Путь s , необходимый для разработки одного кубического метра грунта, бульдозер пройдёт за время (19):

$$\tau = \frac{8}{1} = 8 \text{ с.}$$

Мощность, затрачиваемая трактором на перемещение поверхности ножа и нижней части отвала (20),

$$N_{\Pi} = \frac{23763}{8} = 2970 \text{ Вт} \approx 3,0 \text{ кВт.}$$

Сложим последовательно силы $F_{\text{см}}$, F_j , F_y и $F_{\text{тп}}$ (рисунок 2, в), причём силу F_y направим в противоположную сторону. Спроецировав сложенные силы на горизонталь, получим силу

тяги трактора, необходимую для перемещения поверхности ножа и нижней части отвала, $F_{\text{тяги п}} = 2816 \text{ Н} \approx 2,8 \text{ кН}$.

Вертикальная сила $F_{\text{пв}} = 400 \text{ Н}$ направлена вниз. К ней следует добавить силу $G_{\text{см}} = 261 \text{ Н}$ тяжести смещаемого грунта. Суммарная вертикальная сила

$$F_{\Sigma \text{ пв}} = F_{\text{пв}} + G_{\text{см}}; F_{\Sigma \text{ пв}} = 400 + 261 = 661 \text{ Н.}$$

Равная сумме этих сил вертикальная сила воздействия ножа и нижней части отвала на смещаемый грунт направлена вверх. Структура затрат энергии на перемещение поверхности ножа и нижней части отвала в грунте объёмом один кубический метр на рисунке 3.

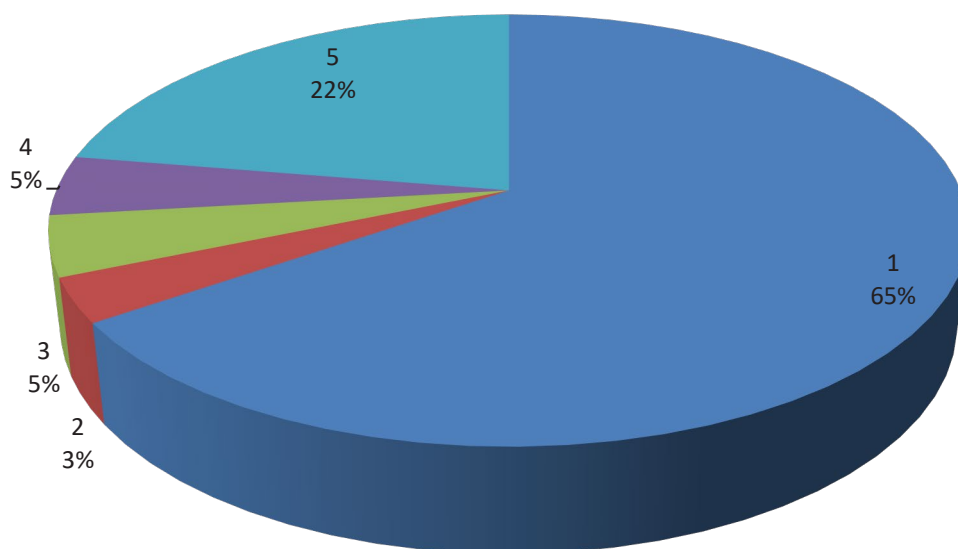


Рисунок 3 – Структура затрат энергии, необходимой для осуществления перемещения поверхности ножа и нижней части отвала, во время резания грунта при заглублении ножа 50 мм в начале прохода бульдозера:
 1 – энергия на смещение грунта; 2 – энергия на подъём грунта;
 3 – энергия на замедление грунта; 4 – энергия на ускорение грунта;
 5 – энергия на преодоление трения ножа и нижней части отвала о грунт
 Источник: составлено автором.

Figure 3 – The structure of the energy required to move the surface of the knife and the lower part of the blade, during the cutting of the soil when the knife is buried 50 mm at the beginning of the bulldozer pass:
 1 – energy for the displacement of the soil; 2 – energy for soil lifting;
 3 – energy to slow down the soil; 4 – energy for soil acceleration;
 5 – energy to overcome the friction of the knife and the bottom of the blade to the ground
 Source: compiled by the author.

Результаты расчётов затрат энергии, необходимой для осуществления перемещения поверхности ножа и нижней части отвала, во время резания грунта при различном заглублении ножа сведены в таблицы 1, 2, 3, 4.

Затраты энергии на подъём грунта поверхностью ножа и нижней частью отвала в начале прохода, при заглублении ножа на 50 мм, больше, чем при заглублении на 100 мм, так

как при заглублении ножа на 50 мм была условно взята высота подъёма грунта, равная высоте верхней кромки ножа.

Затраты энергии на преодоление напора грунта объёмом один кубический метр на переднюю поверхность ножа и нижней части отвала и энергии на придание ускорения грунту остаются неизменными с увеличением заглубления ножа бульдозера.

Таблица 1

Затраты энергии на смещение грунта поверхностью ножа и нижней частью отвала в начале прохода при различном заглублении ножа
Источник: составлено автором.

Table 1

Energy consumption for soil displacement by knife surface and the bottom of the dump at the beginning of the pass with different deepening of the knife
Source: compiled by the author.

Глубина, а	Объём грунта в секунду	Напряжение при смещении грунта	Площадь смещения	Сила, необходимая для смещения грунта	Путь бульдозера, необходимый для разработки одного кубического метра грунта, s	Объёмные затраты энергии
м	куб. м/с	МПа	кв. мм	Н	м	Дж/куб. м
0,05	0,125	0,2	10004	2000	8	15530
0,1	0,25	0,2	25894	5179	4	20100
0,15	0,375	0,2	60796	12159	2,67	31461
0,2	0,5	0,2	111323	22265	2	43206
0,25	0,625	0,2	175980	35196	1,6	54640
0,3	0,75	0,2	253877	50775	1,33	65688

Таблица 2

Затраты энергии на подъём грунта поверхностью ножа и нижней частью отвала в начале прохода при различном заглублении ножа
Источник: составлено автором.

Table 2

Energy consumption for soil lifting by knife surface and the bottom of the dump at the beginning of the pass in case of different deepening of the knife
Source: compiled by the author.

Глубина, а	Масса одного кубического метра грунта	Масса грунта, действующего на нож и нижнюю часть отвала	Сила тяжести грунта, действующего на нож и нижнюю часть отвала	Сила, необходимая для подъёма грунта	Высота подъёма грунта	Объёмные затраты энергии на подъём грунта
м	кг	кг	Н	Н	м	Дж/куб. м
0,05	1067	26,7	261	261	0,075	784
0,1	1067	69,05	677	677	0,031	324
0,15	1067	162	1589	1589	0,046	481
0,2	1067	297	2909	2909	0,059	617
0,25	1067	469	4599	4599	0,072	753
0,3	1067	677	6635	6635	0,084	878

Таблица 3

**Затраты энергии на преодоление трения грунта
о поверхность ножа и нижней части отвала
в начале прохода при различном заглублении ножа и общие затраты энергии**
Источник: составлено автором.

Table 3

**Energy consumption for overcoming soil friction against the knife surface
and the lower part of the dump at the beginning of the pass with different deepening
of the knife and total energy costs**
Source: compiled by the author.

Глубина, а	Нормальная реакция ножа и нижней части отвала	Коэффициент трения грунта о сталь	Сила трения грунта о нож и нижнюю часть отвала	Объёмная энергия на преодоление трения грунта о нож и нижнюю часть отвала	Общие затраты энергии
м	Н		Н	Дж/куб. м	Дж/куб. м
0,05	2067	0,5	1033	5315	23763
0,1	5293	0,5	2646	6804	29361
0,15	12257	0,5	6128	10505	44580
0,2	22223	0,5	11112	14285	61408
0,25	35361	0,5	17680	18184	77272
0,3	50427	0,5	25213	21609	92124

Таблица 4

**Мощность и сила тяги трактора, необходимая для перемещения поверхности ножа
и нижней части отвала в начале прохода при различном заглублении ножа**
Источник: составлено автором.

Table 4

**Tractor traction power and force required to move knife surface
and the lower part of the dump at the beginning of the pass with different deepening of the knife**
Source: compiled by the author.

Глубина, а	Время разработки одного кубического метра грунта	Мощность, необходимая для работы поверхности ножа и нижней части отвала бульдозера	Мощность	Сила тяги	Сила тяги трактора
м	с	Вт	кВт	Н	кН
0,05	8	2970	3	2816	2,8
0,1	4	7340	7,3	7175	7,2
0,15	2,67	16717	16,7	16383	16,4
0,2	2	30704	30,7	29522	29,5
0,25	1,6	48295	48,3	46678	46,7
0,3	1,33	69093	69,1	66530	66,5

В связи с увеличением затрат энергии на смещение грунта поверхностью ножа и нижней частью отвала и на преодоление трения грунта о поверхность ножа и нижней части отвала с увеличением заглубления ножа бульдозера

относительная доля затрат энергии на преодоление напора грунта и на придание ускорения грунту уменьшается. Зависимости параметров от заглубления ножа даны на рисунках 4, 5, 6, 7, 8, 9.

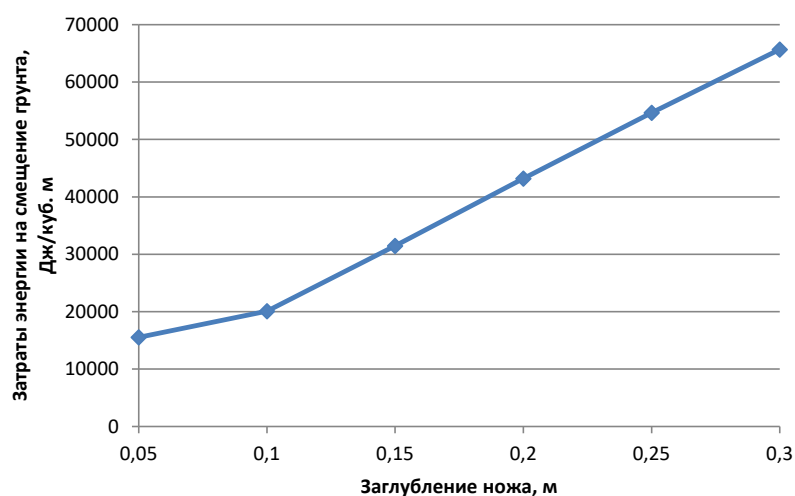


Рисунок 4 – Зависимость объёмных затрат энергии на смещение грунта поверхностью ножа и нижней частью отвала в начале прохода от заглубления ножа
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Dependence of volumetric energy expenditure on the displacement of the soil by the surface of the knife and the lower part of the blade at the beginning of the pass from the deepening of the knife
Source: compiled by the author.

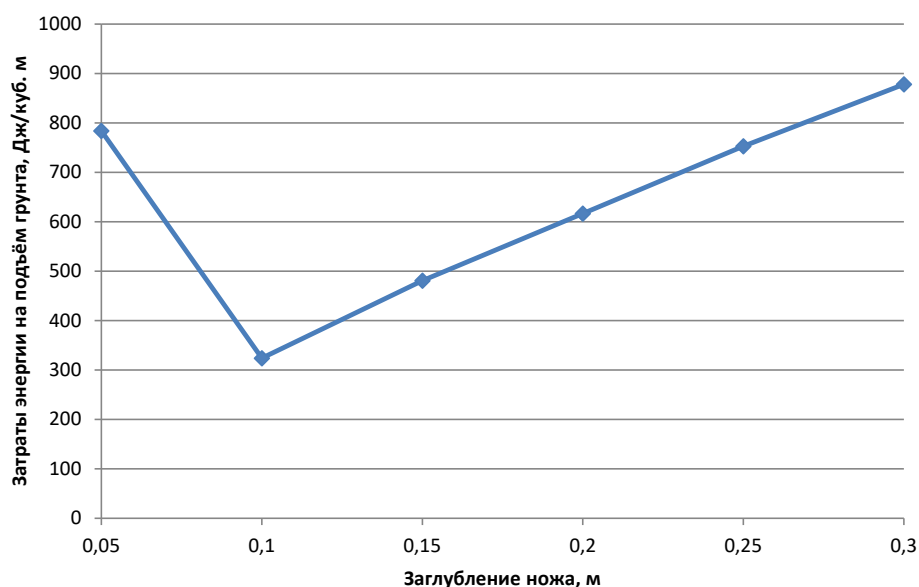


Рисунок 5 – Зависимость объёмных затрат энергии на подъём грунта поверхностью ножа и нижней частью отвала в начале прохода от заглубления ножа
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Dependence of volumetric energy expenditure on lifting the soil by the surface of the knife and the lower part of the blade at the beginning of the pass from the depth of the knife
Source: compiled by the author.

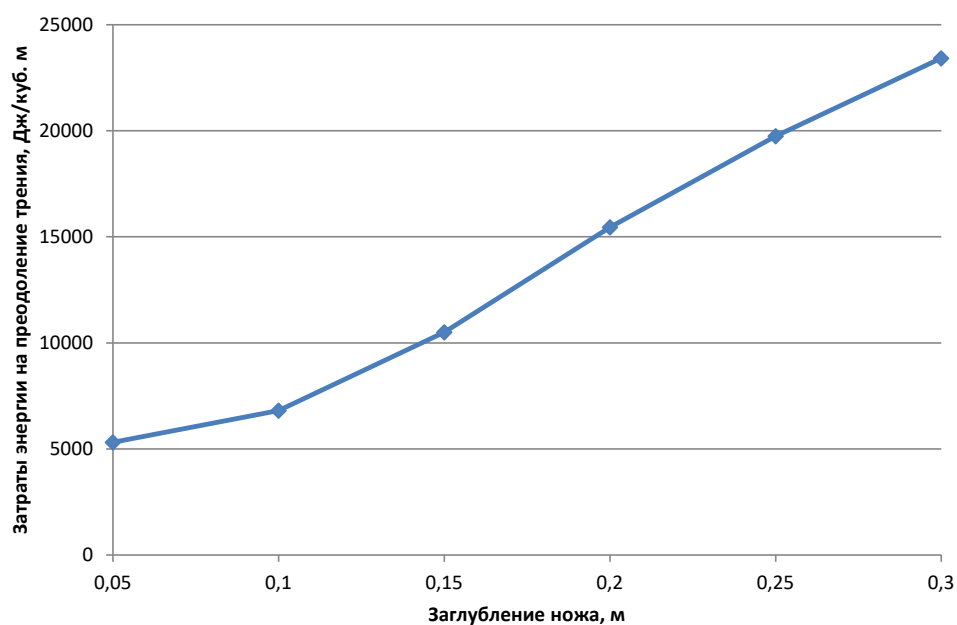


Рисунок 6 – Зависимость объёмных затрат энергии на преодоление трения грунта о поверхность ножа и нижней части отвала в начале прохода от заглубления ножа
Источник: составлено автором.

Figure 6 – Dependence of volumetric energy costs to overcome the friction of the soil on the surface of the knife and the lower part of the blade at the beginning of the pass from the depth of the knife
Source: compiled by the author.

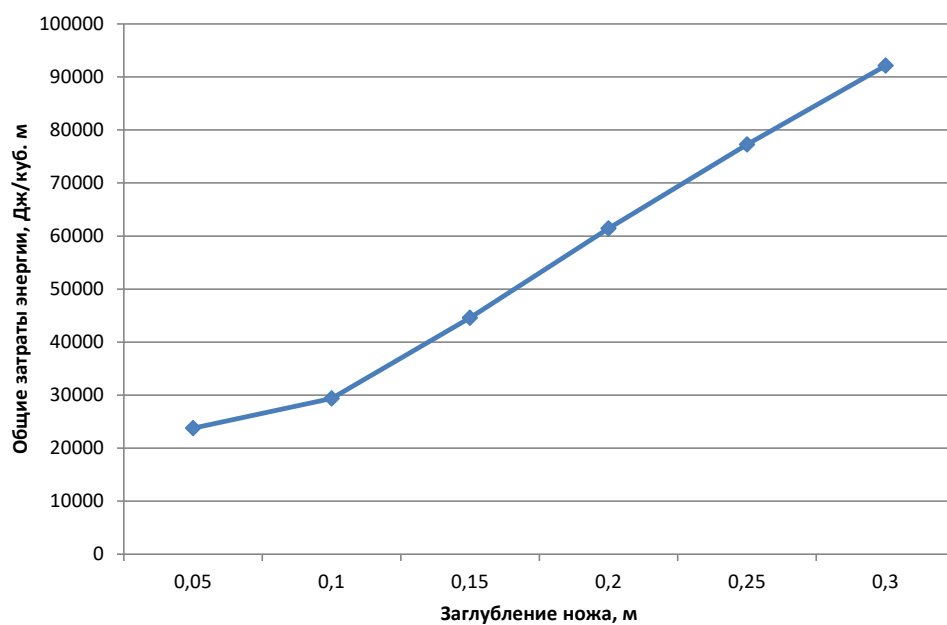


Рисунок 7 – Зависимость общих объёмных затрат энергии на перемещение поверхности ножа и нижней части отвала в начале прохода от заглубления ножа
Источник: составлено автором.

Figure 7 – The dependence of the total volumetric energy expenditure on moving the surface of the knife and the lower part of the blade at the beginning of the pass from the depth of the knife
Source: compiled by the author.

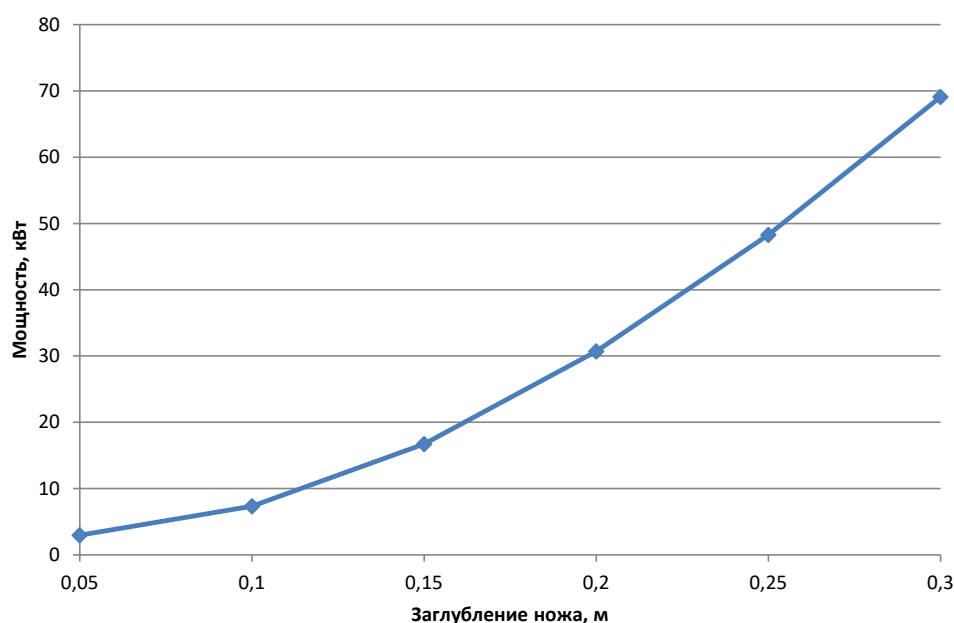


Рисунок 8 – Зависимость мощности, необходимой для перемещения поверхности ножа и нижней части отвала в начале прохода, от заглубления ножа
Источник: составлено автором.

Figure 8 – The dependence of the power required to move the surface of the knife and the lower part of the blade at the beginning of the pass, on the depth of the knife
Source: compiled by the author.

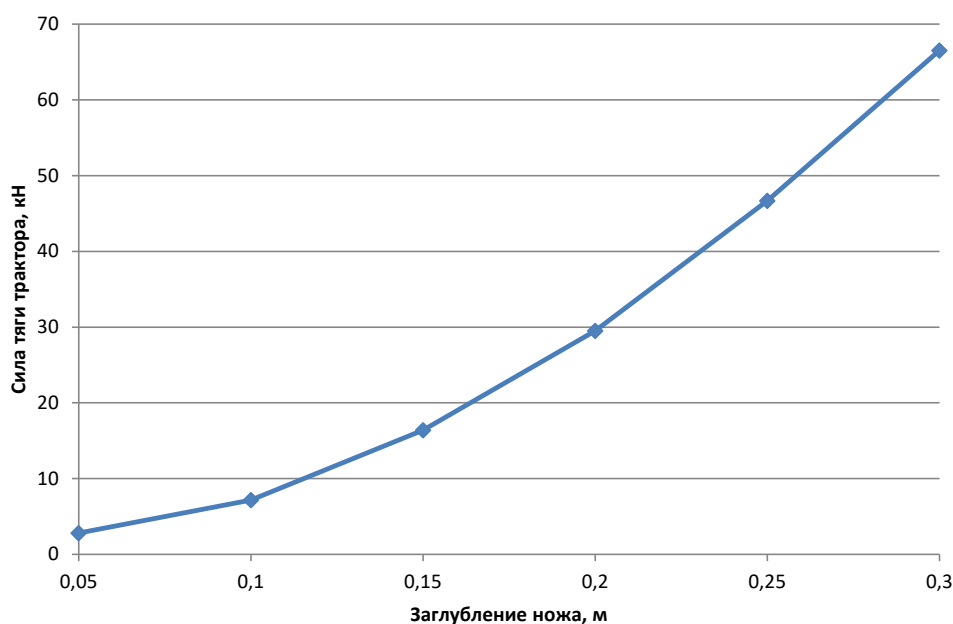


Рисунок 9 – Зависимость силы тяги трактора для преодоления сопротивления грунта перемещению поверхности ножа и нижней части отвала в начале прохода от заглубления ножа
Источник: составлено автором.

Figure 9 – Dependence of the tractor traction force to overcome the resistance of the soil to the movement of the knife surface and the lower part of the blade at the beginning of the pass from the sinking of the knife
Source: compiled by the author.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя рисунки, можно заметить, что точка Р приложения сосредоточенной нормальной реакции ножа и нижней части отвала, проходящая через центр масс О смещаемого грунта, с увеличением заглубления ножа бульдозера сдвигается вниз, переходя на лезвие ножа. Так, при заглублении ножа более чем на 200 мм, точка Р приложения сосредоточенной нормальной реакции ножа и нижней части отвала расположена вне лезвия ножа. Во время работы бульдозера этого может не произойти, если заглубление ножа происходит постепенно. По мере заглубления ножа бульдозера общие объёмные затраты энергии, необходимые для перемещения в грунте поверхности ножа и нижней части отвала, в начале прохода увеличиваются.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зыков Б. И. Теория рабочих процессов строительных машин. Ярославль: Изд. ЯГТУ, 2003. 114 с.
2. 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.
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 многолезцовых рабочих органов землеройных машин // Строительные и дорожные машины. 2010. № 11. С. 44–48.
8. Берестов Е. И. Влияние трения грунта по поверхности ножа на сопротивление резанию // Строительные и дорожные машины. 2010. № 11. С. 34–38.
9. Вершинин А. В., Зубов В. С., Тюльнев А. М. Повышение эффективности дискофрезерных рабочих механизмов для разработки мёрзлых грунтов // Строительные и дорожные машины. 2012. № 8. С. 42–44.
10. 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.
11. Ryabets N., Kurzner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy. // Cold Regions Science and Technology. 2003. Vol. 36. P. 115–128.

12. 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.

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

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

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

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

17. 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.

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

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

20. 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.

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

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

23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. Николаев В. А. Машины для обработки почвы. Теория и расчёт / В. А. Николаев. Ярославль: Изд-во ФГБОУ ВПО ЯГСХА, 2014. 358 с.

27. Николаев В. А. Резание грунта пассивными рабочими органами. Теория и расчёт / В. А. Николаев. Ярославль: Изд-во ФГБОУ ВО ЯГТУ, 2022. 388 с.

REFERENCES

1. Zykov B. I. *Teorija rabochih processov stroitel'nyh mashin* [Workflow theory of construction machinery]. Yaroslavl: Izd. JaGTU, 2003. 114 p. (in Russ.)
2. Zhuk A. F. *Teoreticheskoe obosnovanie racional'noj tehnologicheskoy shemy i parametrov rotatsionnogo pluga*. Sbornik nauchnyh trudov «Teorija i raschjot

pochvoobrabatyvajushhih mashin» [Theoretical substantiation of rational technological scheme and parameters of Rotary plow. Collection of scientific works «Theory and calculation of tillage machines». T 120. Moscow, «Mashinostroenie», 1989: 145-153. (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.

4. Karasjov G. N. Opređenje 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. Opređenje zatrat udel'noj jenerгии 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. Opređenje 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 t'jagovogo usilija dlja mnogorezcovykh rabochih organov zemlerojnyh mashin [Deterministic mathematical model of the temporal distribution of traction for mnogorezcovykh working bodies of earthmoving machines]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2010; 11: 44-48. (in Russ.)

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

9. Vershinin A. V., Zubov V. S., Tjul'nev A.M. Povyshenie jeffektivnosti diskofrezemyh rabochih mehanizmov dlja razrabotki m'jorzyh gruntov [Improving the efficiency of the working mechanisms for the development of diskofrezemyh m'jorzyh soil]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2012; 8: 42-44. (in Russ.)

10. Balovnev V. I., Nguen Z. Sh. Opređenje 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.)

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

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

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

14. Sun X. ACT-timely experimental study on meso-scopic damage development of frozen soil under triaxial shearing. *Rock and Soil Mechanics*. 2005; 8: 150-163.

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

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

17. Balovnev V. I., Danilov R. G., Ulitich O. Ju. Issledovanie upravljajemyh nozhevyh sistem zemlerojno-transportnyh mashin [Study of guided knife systems

of ground-moving vehicles]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2017; 2: 12-15. (in Russ.)

18. 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.)

19. 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.)

20. Kabashev R. A., Turgumbaev S. D. Jeksperimental'nye issledovanija processa kopanija gruntov rotorno-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.)

21. 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.)

22. 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.)

23. Syromjatinikov Ju. N., Hramov I. S., Vojnash S. A. Gibkij jelement v sostave rabochih organov rotornoj 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.)

24. 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.)

25. 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.)

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

27. 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».

AUTHOR INFORMATION

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

УДК 661.878.62

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-500-513>

EDN: SKATGW

Научная статья



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОТВАЛА БУЛЬДОЗЕРА

Н. Т. Сурашов^{1*}, Р. Б. Асмагулаев², Д. Н. Толымбек³

¹Казахский университет путей сообщения,
г. Алматы, Казахстан

²ТОО «НИИПК Каздоринновация»,
г. Алматы, Казахстан

³Аруна-АИ,
г. Нур-Султан, Казахстан

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

ruslan_asmatulaev@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5531-6641>

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

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. В Казахстане в настоящее время осуществляется большой объем земляных работ, что приводит к увеличению востребованности землеройно-транспортных машин (ЗТМ), в частности бульдозеров разных типов. В различных отраслях промышленности и объектах строительства эксплуатируются и постоянно обновляется парк ЗТМ зарубежного производства, в том числе стран СНГ (Россия, Белоруссия, Украина и т.д.) в разных типоразмерах. Так, на строительных объектах, в том числе на строительстве автомобильных и железных дорог, широко эксплуатируются бульдозеры производства фирм: корпорация Caterpillar типа Cat (США), компания Liebherr (Германия), компания Xuanhua Construction machinery Co, Ltd (HBXG), ZoomLion и Shehwa (КНР); бульдозеры «ЧТЗ-УралТРАК» (Россия). Строительство автомобильных и железных дорог протяженностью несколько тысяч километров невозможно представить без участия универсального бульдозера. Одним из основных узлов бульдозера является рабочий орган.

Производительность и энергоемкость бульдозера во многом зависят от того, какой тип формы отвала на нем установлена. Емкость (максимальный объем призмы волочения грунта) – одна из основных характеристик, определяющая высоту и ширину отвала, причем большинство производителей предлагают надставки (козырьки), позволяющие увеличить высоту отвала.

Увеличение высоты отвала позволяет перемещать больше материала и уменьшает пересыпания через верхнюю часть отвала. С другой стороны, увеличение объема призмы волочения по ширине отвала устанавливают боковые щеки, которые придают отвалу форму ковша (трапецевидная). Они не дают перемещающемуся грунту высыпаться по бокам отвала (боковые валики), тем самым увеличивается объем данного материала. Однако чрезмерное увеличение емкости отвала потребует при работе дополнительных затрат мощности базового трактора, который вызывает увеличение нагрузки на узлы машины и ускоряет интенсивность их износа, особенно когда бульдозер перемещается вверх по уклону. Объем перемещаемого отвалом материала за один проход зависит от возможности изменения угла отвала относительно вертикальной и горизонтальной плоскостей. В современных конструкциях отвалов положение угла наклона регулируется четырьмя или шестью положениями, в зависимости от категорий разрабатываемого грунта.

Целью исследования является оптимизация геометрических параметров и установление трапецевидной формы отвала с учетом взаимодействия его лобовой поверхности с сформированным объемом максимальной призмы волочения грунта в статическом процессе работы бульдозера.

Материалы и методы. В качестве материалов применялись разрабатываемый грунт и отвал бульдозера, исследовался статический процесс их взаимодействия при максимальном формировании призмы волочения грунта перед отвалом с использованием методов исследования графоаналитическим и математическим способом вычисления.

Результаты. Графоаналитическим и математическим вычислением оптимизирован процесс взаимодействия отвала с грунтом, определены максимальные (предельно-допустимые) параметры отвала с учетом тягового усилия трактора и категории разрабатываемого грунта.

© Сурашов Н. Т., Асмагулаев Р. Б., Толымбек Д. Н., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Обсуждение и заключение. До настоящего времени геометрические формы перспективных конструкций отвала бульдозера устанавливали в основном опытно-экспериментальным путем, без учета контакта площади отвала с грунтом. Не разработаны методики определения рациональной формы отвала, тем более теоретически обоснованные оптимальные параметры рабочего органа, с учетом касания площади продольного сечения грунта с лобовой поверхностью отвала. Не разрабатывались методики определения оптимальных (адаптированных) форм и геометрических параметров рабочего органа, с учетом контакта лобовой поверхности отвала с максимальным объемом призмы волочения. Нами предложены методики расчета оптимальных параметров перспективной конструкции отвала, адаптированного разрабатываемому грунту:

- определены рациональные геометрические формы как в лобовом, так и в поперечном сечении отвала;
- представлены математические формулы для определения оптимальных параметров новой конструкции отвала, а именно: высота отвала и козырька; ширина отвала, козырька и дополнительного ножа-уширителя;
- определены: периметр отвала, ширина и высота бокового валика при формировании максимальной призмы волочения грунта перед отвалом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бульдозер, рабочий орган, отвал, козырек, ножи, призма волочения, угол резания, уширитель, связный грунт, лобовая поверхность отвала

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы благодарят Л. А. Хмару и Р. А. Кабашева за оказание ценных консультаций.

Статья поступила в редакцию 08.04.2022; одобрена после рецензирования 12.07.2022; принята к публикации 27.07.2022.

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., Асмагулаев Р. Б., Толымбек Д. Н. Определение оптимальных конструктивных параметров отвала бульдозера // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 4 (86). С. 500-513. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-500-513>

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-500-513>

EDN: CKATGW

Original article

BLADE OPTIMAL DESIGN PARAMETERS DETERMINATION

Nurgali T. Surashov^{1*}, Ruslan B. Asmatulaev², Damir N. Tolymbek³

¹Kazakh University of Railway Engineering,

²TOO Kazroadinnovatsia,

Almaty, Republic Kazakhstan,

³Aruna-AI, Nur-Sultan

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

ruslan_asmatulaev@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5531-6641>

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

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. In Kazakhstan in present time there is a large number of earthmoving works, which leads to an increase in the demand for earthmoving-transport machines (ETM), in particular bulldozers of different types. In various industries and construction projects, the fleet of foreign-made ETM is operated and constantly updated, including the CIS countries (Russia, Belarus, Ukraine, etc.) in various type-sizes. So at construction sites, including the construction of roads and railways, bulldozers are widely used: Caterpillar Corporation such as Cat (USA), Liebherr (Germany), Xuanhua Construction machinery Co, Ltd (HBXG) and ZoomLion and Shehwa (China); bulldozers ChTZ-UralTRAK (Russia), etc.

© Surashov N. T., Asmatulaev R. B., Tolymbek D. N., 2022



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

The construction of roads and railways with a length of several thousand kilometers is impossible to imagine without the participation of a universal bulldozer. One of the most important components of the bulldozer is the working organ (WO) of the bulldozer.

The performance of the bulldozer largely depends on what type of blade is installed on it. Capacity (maximum prism of drawing the soil) is one of the main characteristics determined by the height and width of the blade, and most manufacturers offer add-ons (visor) that makes it possible to increase the height of the blade.

Increasing the blade height allows more material to be moved and reduces spillage through the top of the blade. On the other hand, increasing the volume of the drawing prism along the width of the blade is offered by the side cheeks, giving the blade the shape of a bucket. They do not allow the moving soil to fall out on the sides of the blade (side rollers), thereby increasing the volume of material being moved. However, an excessive increase in blade capacity will require additional power costs of the bulldozer during operation, which will cause an increase in loads on the machine components and accelerate the intensity of their wear, especially when the bulldozer moves up the slope.

The volume of material moved by the blade in one pass depends, in addition, on the possibility of changing the angle of the blade relative to the vertical and horizontal plane. In modern blade designs, the positions of the angle of inclination are regulated by 4 or 6 positions, depending on the category of soil being developed.

The purpose of this study is to optimize the geometric parameters and establish the trapezoidal shape of the blade, taking into account the interaction of its frontal surface with the formed maximum prism of drawing the soil.

Materials and methods. As materials, the developed soil and the bulldozer blade were used, the process of their interaction was investigated with the maximum formation of the prism of drawing the soil before the dump, using the graphic-analytical method of research.

Results. The process of interaction of the blade with the soil has been optimized by graphic-analytical means, the maximum (maximum permissible) parameters of the blade have been determined, taking into account the traction factor of the bulldozer and the category of the soil being developed.

Discussion and conclusion. Until now, the geometric shapes of promising designs of the bulldozer blade were installed mainly by experimental means, without taking into account the contact of the blade area with the ground. Methods for determining the rational shape of the blade have not been developed, especially the theoretically grounded optimal parameters of the WO, taking into account the touch of the longitudinal section of the soil from the frontal surface of the blade. Methods for determining the optimal (adapted) shapes and geometric parameters of the WO were not developed, taking into account the contact of the frontal surface of the blade with the maximum drawing prism. Methods for calculating the optimal parameters of the perspective blade design adapted to the developed soil are proposed:

- rational geometric shapes of both the frontal and cross-section of the blade are determined;
- mathematical formulas for determining the optimal parameters of the new blade design are presented, namely: the height of the blade and the visor; width of the blade, visor and additional knife-extend;
- defined: the perimeter of the blade, the width and height of the side roller, when forming the maximum prism of drawing the soil in front of the blade.

KEYWORDS: bulldozer, working body, blade, visor, knives, drawing prism, cutting angle, extender, cohesive soil, frontal surface of the blade.

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors thank L. A. Khmar and R. A. Kabashev for offering valuable advice.

The article was submitted 08.04.2022; approved after reviewing 12.07.2022; accepted for publication 27.07.2022.

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., Asmatulaev R. B., Tolymbek D. N. Blade optimal design parameters determination of the optimal design parameters of the blade. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (4): 500-513. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-500-513>

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения долговечности дорог Министерством транспорта и коммуникаций Казахстана в 2016 г. принято решение о проектировании и строительстве автомобильных дорог международного значения под транспортную нагрузку не ниже 13 т на ось, с цементобетонными и асфальтобетонными щебеночно-мастичными покрытиями.

Выдвинутая первым Президентом РК «Стратегия развития Казахстана до 2050 года» – документ поистине глобального масштаба. В частности, в нем приведено строительство международной автомобильной дороги: «Западная Европа – Западный Китай», которая ежегодно будет приносить Казахстану 2 млрд тенге дохода. Одновременно введены в эксплуатацию такого же уровня автотрассы:

Астана – Усть-Каменогорск, Астана – Атырау – Актау, Алматы – Семей – Усть-Каменогорск, Алматы – Астана, Нур-Султан – Кокшетау – Талшын в сторону Омска¹.

Для выполнения этой Государственной программы и огромного объема строительных работ требуется большое количество парка строительно-дорожных машин. Одними из универсальных и широко распространенных строительных машин являются бульдозеры разных типов. Современные бульдозеры, оснащенные отвалами с комплексом режущих ножей и рыхлителями, широко применяются для выполнения земляных и планировочных работ, в частности, при строительстве автомобильных и железных дорог, аэродромов, плотин и так далее² [1, 2, 3, 4, 5].

Согласно исследованиям профессоров В. И. Баловнева и Л. А. Хмары, от объема грунта, перемещаемого отвалом за один рабочий цикл, зависит производительность и эффективность использования бульдозеров, при этом с увеличением объема призмы волочения грунта повышаются производительность и энергетические ресурсы бульдозера (рисунок 1) [1].

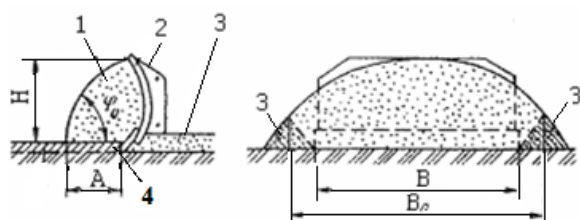


Рисунок 1 – Призма волочения грунта: 1 – призма; 2 – отвал; 3 – боковые валики; 4 – стружка [2]

Figure 1 – Soil dragging prism: 1 - prism; 2 - blade; 3 - side rollers; 4 - shavings [2]

При резании стружки (см. рисунок 1) грунт 4 собирается перед отвалом 2 в виде призмы волочения 1, которая наваливает на расстояние A. В процессе перемещения призмы волочения неизбежны потери в валике грунта 3 через боковые грани отвала. Чем больше призма волочения, тем выше производительность бульдозера. Для уменьшения продолжительности рабочего цикла важно повышать скорость вы-

полнения рабочих операций. Увеличение скорости холостого хода позволяет существенно уменьшить время цикла. Для увеличения объема призмы волочения и тем самым уменьшения потери грунта боковые валики используют следующие рациональные способы:

- движение по следу;
- траншейный способ;
- спаренный способ;
- при работе под уклон;
- на разных уровнях;
- с широкозахватным отвалом.

Каждые эти предложенные способы уменьшают потери грунта в боковые валики в зависимости от расстояния перемещения грунта [1, 2, 3].

В статье [4] приведены результаты и теоретические предпосылки увеличения производительности и накопительной способности неповоротных отвалов бульдозеров, при этом максимальная степень использования тягового усилия базового трактора подтверждена экспериментальным путем на физической модели.

С целью эффективности эксплуатации бульдозеров на обе боковые стороны установлены съемные открывки-уширители, которые позволяют увеличивать накопительную способность рабочего органа бульдозера с учетом тягового усилия трактора [4].

В результате комплексного эксперимента на физической модели была разработана конструкция боковых захватов для обеспечения работоспособности агрегата с максимальным набором объема призмы волочения. Учитывая требования по минимизации продольных параметров рабочего органа бульдозера, без существенного снижения его накопительной способности ими были рекомендованы длина верхней кромки $l=0,14-0,42$ м, а угол наклона передней кромки ножа $\varphi=40^\circ-50^\circ$ [1, 4].

Однако в данной статье не полностью определены геометрические параметры отвала, в том числе параметры максимальной призмы волочения перед отвалом.

В статье [5] в результате проведенных на стенде грунтового канала экспериментальных исследований по копанью связных грунтов под гидростатическим давлением модернизи-

¹ Послание первого Президента Республики Казахстан Н. А. Назарбаева народу Казахстана Стратегия «Казахстан–2050» // Казахстанская правда. № 101 от 28.12.2012 г.

² 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.

рованными плоскими отвалами установлено существенное снижение сопротивления копания по сравнению с копанием в тех же условиях традиционными плоскими отвалами. Экспериментальные исследования проведены на стенде физического моделирования для изучения процесса копания грунтов плоскими отвалами под гидростатическим давлением.

Однако в данной работе снижения энергоемкости копания грунтов достигли путем проникания в водную среду, жидкость попадает в контактирующие поверхности между лобовой поверхностью отвала и грунтовым пластом.

В статье Кабашева Р. А., Сурашова Н. Т., Гудовича М. И.³ дан анализ и оценка перспективных конструкций рабочих органов бульдозера. Из анализа конструкции рабочих органов ЗТМ отвального типа (всего 270 патентов и авторских свидетельств) были выбраны наиболее перспективные конструкции отвалов в зависимости от категории разрабатываемых грунтов и для дальнейшего проектирования, изготовления и их внедрения в производство.

В статье А. Ю. Красносова [6] описано математическое моделирование взаимосвязи параметров рабочего органа и энергоемкости копания грунта бульдозером. Определены традиционным методом: сопротивление копания, перемещение призмы волочения и трения ножа с грунтом. На основании этих сопротивлений определена потребная мощность базового трактора и установлена производительность бульдозера. В результате предложены формулы для определения энергоемкости копания грунта и получена математическая модель, устанавливающая взаимосвязь основных параметров навесного оборудования бульдозера с энергоемкостью копания грунта.

В данной статье [6] не учтены геометрические параметры отвала и его формы, а также не установлены параметры максимального объема перемещаемой призмы волочения и не учтены объемы потери боковых валиков.

В статье А. И. Демиденко и К. Ю. Гатыч [7] рассмотрена схема взаимодействия рабочего оборудования бульдозера с грунтом, позволяющая повысить производительность за счет захвата и транспортирования дополнитель-

ным отвалом сразу двух призм волочения. Изучен процесс взаимодействия дополнительного отвала бульдозера с ковшем, составлена расчетная схема и получены аналитические зависимости для определения сопротивления копания дополнительным отвалом. Получен график зависимости усилия на штоке гидроцилиндра при копании дополнительным отвалом от хода штока.

В статье [8] проф. А. М. Завьяловым, С. С. Черняком обоснована и тщательно исследована математическая модель процесса копания грунта бульдозера. Результаты приведены для различных категорий грунтов и оформлены в виде графиков при различных функциях изменения толщины стружки. Однако не учтены оптимальные параметры отвала и призмы волочения при моделировании процесса копания грунта бульдозера.

В работе [9] предложена методика расчета геометрических параметров призмы волочения на отвале бульдозера на основе создания виртуальной и графической модели с использованием компьютерных программ, разработан аналитический метод построения прямолинейной и криволинейной частей отвала и предложены методы расчетов элементов призмы волочения на различных стадиях копания.

В статье [10] изложены экспериментальные исследования на грунтовом канале, в результате которого получены численные значения сил сопротивления копания, сопоставление их с теоретическими исследованиями влияния параметров отвала на величины сил сопротивления копания. В результате анализа и сопоставления теоретических исследований с экспериментальными данными подтвердили, что наиболее существенное влияние на величину сил сопротивления копания оказывает величина радиуса криволинейной части отвала. Увеличение радиуса на 40% привело к снижению сил сопротивления копания и при максимальном наборе призмы волочения на 20÷30% в зависимости от категорий грунта [11].

Авторы⁴ [12] широко изучили процесс взаимодействия рабочего органа землеройно-транспортных машин отвального типа с различными грунтами и на основе аналити-

³ 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.

⁴ Щербаков В. С., Колякин В. И., Беляев В. В. Влияние геометрических параметров ЗТМ на процесс заглубления рабочего органа // Гидропривод и системы управления строительных и дорожных машин. Межвуз. сб. науч. тр. Омск.: ОмПИ, 1989. С. 58–61.

ческого исследования позволили сформулировать и доказать ряд теорем и следствий, отражающих общие закономерности формирования оптимальных геометрических параметров отвала землеройно-транспортных машин. Ими были установлены закономерности структурных особенностей землеройно-транспортных машин с учетом неровностей поверхностей грунтов, также другими авторами⁵ [13, 14, 15] рассмотрены вопросы развития конструктивных особенностей рабочих органов бульдозера и действующие нагрузки на них при разработке различных категорий грунтов.

Одним из факторов для увеличения производительности и эффективного использования тяговой способности трактора с бульдозерным оборудованием, по данным Д. И. Федорова, является возможность предельно допустимого формирования максимального объема призмы волочения и их перемещения, которые зависят от величины площади лобовой поверхности отвала [3]. В связи с этим в данной статье приведены теоретические исследования определения оптимальных геометрических размеров лобовой и поперечной поверхностей отвала. К общим требованиям землеройно-транспортных машин отвального типа относится обеспечение заданной производительности при известных физико-механических свойствах разрабатываемого грунта, от которых, в свою очередь, зависит форма и геометрические параметры отвала.

Зарубежными учеными Jaroslaw Selesh и Dariusz Ulbrich (Польша) [16] и Y.Franco, D. Rubenstein, I. Shmulevich (США) [17] изучены процессы взаимодействия рабочих органов землеройно-транспортных машин отвального типа с абразивными грунтами. Даны рекомендации по процессу работы бульдозера с грунтами абразивного вида с автоматизированным пультом управления. Корейскими учеными Sang-Ho Kim и Yong-Seok Lee [18] изучены процессы взаимодействия рабочих органов бульдозера с различными категориями грунтов, в том числе грунтами с твердыми включениями. Расположения рабочих органов регулируются сенсорными устройствами в зависимости от нагрузки, возникающей в узлах отвала бульдозера.

Анализ отечественных и зарубежных источников показал, что широко исследованы процессы взаимодействия рабочих органов бульдозера с грунтом разного типа, при этом за основу принималась стандартная геометрическая форма отвала.

Цель данной работы – графоаналитическим путем определить основные параметры взаимодействия рабочих органов бульдозера с грунтом (при наборе максимального объема призмы волочения), на основе которого сконструирована новая конструкция отвала, увеличивающая производительность бульдозера на 10–15%, уменьшающая металлоемкость и энергоемкость бульдозера.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основном в Южном регионе Казахстана часто встречаются связные, плотные грунты и грунты с каменистыми включениями. Для дальнейшего исследования при разработке грунтов бульдозерами принимались связные грунты, относящиеся ко 2-й и 3-й категории грунтов⁶ [2].

Конструктивными основными параметрами стандартного отвала являются (рисунок 2): B и H – соответственно ширина и высота отвала, м; H_k – высота козырька, м; R – радиус кривизны отвала, м; l – длина дуги отвала, м; φ – центральный угол кривизны отвала, град.; v – расстояние от основания отвала до точки контакта по высоте с грунтом, (высота валика) м; P – периметр контура взаимодействия перемещаемого грунта с отвалом, м; C – высота части призмы волочения, возвышающаяся над козырьком, м; a' – ширина бокового валика (просыпания грунта), м.

Основными эксплуатационными параметрами являются: v_p – скорость перемещения с грунтом бульдозерного отвала, км/ч; ρ – угол внутреннего трения грунта в покое, град.; ε – угол наклона отвала, град.; P_{Σ} – эксплуатационная производительность бульдозера, м³/ч [1, 3].

Для повышения эффективности использования бульдозерных отвалов, а также для увеличения как технической, так и эксплуатационной производительности, умень-

⁵ Щербakov В. С. Теория точности землеройно-транспортных машин, выполняющих планировочные работы // Автомобильные дороги Сибири: Тез. докл. II Международн. конф. Омск, 1998, С. 248–251.

⁶ 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.

шения металлоемкости и энергоемкости бульдозеров следует рассмотреть в начале отвалы различных конструктивных форм с учетом набора максимальной призмы волочения и затем определить их оптимальные конструктивные параметры на основе рациональной формы отвала бульдозера (рисунок 3).

Как известно, находящиеся в настоящее время в эксплуатации отвалы бульдозеров по своей конструктивной форме не отвечают современным требованиям с точки зрения эффективности использования их по площади взаимодействия с перемещаемым грунтом, что в свою очередь ведет к увеличению металлоемкости и энергоемкости бульдозеров.

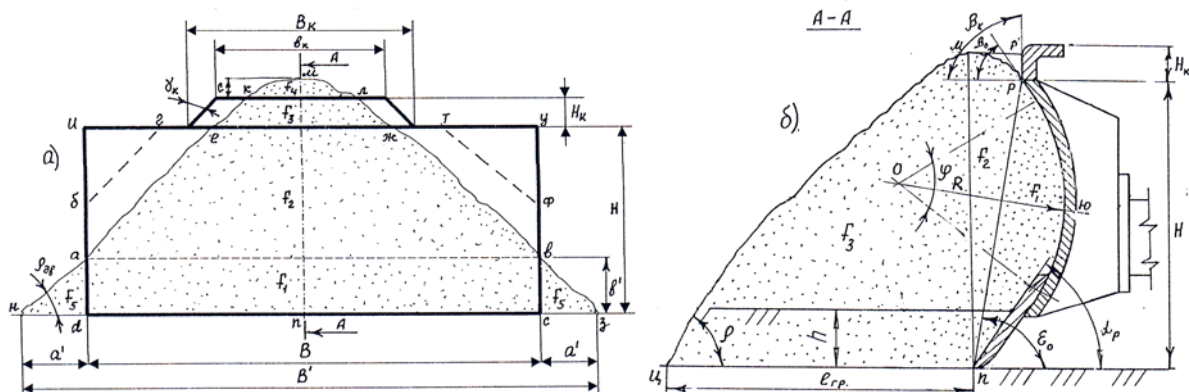


Рисунок 2 – Схема взаимодействия отвала с грунтом при максимальном объеме призмы волочения:
а – схема взаимодействия лобовой поверхности отвала с максимальным объемом призмы волочения грунта;
б – поперечное сечение отвала и призмы волочения
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Scheme of interaction of the blade with the ground at the maximum prism of drawing
a) scheme of interaction of the frontal surface of the blade with the prism of drawing;
b) blade cross-section and drawing prisms
Source: compiled by the authors.

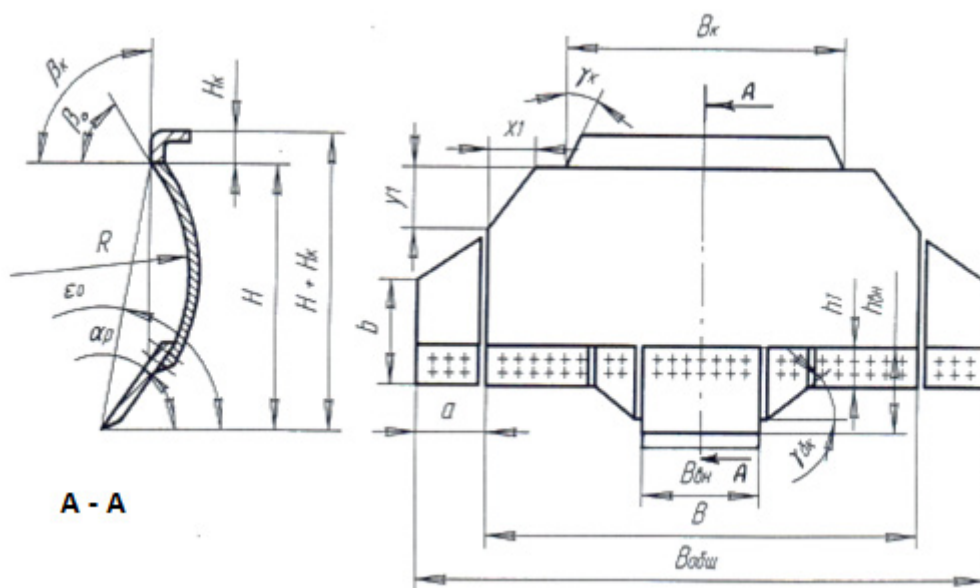


Рисунок 3 – Предлагаемая конструкция отвала бульдозера (Патент KZ № 13578)
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – The proposed design of the dozer blade (Patent KZ №13578)
Source: compiled by the authors.

Анализ процесса взаимодействия бульдозерного рабочего органа с грунтом различной категории позволил нам разработать принципиально новую конструкцию отвала с верхними боковыми скосами и ножами-уширителями [19], что обусловило сохранение максимального объема призмы волочения при ее транспортировке (патенты KZ №13578 от 14.08.2003 г.; № 13576 от 14.08.2003 г.; № 15852 от 04.04.2005 г. – автор Н. Т. Сурашов).

Конструктивные основные параметры новых конструкций отвалов следует определять с учетом угла естественного откоса ρ и периметра P , по которому перемещаемый грунт касается с отвалом.

Площадь поперечного сечения грунта, взаимодействующего с отвалом, (см. рисунок 2) определяется из суммы

$$F_{об} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5, \quad (1)$$

где F_1 – площадь прямоугольника $abcd$; F_2 – площадь трапеции $авже$; F_3 – площадь трапеции $ежлк$; F_4 – площадь сегмента $клм$; F_5 – площадь треугольников (боковые валики): adh и $всз$.

Площадь прямоугольника $abcd$ можно определить по формуле

$$F_1 = B \cdot \epsilon'. \quad (2)$$

Площадь трапеции $авже$ следует определять по выражению

$$F_2 = \frac{1}{2} \left[B + \left(B - 2 \frac{(H - \epsilon')}{\operatorname{tg} \rho} \right) \right] \cdot (H - \epsilon') = B(H - \epsilon') - \frac{(H - \epsilon')^2}{\operatorname{tg} \rho}. \quad (3)$$

Площадь трапеции $ежлк$ определяем из выражения

$$F_3 = \frac{1}{2} \left[2B - 4 \frac{(H - \epsilon')}{\operatorname{tg} \rho} \right] - 2 \frac{H_k}{\operatorname{tg} \rho} \cdot H_k = B \cdot H_k - 2 \frac{(H - \epsilon') \cdot H_k}{\operatorname{tg} \rho} - \frac{H_k^2}{\operatorname{tg} \rho}. \quad (4)$$

Площадь сегмента $клм$ равна

$$\begin{aligned} F_4 &= \frac{1}{2} \left[B - 2 \frac{(H - \epsilon')}{\operatorname{tg} \rho} - \frac{1}{2} \cdot \frac{H_k}{\operatorname{tg} \rho} \right] \cdot \frac{1}{2} \left[B - 2 \frac{(H - \epsilon')}{\operatorname{tg} \rho} - 2 \frac{H_k}{\operatorname{tg} \rho} \right] \cdot \operatorname{tg} \rho = \\ &= \frac{1}{4} \left[B - 2 \frac{(H - \epsilon')}{\operatorname{tg} \rho} - 2 \frac{H_k}{\operatorname{tg} \rho} \right]^2 \cdot \operatorname{tg} \rho. \end{aligned} \quad (5)$$

Площадь треугольников adh и $всз$ можно определить по следующей зависимости ($\Delta_{adh} = \Delta_{всз}$):

$$F_5 = 2 \cdot \frac{1}{2} a' \epsilon' = \frac{(\epsilon')^2}{\operatorname{tg} \rho}. \quad (6)$$

Суммируя все площади (формулы (2)...(6)), определим площадь лобового сечения перемещаемого грунта, взаимодействующего с лобовой поверхностью отвала:

$$\begin{aligned} F_{об} &= 0,25B^2 \cdot \operatorname{tg} \rho + B \cdot \epsilon' - \frac{(H^2 - 2H \cdot \epsilon' + 2H \cdot H_k + 2\epsilon' H_k + H_k^2)}{\operatorname{tg} \rho} + \\ &+ H^2 - 2H\epsilon' + 2H \cdot H_k + 2\epsilon' H_k + (\epsilon')^2 + H_k^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Данное выражение представляет собой функцию площади лобового сечения перемещаемого грунта, взаимодействующего с поверхностью отвала в зависимости от конструктивных параметров бульдозерного отвала (B , H , H_k , ϵ' , a'). Полагая в каждом конкретном случае постоянной вы-

соту отвала и угол естественного откоса, найдем оптимальные значения конструктивных параметров: расстояние от основания отвала до точки контакта по высоте с грунтом, ϵ' .

Для этого продифференцируем правую часть выражения (7) по ϵ' :

$$\frac{\partial F_{об}}{\partial \epsilon'} = B + \frac{2H}{\operatorname{tg} \rho} - \frac{2H_k}{\operatorname{tg} \rho} - 2H - 2H_k + 2\epsilon'. \quad (8)$$

Приравнявая производную нулю и производя соответствующие преобразования, получим уравнение

$$B + \frac{2H}{\operatorname{tg} \rho} - \frac{2H_k}{\operatorname{tg} \rho} - 2H - 2H_k + 2\epsilon' = 0, \quad (9)$$

которое выражает оптимальные значения ϵ' для конкретных значений B, H и H_k и, решая ее относительно ϵ' , получим

$$\epsilon'_{опт} = H + H_k + \frac{H_k - H}{\operatorname{tg} \rho} - \frac{B}{2}. \quad (10)$$

Определяем высоту отвала, H . Для этого продифференцируем правую часть выражения (7) по H :

$$\frac{\partial F_{об}}{\partial H} = -\frac{2H}{\operatorname{tg} \rho} + \frac{2\epsilon'}{\operatorname{tg} \rho} - \frac{2H_k}{\operatorname{tg} \rho} + 2H - 2\epsilon' + 2H_k. \quad (11)$$

Приравнявая производную нулю и производя соответствующие преобразования, получим уравнение

$$-\frac{2H}{\operatorname{tg} \rho} + \frac{2\epsilon'}{\operatorname{tg} \rho} - \frac{2H_k}{\operatorname{tg} \rho} + 2H - 2\epsilon' + 2H_k = 0, \quad (12)$$

которое выражает оптимальные значения высоты отвала H для конкретных значений H_k, ϵ' и, решая ее относительно H , получим

$$H_{опт} = \frac{H_k - H_k \operatorname{tg} \rho - \epsilon' + \epsilon' \operatorname{tg} \rho}{\operatorname{tg} \rho - 1}. \quad (13)$$

Определяем высоту козырька отвала, H_k . Для этого продифференцируем правую часть выражения (7) по H_k :

$$\frac{\partial F}{\partial H_k} = -\frac{2H}{\operatorname{tg} \rho} + \frac{2\epsilon'}{\operatorname{tg} \rho} - \frac{1}{\operatorname{tg} \rho} + 2H - 2\epsilon' + 2H_k. \quad (14)$$

Приравнявая производную к нулю и производя соответствующие преобразования, получим уравнение

$$-\frac{2H}{\operatorname{tg} \rho} + \frac{2\epsilon'}{\operatorname{tg} \rho} - \frac{1}{\operatorname{tg} \rho} + 2H - 2\epsilon' + 2H_k = 0, \quad (15)$$

которое выражает оптимальные значения высоты козырька отвала H_k для конкретных значений H, ϵ' и, решая ее относительно H_k , получим

$$H_{k_{опт}} = \frac{H(1 - \operatorname{tg} \rho) + 0,5 + \epsilon'(1 + \operatorname{tg} \rho)}{\operatorname{tg} \rho}. \quad (16)$$

Определяем ширину отвала, B . Для этого продифференцируем правую часть выражения (7) по B :

$$\frac{\partial F}{\partial B} = 0,5B \cdot \operatorname{tg} \rho - \epsilon'. \quad (17)$$

Приравнявая производную к нулю и производя соответствующие преобразования, получим уравнение

$$0,5B \cdot \operatorname{tg} \rho - \epsilon' = 0, \quad (18)$$

которое выражает оптимальные значения ширины отвала B для конкретных значений ϵ' и, решая относительно B , получим

$$B_{опт} = \frac{\epsilon'}{0,5 \operatorname{tg} \rho} = \frac{2\epsilon'}{\operatorname{tg} \rho}. \quad (19)$$

Оптимальные значения ширины отвала B можно определить и через оптимальные значения угла естественного откоса ρ :

$$\frac{\partial F_{об}}{\partial \rho} = 0,25B^2 \frac{1}{\cos^2 \rho} + \frac{1}{\sin^2 \rho} (H^2 - 2H\epsilon' + 2H \cdot H_{\kappa} + 2\epsilon' H_{\kappa} + H_{\kappa}). \quad (20)$$

Приравнявая производную к нулю и произведя соответствующие преобразования, получим выражение

$$0,25B^2 \frac{1}{\cos^2 \rho} + \frac{1}{\sin^2 \rho} (H^2 - 2H\epsilon' + 2H \cdot H_{\kappa} + 2\epsilon' H_{\kappa} + H_{\kappa}) = 0, \quad (21)$$

которое выражает оптимальные значения ρ для конкретных значений B , H , ϵ' , H_{κ} или оптимальные значения B для конкретных значений H , H_{κ} , ϵ' , ρ и, решая относительно ρ или B , получим

$$\rho = \arcsin \sqrt{\frac{H^2 - 2H\epsilon' + 2H \cdot H_{\kappa} + 2\epsilon' H_{\kappa} + H_{\kappa}}{H^2 - 2H\epsilon' + 2H \cdot H_{\kappa} + 2\epsilon' H_{\kappa} + H_{\kappa} - 0,25B^2}}, \quad (22)$$

или

$$B_{опт} = \sqrt{\frac{(\sin^2 \rho - 1)(H^2 - 2H\epsilon' + 2H \cdot H_{\kappa} + 2\epsilon' H_{\kappa} + H_{\kappa})}{0,25 \sin^2 \rho}}. \quad (23)$$

Для определения оптимальных значений ширины козырька отвала B_{κ} следует выразить площадь лобовой поверхности грунта, взаимодействующего с отвалом, через данный конструктивный параметр, то есть

$$F_{общ} = \frac{1}{2} B\epsilon' + \frac{1}{2} BH + \frac{1}{2} B_{\kappa} H - \frac{1}{2} B_{\kappa} \epsilon' - \frac{1}{2} B_{\kappa} \epsilon' - \frac{H_{\kappa}^2}{\operatorname{tg} \rho} + 0,25B_{\kappa}^2 \operatorname{tg} \rho + H_{\kappa}^2 + \frac{(\epsilon')^2}{\operatorname{tg} \rho}. \quad (24)$$

Дифференцируем правую часть выражения (24) по B_{κ} :

$$\frac{\partial F}{\partial B_{\kappa}} = \frac{1}{2} (-H + \epsilon' + B_{\kappa} \operatorname{tg} \rho). \quad (25)$$

Приравнявая производную к нулю и произведя соответствующие преобразования, получим выражение

$$\frac{1}{2} (-H + \epsilon' + B_{\kappa} \operatorname{tg} \rho) = 0, \quad (26)$$

которое выражает оптимальные значения B_{κ} для конкретных значений H и ϵ' , и, решая относительно B_{κ} , получим

$$B_{\kappa} = \frac{2}{\operatorname{tg} \rho} (H - \epsilon') = \frac{2}{\operatorname{tg} \rho} (H - \epsilon'), \quad B_{\kappa_{опт}} = \frac{2}{\operatorname{tg} \rho} (H - \epsilon'). \quad (27)$$

Оптимальные значения периметра P отвала через оптимальные значения конструктивных параметров можно выразить следующим образом:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{опт}} = & \sqrt{\frac{(\sin^2 \rho - 1)(H^2 - 2H\epsilon' + 2H \cdot H_{\kappa} + 2\epsilon' H_{\kappa} + H_{\kappa})}{0,25 \sin^2 \rho}} + \\
 & + \frac{2tg\rho(H + H_{\kappa}) + 2(H_{\kappa} - H) - B_{tg\rho}}{tg\rho} + \\
 & + \frac{tg^2 \rho(2\epsilon' - 2H - 4H_{\kappa} + B) - tg\rho(2\epsilon' + 2B - 2H_{\kappa} - 4H) - 2(H_{\kappa} + H)}{2(tg\rho - 1)tg\rho \cdot \sin \rho} + \\
 & + \frac{2Btg\rho - 2(H - \epsilon') + H_{\kappa} - 1}{tg\rho}.
 \end{aligned} \quad (28)$$

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конструктивные оптимальные параметры новых конструкций отвалов, определенные исследованием площади поперечного сечения грунта, взаимодействующего с РО, можно представить следующим образом:

1. Высота отвала, $H_{\text{опт}}$:

$$H_{\text{опт}} = \frac{(H_{\kappa} - \epsilon') \cdot (1 - tg\rho)}{tg\rho - 1}. \quad (29)$$

2. Высота козырька, H_{κ} :

$$H_{\kappa \text{ опт}} = \frac{H(1 - tg\rho) + 0,5 + \epsilon' \cdot (1 + tg\rho)}{tg\rho}. \quad (30)$$

3. Ширина отвала, B :

$$B_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{(\sin^2 \rho - 1)(H^2 - 2H\epsilon' + 2H \cdot H_{\kappa} + 2\epsilon' H_{\kappa} + H_{\kappa})}{0,25 \sin^2 \rho}}. \quad (31)$$

4. Расстояние от основания отвала до точки контакта по высоте с грунтом, ϵ' :

$$\epsilon'_{\text{опт}} = H + H_{\kappa} + \frac{H_{\kappa} - H}{tg\rho} - 0,5B. \quad (32)$$

5. Ширина козырька отвала, B_{κ} :

$$B_{\kappa \text{ опт}} = \frac{2Btg\rho - 2(H - \epsilon') + H_{\kappa} - 1}{tg\rho}. \quad (33)$$

6. Периметр отвала, P :

$$P = \sqrt{\frac{(\sin^2 \rho - 1)(H^2 - 2H\epsilon' + 2H \cdot H_{\kappa} + 2\epsilon' H_{\kappa} + H_{\kappa})}{0,25 \sin^2 \rho}} + \\ + \frac{2tg\rho(H + H_{\kappa}) + 2(H_{\kappa} - H) - B_{tg\rho}}{tg\rho} + \\ + \frac{tg^2 \rho (2\epsilon' - 2H - 4H_{\kappa} + B) - tg\rho (2\epsilon' + 2B - 2H_{\kappa} - 4H) - 2(H_{\kappa} + H)}{2(tg\rho - 1)tg\rho \cdot \sin \rho} + \\ + \frac{2Btg\rho - 2(H - \epsilon') + H_{\kappa} - 1}{tg\rho}. \quad (34)$$

7. Дополнительная ширина ножа-уширителя, α :

$$a = 0,6 \cdot a' = 0,6 \cdot \epsilon' \cdot tg\rho \cdot k_{\epsilon\epsilon}, \quad (35)$$

где $a' = \epsilon' \cdot tg\rho$ – ширина бокового валика грунта, м; $k_{\epsilon\epsilon}$ – коэффициент ширины ножа-уширителя; принимаем конструктивно: $k_{\epsilon\epsilon} = 0,4$ – для связных грунтов; $k_{\epsilon\epsilon} = 0,6$ – для несвязных грунтов; тогда высота дополнительного ножа-уширителя будет равна

$$\epsilon = \epsilon' \cdot k'_{\epsilon\kappa}, \quad (36)$$

где $k'_{\epsilon\kappa}$ – коэффициент высоты ножа-уширителя (принимаем конструктивно);

$k'_{\epsilon\kappa} = 1,2$ – для связных грунтов; $k'_{\epsilon\kappa} = 1,3$ – для несвязных грунтов [1, 4].

1. На основе аналитического метода был установлен процесс взаимодействия бульдозерного РО со средой, получены принципиально новые конструкции отвала с боковыми скосами и ножами-уширителями, что обуславливает сохранение максимального объема призмы волочения при ее транспортировке, например, при разработке сыпучих и рыхлых грунтов, достигнув тем самым адаптацию лобовой формы отвала к форме перемещаемой призмы волочения.

2. Для сформированных бульдозерных отвалов, имеющих комбинаторное сочетание формы отвала, режущих ножей и ножей-уширителей, представлены расчетные формулы для выбора и определения их рациональных параметров.

3. Аналитические исследования образования призмы волочения перед отвалом позволили разработать различные конструкции отвалов, оснащенных выступающими сред-

ними ножами (ВСН), боковые косынки (БК) и с боковыми уширителями, что позволяет увеличивать производительность бульдозера на 7...10%.

4. В результате проведенных графоаналитических расчетов определены оптимальные геометрические параметры конструкции отвала: высота отвала и козырька; ширина отвала, козырька и дополнительного ножа-уширителя, радиус кривизны лобовой поверхности отвала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Баловнев В. И., Хмара Л. А. Интенсификация разработки грунтов в дорожном строительстве. М.: Транспорт, 1993. 384 с.
2. Кабашев Р. А. Дорожные и строительные машины: абразивный износ рабочих органов землеройных машин. Алматы: Фалым, 1997. 434 с.
3. Федоров Д. И. Рабочие органы землеройных машин. М.: Машиностроение, 1977. 288 с.
4. Хмара Л. А. Басий В. В., Деревянчук М. И., Максьюк Ю. А. Исследование накопительной способности отвала бульдозера с боковыми ограничивающими элементами // Вестник Харьковского национального автомобильного дорожного университета. № 2. 2005. Харьков: ХНАДУ. С. 80–84.
5. Тургумбаев С. Дж., Кабашев Р. А. Результаты экспериментальных исследований процесса копания грунтов модернизированным рабочим органом под гидростатическим давлением // Вестник СибАДИ. № 2 (54). 2017. Омск: СибАДИ. 2017. С. 36–42.
6. Краснонос А. Ю. Математическое моделирование взаимосвязи параметров рабочего оборудования и энергоёмкости копания грунта // Engineering & Technologies. 2014. № 6. Красноярск: СибФУ. 2014. С. 585–686.

7. Демиденко А. И., Гатыч К. Ю. Расчет усилий копания рабочим оборудованием бульдозера // Вестник СибАДИ, выпуск 2 (54). 2017. Омск: СибАДИ. 2017. С.17–22.

8. Завьялов А. М., Черняк С. С. Проектирование оптимальных режимов заглубления режущего инструмента бульдозера в грунт // Вестник СибАДИ. 2009. № 1 (11). 2009. С.53–60.

9. Берестов Е. И., Лесковец И. В. Методика расчета геометрических параметров призмы волочения на отвале бульдозера // Вестник Белорусско-Российского университета. 2009. № 2 (23). С.6–13.

10. Лесковец И. В. Берестов Е. И., Смоляр А. П. Влияние параметров профиля отвала бульдозера на величины сил сопротивления копания // Вестник Белорусско-Российского университета. 2015. № 2 (47). С.12–22.

11. Лесковец И. В. История и перспективы развития землеройного оборудования отвального типа // Вестник Белорусско-Российского университета. 2011. № 3 (32). С. 64–70.

12. Щербakov В. С., Галдин В. Н. Основные показатели гидравлических импульсных систем строительных машин // Вестник СибАДИ. 2013. № 1(29). С.47–51.

13. Kayim T. T., Golubeva T. V., Kaiymov S. T. Mathematical and computer modeling of movement of the execute mechanism of the adaptive multipurpose operating part of earth –moving and construction machine // International journal of electrical, electronics and data Communication, ISSN: 2320-2084 Volume-3, Issue-11, Nov.-2015. Page 25-28.

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

15. Хмара Л. А., Спильник М. А. Повышение эффективности рабочего процесса ковша скрепера (копание и выгрузка грунта) // Вестник СибАДИ. 2013. № 5 (33). 2013. С.30–39.

16. Jarosław Selech, Dariusz Ulbrich. Working design of a bulldozer blade as additional equipment of a compaction drum roller // Poznan University of Technology, Institute of Machines and Motor Vehicles, 60-965 / Marii Skłodowskiej-Curie sq. 5. Poland. Poznan, 2019.

17. Franco Y., Rubinstein D., Shmulevich I. Prediction of soil-bulldozer blade interaction using discrete element method // American society of agricultural and biological engineers. WorldScientific.-Michigan.www.asabe.org, 2012.

18. Sang-Ho Kim, Yong-Seok Lee. Development of bulldozer sensor system for estimating the position of blade cutting edge // Automation in construction. Seoul, volume 106, October 2019.

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

REFERENCES

1. Balovnev V. I., Hmara L. A. *Intensifikacija razrabotki gruntov v dorozhnom stroitel'stve* [Intensification of soil development in road construction]. Moscow: Transport, 1993. 384 p. (in Russ.)

2. Kabashev R. A. *Dorozhnye i stroitel'nye mashiny: abrazivnyj iznos rabochih organov zemlerojnyh mashin* [Road and construction machines: abrasive wear of working bodies of earthmoving machines]. Almaty: Falym, 1997. 434 p. (in Russ.)

3. Fedorov D. I. *Rabochie organy zemlerojnyh mashin* [Working bodies of earthmoving machines]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1977. 288 p. (in Russ.)

4. Hmara L. A. Basij V. V., Derevjanchuk M. I., Maksjuk Ju. A. Issledovanie nakopitel'noj sposobnosti otvala bul'dozera s bokovymi ogranichivajushimi jelementami [Study of the accumulative ability of the blade of a bulldozer with lateral limiting elements]. *Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'nogo dorozhnogo universiteta*. 2005; 2: 80–84. (in Russ.)

5. Turgumbaev S. Dzh., Kabashev R. A. Rezul'taty jeksperimental'nyh issledovanij processa kopanija gruntov modernizirovannym rabochim organom pod gidrostaticheskim davleniem [Results of experimental studies of the process of digging soils by a modernized working body under hydrostatic pressure]. *Vestnik SibADI*. 2017; 2 (54): 36–42. (in Russ.)

6. Krasnonosov A. Ju. Matematicheskoe modelirovanie vzaimosvjazi parametrov rabochego oborudovaniya i jenergoemkosti kopanija grunta [Mathematical modeling of the relationship between the parameters of working equipment and the energy intensity of digging]. *Engineering & Technologies*. 2014; 6: 585–686. (in Russ.)

7. Demidenko A. I., Gatyč K. Ju. Raschet usilij kopanija rabochim oborudovaniem bul'dozera [Calculation of the efforts of digging with the working equipment of the bulldozer]. *Vestnik SibADI*. 2017. 2 (54). 2017: 17–22. (in Russ.)

8. Zav'jalov A. M., Chernjak S. S. Proektirovanie optimal'nyh rezhimov zaglublenija rezhushhego instrumenta bul'dozera v grunt [Designing optimal modes of deepening the cutting tool of a bulldozer into the ground]. *Vestnik SibADI*. 2009; 1 (11). 2009: 53–60. (in Russ.)

9. Berestov E. I., Leskovec I. V. Metodika rascheta geometricheskikh parametrov prizmy volocheniya na otvale bul'dozera [Methods of calculation of geometric parameters of the prism of drawing on the dump of a bulldozer]. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta*. 2009; 2 (23): 6–13. (in Russ.)

10. Leskovec I. V. Berestov E. I., Smoljar A. P. Vlijanie parametrov profilja otvala bul'dozera na velichiny sil soprotivleniju kopanija [Influence of the parameters of the profile of the blade of the bulldozer on the magnitude of the forces of resistance to the digging]. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta*. 2015; 2 (47): 12–22. (in Russ.)

11. Leskovec I. V. Istoriya i perspektivy razvitiya zemlerojnogo oborudovaniya otval'nogo tipa [History and prospects for the development of earth-moving

equipment of the dumping type]. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta*. 2011; 3 (32): 64–70. (in Russ.)

12. Shherbakov V. S., Galdin V. N. Osnovnye pokazateli gidravlicheskih impul'snyh sistem stroitel'nyh mashin [The influence of the geometrical parameters of the ETM on the process of deepening the working body]. *Vestnik SibADI*. 2013; 1(29): 47–51. (in Russ.)

13. Kayim T. T., Golubeva T. V., Kaiymov S. T. Mathematical and computer modeling of movement of the execute mechanism of the adaptive multipurpose operating part of earth –moving and construction machine. *International journal of electrical, electronics and data Communication*, ISSN: 2320-2084 Volume-3, Issue-11, Nov. 2015: 25-28.

14. Surashov N. T. *Nauchnye osnovy sozdaniya perspektivnyh rabochih organov zemlerojno-transportnyh mashin* [Scientific foundations of the creation of promising working bodies of earth-moving machines]. Almaty: KazGASA. 2004. 263 p.

15. Hmara L. A., Spil'nik M. A. Povyshenie jeffektivnosti rabochego processa kovsha skrepera (kopanie i vygruzka grunta) [Improving the efficiency of the working process of the scraper bucket (digging and unloading the soil)]. *Vestnik SibADI*. 2013; 5 (33). 2013: 30–39. (in Russ.)

16. Jarosław Selech, Dariusz Ulbrich. *Working design of a bulldozer blade as additional equipment of a compaction drum roller*. Poznan University of Technology, Institute of Machines and Motor Vehicles, 60-965 / Marii Skłodowskiej-Curie sq. 5. Poland. Poznan, 2019.

17. Franco Y., Rubinstein D., Shmulevich I. Prediction of soil-bulldozer blade interaction using discrete element method. *American society of agricultural and biological engineers*. WorldScientific.-Michigan.www.asabe.org, 2012.

18. Sang-Ho Kim, Yong-Seok Lee. Development of bulldozer sensor system for estimating the position of blade cutting edge. *Automation in construction*. Seoul, volume 106, October 2019.

19. 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>

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Сурашов Н. Т. Формулировка направления, темы исследования и научной гипотезы. Формулирование проблемы исследования. Разработка теоретических исследований, выбор методологии и методов исследований (40%).

Асмагулаев Р. Б. Обзор результатов предыдущих исследований. Постановка задач исследования. Обозначение аналитических исследований (30%).

Толымбек Д. Н. Проверка теоретических предположений, анализ результатов исследования, редактирования, формирование выводов. Рецензирование результатов, корреспонденция данных с иностранными авторами (30%).

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Nurgali T. Surashov. Formulation of the direction, research topic, scientific hypothesis. Formulation of the research problem. Development of the theoretical studies, selection of methodology and methods of research (40%).

Ruslan B. Asmatulaev. A review of the previous research findings. Statement of the research objectives. Designation of the analyses (30%).

Damir N. Tolymbek. Verification of the theoretical assumptions, analysis of the research results, editing, formation of the conclusions. Review of the results, correspondence of the data with foreign authors (30%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Асмагулаев Руслан Борисович – канд. техн. наук, акад., директор.

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Ruslan B. Asmatulaev – Cand. of Sci., Director.

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

УДК 629.1.02

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-514-521>

EDN: CQLDDL

Научная статья



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕУПРАВЛЯЕМОГО СДВИГА БУЛЬДОЗЕРА

И. П. Трояновская^{1,2}, А. О. Жаков¹*¹Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия²Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Троицк, Россия*tripav63@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2763-0515>**andrey.zhakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4403-0776>***ответственный автор*

АННОТАЦИЯ

Введение. При выполнении технологического цикла внешние силы со стороны рабочего органа строительно-дорожной машины иногда приводят к неконтролируемому ее отклонению от заданной траектории. При этом существует явная зависимость величины сдвигающей силы от ее направления. Целью экспериментальных исследований являлось получение значений предельной сдвигающей силы при различных ее направлениях.

Материалы и методы. Испытания проводились на примере гусеничного бульдозера класса 10 т производства Челябинского тракторного завода. Сдвиг осуществлялся за счет действия внешней силы, приложенной к краю отвала в различных направлениях. Внешняя сила записывалась на осциллограмму.

Результаты. Сдвиг начинался при внешнем усилии, равном пределу сцепления при условии, когда линия действия внешней силы проходила через центр давления. При отклонении линии действия внешней силы от центра давления сдвиг начинался при значительно меньших значениях внешнего усилия. В результате эксперимента был построен годограф предельной сдвигающей силы.

Заключение. Экспериментально получено, что характер изменения внешнего усилия при поступательном и вращательном сдвиге принципиально отличались. Подтверждено, что чем больше направление сдвигающей силы отклоняется от центра давлений машины, тем меньшее значение внешней силы способно привести к неуправляемому сдвигу.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: неуправляемый сдвиг, экспериментальные исследования, предельная сдвигающая сила, бульдозерный агрегат.

Статья поступила в редакцию 13.06.2022; одобрена после рецензирования 22.06.2022; принята к публикации 27.07.2022.

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: Трояновская И. П., Жаков А. О. Экспериментальные исследования неуправляемого сдвига бульдозера // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 4 (86). С. 514-521. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-514-521>

© Трояновская И. П., Жаков А. О., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-514-521>

EDN: CQLDDL

Original article

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE UNCONTROLLED SHIFT OF THE BULLDOZER

Irina P. Troyanovskaya^{1, 2*}, Andrey O. Zhakov¹

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

²South Ural State Agrarian University, Troitsk, Russia

tripav63@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2763-0515>

andrey.zhakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4403-0776>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. External forces from the working body of a road-building machine sometimes lead to its uncontrolled deviation from a given trajectory when performing a technological cycle. In this case, there is a clear dependence of the magnitude of the shift force on its direction. The purpose of experimental studies was to determine the values of the limiting shift force for its various directions.

Materials and methods. The experimental tests were carried out on the example of a 10-ton caterpillar bulldozer manufactured by the Chelyabinsk Tractor Plant. The shift was carried out by the action of an external force applied to the edge of the dump in various directions. The external force was recorded on an oscillogram.

Results. The shift began with an external force equal to the adhesion limit, provided that the line of action of the external force passed through the center of pressure. The shift begins at much lower values of the external force when the line of action of the external force deviates from the center of pressure. The result of the experiment was the construction of a hodograph of the limiting shift force.

Conclusion. The nature of the change in the external force during translational and rotational shear was fundamentally different. It has been experimentally confirmed that the more the direction of the shear force deviates from the center of pressure of the machine, the smaller the value of the external force can lead to an uncontrolled shear.

KEYWORDS: uncontrolled displacement; experimental studies; ultimate displacement force; bulldozer unit.

The article was submitted 13.06.2022; approved after reviewing 22.06.2022; accepted for publication 27.07.2022.

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: Troyanovskaya I. P., Zhakov A. O. Experimental studies of the uncontrolled shift of the bulldozer // The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2022; 19 (4): 514-521. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-514-521>

© Troyanovskaya I. P., Zhakov A. O., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все больше внимания уделяется проектированию беспилотных наземных машин [1, 2, 3, 4]. И если относительно автомобильного транспорта [5, 6, 7] или военных роботов [8, 9] эти задачи уже во многом успешно решены, то для комплекса тракторных агрегатов [10] и строительно-дорожных машин данные вопросы находятся еще в стадии разработки. Это объясняется тем, что взаимодействие с грунтом осуществляется не только через движитель, но с и помощью рабочих орудий. Возникающие при этом усилия в значительной мере влияют на поведение машины.

Необходимо отметить, что это воздействие носит далеко не случайный характер. Внешние силы со стороны рабочего орудия при выполнении технологического цикла могут приводить к не запланированному отклонению машины от заданной траектории¹. Такое отклонение принято называть пассивным или неуправляемым уводом [11, 12]. Он представляет собой совокупность управляемого действиями водителя движения и не управляемого водителем (пассивного) сдвига под действием внешних сил [13]. Следовательно, при разработке систем управления движением необходим обязательный учет внешних сил со стороны рабочего орудия.

Математическая модель сдвига представляет собой уравнения предельного равновесия. В работе [14] на примере работы бульдозерного агрегата краем отвала был построен годограф предельного значения сдвигающей силы для различных ее направлений. В результате доказано, что поступательный сдвиг имеет место только в случае, когда внешняя сила со стороны рабочего орудия проходит через центр давлений площадки контакта движителя с грунтом. И только в этом случае величина предельного значения внешней силы равна произведению веса машины на коэффициент сцепления с грунтом. Во всех остальных случаях сдвиг является мгновенно вращательным движе-

нием и начинается значительно раньше при меньшем значении сдвигающей силы [15]. Для оценки адекватности предложенной математической модели и годографа предельной сдвигающей силы был проведен натурный эксперимент.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Испытания проводились на полигоне испытательного центра НАТИ (г. Чебаркуль) на суглинистом грунте, плотность которого составляла 6-8 ударов по ударнику ДорНИИ на поверхности и 18-19 ударов на глубине грунтозацепов гусеницы. Температура воздуха в момент испытаний была С, влажность – 50%. В качестве объекта испытаний выбран гусеничный бульдозер Б10 производства ЧТЗ-Уралтрак².

Программа эксперимента включала в себя три этапа:

1-й этап – определение параметров самого объекта испытаний;

2-й этап – оценка взаимодействия с окружающей средой;

3-й этап – непосредственно эксперимент сдвига машины.

Первый этап – замер массово-габаритных параметров гусеничного бульдозера Б10 (рисунк 1). Вес и положение центра тяжести машины определялись путем взвешивания на весовой платформе. Вес составил 29 т, координата центра тяжести машины $x_c = 1440$ мм от оси ведущей звездочки. Основные габаритные параметры измерялись рулеткой с погрешностью ± 1 мм. Эти данные использовались в качестве исходных данных в теоретических расчетах.

На втором этапе определялись коэффициенты сцепления и сопротивления движению. Сопротивление движению замерялось с помощью тензозвена путем протаскивания бульдозера с отключенными гусеницами³. Среднее значение на осциллограмме составило 28,5 кН. Коэффициент сопротивления движению получен путем деления этого усилия на вес бульдозера и составил $f = 0,12$.

¹ Огай В. А., Довбыш В. О., Медведев Е. В. Увод от управляемого движения строительно-дорожных машин под действием внешних сил // Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства: труды IV Международной научно-технической конференции. 2015. С. 455–457.

² Бульдозер ЧТЗ Б10 и его модификации. <http://hard-machines.ru/buldozery/buldozer-chtz-b10-i-ego-modifikacii.html> (обращение 05.03.2022).

³ ГОСТ 23734-98 Тракторы промышленные. Методы испытаний. Москва. 1999.

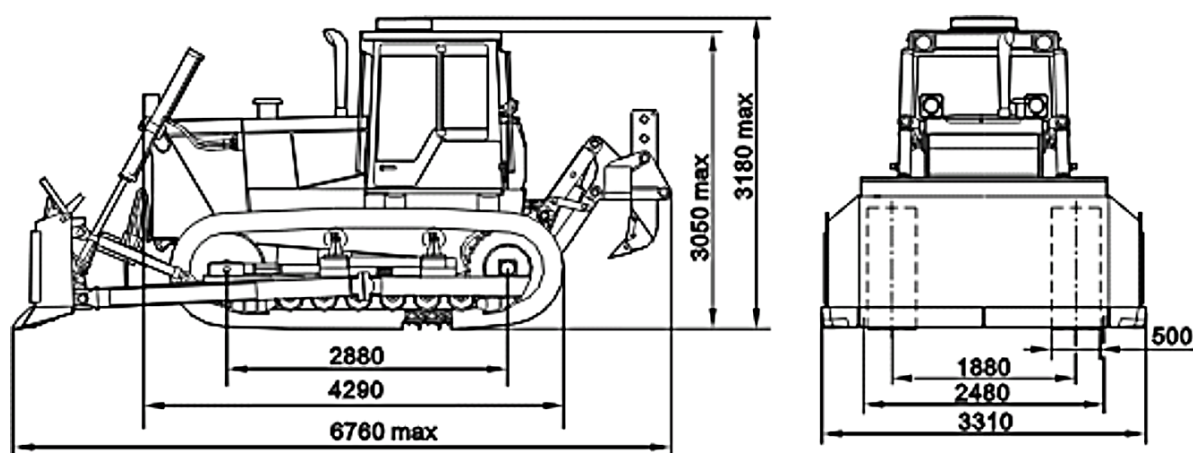


Рисунок 1 – Бульдозер Б10
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – B10 bulldozer.
Source: compiled by the authors.

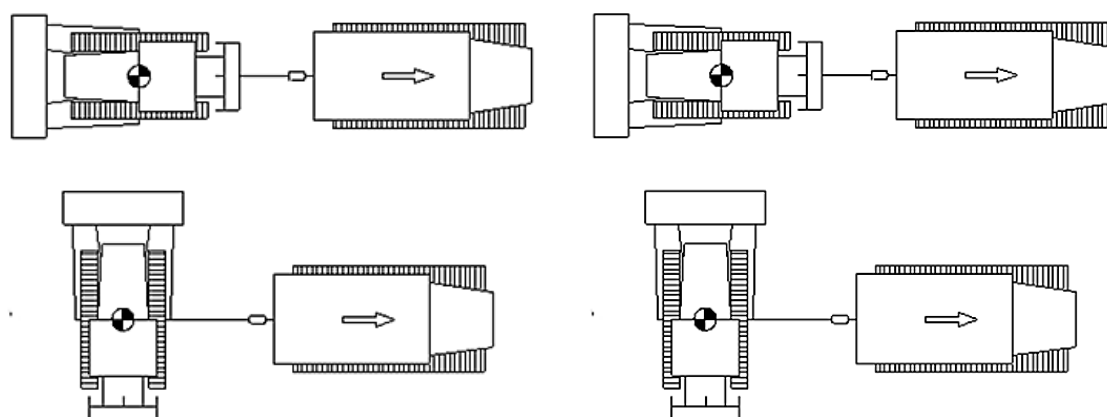


Рисунок 2 – Схема по замеру сил сцепления с грунтом
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Scheme for measuring adhesion forces with the ground.
Source: compiled by the authors.

Гусеницы бульдозера Б10 оснащены трехребневым башмаком с поперечным расположением грунтозацепов. Это обуславливает анизотропию его взаимодействия с грунтом, что отражается в различных коэффициентах сцепления в продольном и поперечном направлении [16, 17]. Экспериментально сцепление заторможенного движителя с грунтом замерялось в продольном и поперечном направлении (рисунок 2).

При трехкратном повторении средние значения коэффициентов сцепления составили: в

продольном направлении $\mu_y=0,95$ и в поперечном направлении $\mu_x=0,85$.

На третьем этапе осуществлялся пассивный сдвиг машины под действием внешней силы. Для этого к краю отвала через динамометр цеплялся трос, закрепленный другим концом к тензометрической лаборатории СДЛ-30 на базе трактора ДЭТ. Значение внешней силы P записывалось на осциллограмму. Под действием внешней силы P в контакте гусеницы с грунтом возникают силы сопротивления T (продольная составляющая T_y и поперечная

составляющая T_x). В случае, когда внешняя сила P не проходит через центр давлений, в контакте дополнительно возникает момент трения M (рисунок 3).

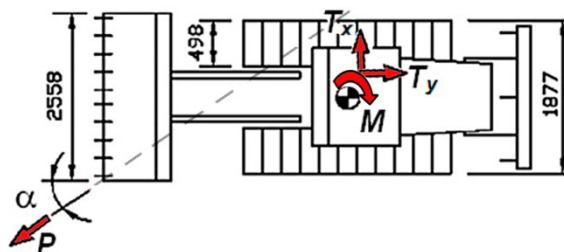


Рисунок 3 – Схема сдвига бульдозера под действием внешней силы P
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Scheme of bulldozer shift under the action of P external force
Source: compiled by the authors.

Направление силы фиксировалось углом α к продольной оси трактора. Эксперимент проводился для семи различных значений углов $\alpha = 0^\circ; 10^\circ; 21^\circ; 26^\circ; 53^\circ; 60^\circ$ и 80° . Для каждого значения опыты повторялись трехкратно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В результате определено, что характер изменения внешнего усилия при поступательном и вращательном сдвиге принципиально отличаются.

При поступательном сдвиге (линия действия внешней силы проходит через центр давлений трактора $\alpha = 21^\circ$) внешнее усилие нарастает до своего предельного по сцеплению значения и далее сохраняет свое значение (рисунок 4).

При вращательном сдвиге (линия действия внешней силы не проходит через центр давлений трактора) [18] на осциллограммах наблюдаются три характерных участка (рисунок 5):

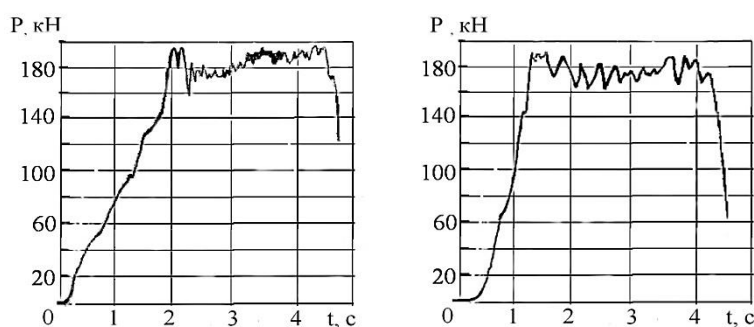


Рисунок 4 – Осциллограммы внешней силы при поступательном сдвиге $\alpha = 21^\circ$
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Oscillograms of an external force in $\alpha = 21^\circ$ translational shear.
Source: compiled by the authors.

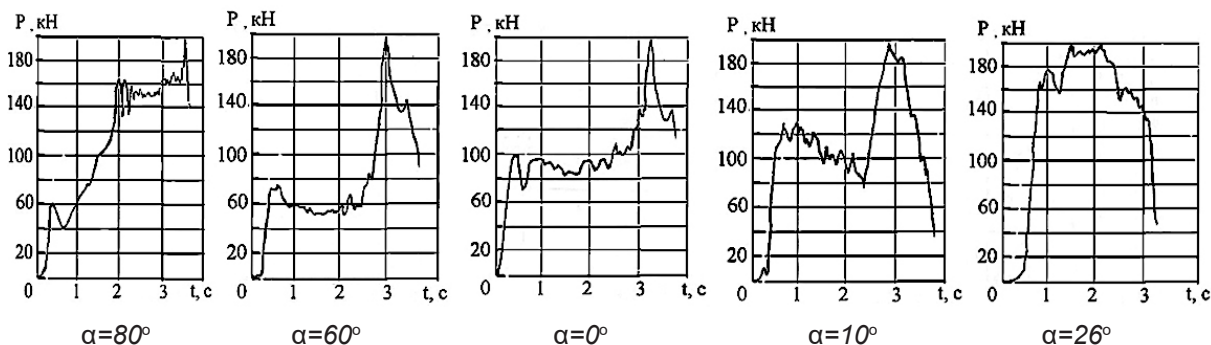


Рисунок 5 – Осциллограммы внешней силы при вращательном сдвиге
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Oscillograms of an external force during rotational shear.
Source: compiled by the authors.

Таблица
Экспериментальные значения сдвигающей силы
Источник: составлено авторами.

Table
Experimental values of the shear force
Source: compiled by the authors.

Угол α	Экспериментальные значения предельной сдвигающей силы, кН			
	опыт 1	опыт 2	опыт 3	среднее
0°	99	105	100	101,3
10°	119	121	135	125
21°	190	198		194
26°	170	173	179	174
53°	72	73	72	72,3
60°	66	68	67	67
80°	60	60	65	61,7

1. Нарастание внешнего усилия до максимального значения.
2. Снижение значения внешней силы.
3. Последующее нарастание внешнего усилия.

ОБРАБОТКА ОСЦИЛЛОГРАММ

Первый этап (нарастание усилия) соответствует равновесному состоянию машины. Максимальное значение достигается в условиях предельного равновесия и соответствует начальному сдвигу при замеренном направлении внешней силы. Поэтому первый выраженный максимум на осциллограмме принимался в качестве значения сдвигающей силы.

Второй этап (снижение усилия) характеризовался мгновенно вращательным скольжением машины. Снижение внешнего усилия в этот момент подтверждает положение, что коэффициент трения скольжения всегда меньше коэффициента трения покоя. Положение троса относительно машины при этом изменялось. В процессе вращательного сдвига машина старалась занять положение, чтобы направление троса (внешней силы) проходило через давление машины. В конце второго этапа скольжение машины прекращалось.

Третий этап (повторное нарастание усилия) опять характеризовался состоянием равновесия уже при новом направлении внешней силы. Однако поскольку направление внешней силы повторно не фиксировалось, то второй максимум на осциллограмме не учитывался.

Все экспериментальные значения предельной сдвигающей силы представлены в таблице.

СРАВНЕНИЕ С ТЕОРЕТИЧЕСКИМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ

В работе [14] представлена математическая модель пассивного сдвига гусеничной машины под действием внешней силы. В результате исследования была получена зависимость модуля предельного значения сдвигающей силы от ее направления, представленная в виде годографа.

Все экспериментальные точки нанесены на теоретический годограф предельной сдвигающей силы (рисунок 6), где хорошо видно их сосредоточение в 7 компактных областях, соответствующих углам направления внешней силы.

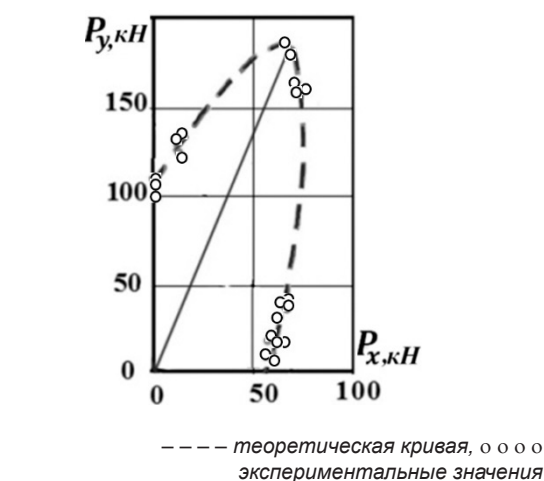


Рисунок 6 – Годограф предельной сдвигающей силы
Источник: составлено авторами.

---- theoretical curve, o o o o experimental values
Figure 6 – Hodograph of ultimate shear force
Source: compiled by the authors.

Относительное отклонение экспериментальных и расчетной кривой годографа, полученного по математической модели [14], определялось по формуле

$$\frac{P_э - P_т}{P_э} 100\%,$$

где $P_э$, $P_т$ – экспериментальное и расчетное значение предельной сдвигающей силы.

Расхождение составило не более 4%, что подтверждает адекватность математической модели [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально подтверждено, что для каждого направления сдвигающая сила имеет свое предельное значение, соответствующее началу неуправляемого движения.

В зависимости от линии действия активной внешней силы меняется характер сдвига (поступательный или мгновенно вращательный) и предельное значение силы.

Экспериментально подтверждено, что чем больше направление сдвигающей силы отклоняется от центра давлений машины, тем меньшее значение внешней силы способно привести к неуправляемому сдвигу.

Данные результаты могут быть использованы при разработке систем управления беспилотными транспортными средствами применительно к строительно-дорожным машинам и другим тракторным агрегатам, когда в качестве внешнего сигнала выступает сила на рабочем орудии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zhao J., Li H., Yang C., Wang W. A novel path planning method for wheel-legged unmanned vehicles based on improved ant colony algorithm // 60th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan. 2021. pp. 696-701. doi:10.1109/TRO.2021.3053649
2. Бакенов А. Ж. Система управления движением мобильного робота с использованием компьютерного зрения // Наука настоящего и будущего. 2020. № 2. С. 111–114.
3. Zhang P., Chen K., Yang T. Tracking the trajectory of autonomous ground vehicles with dead zones of actuators // International Computer Games Magazine. 2021. no. 2914190. doi:10.1155/2021/2914190
4. Пестриков С. А. Актуальные вопросы экономической эффективности наземных беспилотных транспортных средств // Финансовая экономика. 2019. № 12. С. 375–378.
5. Du J., Zhou H., Jin X. Vehicle motion simulation method in urban traffic scene // Lecture notes in computer science (including subseries lecture notes in artificial intelligence and lecture notes in bioinformatics). 2020. Vol. 12341 LNCS. pp. 312-321. doi:10.1007/978-3-030-60816-3_34.

6. Kuwata Y., Teo J., Fiore G., Karaman S., Frazzoli E., How J.P. Real-time motion planning with applications to autonomous urban driving // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2009. Vol. 17(5), pp. 1105-1118. doi:10.1109/TCST.2008.2012116.
7. Zhang H., Yang X., Liang J., Xu X., Sun X. Gps path tracking control of military unmanned vehicle based on preview variable universe fuzzy sliding mode control // Machines. 2021. Vol. 9 (12), no. 304. doi:10.3390/machines9120304
8. Hu Y., Wang X., Hu J., Gong J., Wang K., Li G., Mei C. An Overview on Unmanned Vehicle Technology in Off-Road Environment // Beijing Ligong Daxue Xuebao/Transaction of Beijing Institute of Technology. 2021. Vol. 41(11), pp. 1137-1144 doi:10.15918/j.tbit1001-0645.2020.144.
9. Колтуков А. А., Шестаков В. А., Голубенко Е. А. Зарубежный опыт создания беспилотных наземных транспортных средств для решения задач материально-технического обеспечения войск в условиях боевых действий // Военная мысль. 2019. № 8. С. 136–142.
10. Thamrin N. M., Arshad N.H.M., Adnan R., Sam R. Forward Navigation for Autonomous Unmanned Vehicle in Inter-Row Planted Agriculture Field // Studies in Systems, Decision and Control. 2022. Vol. 371, pp. 183-198. doi:10.1007/978-3-030-74540-0_7.
11. Troyanovskaya I. P., Pozin B. M., Noskov N. K Ploughing Tractor Lateral Withdrawal Model // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. pp. 1540-1545. doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.674.
12. Troyanovskaya I. P., Zhakov A. O., Starunova I. N. Mathematical model of passive withdrawal of a tractor unit // IOP Conference series: Earth and environmental Science. 2021. Vol. 659(1), no. 012081. doi:10.1088/1755-1315/659/1/012081.
13. Казаченко Г. В., Басалай Г. А., Тройнич В. А. Уравнения равновесия при уводе гусеничной машины и их исследование // Горная механика и машиностроение. 2020. № 1. С. 17–22.
14. Трояновская И. П., Жаков А. О. Модель неуправляемого сдвига на примере строительно-дорожной техники // Вестник СИБАДИ. 2021. Т.18, № 6(82). С. 678–687. doi:10.26518/2071-7296-2021-18-6-678-687
15. Трояновская И. П. Страгивание при пассивном повороте строительно-дорожных машин // Строительные и дорожные машины. 2011. № 1. С. 49–52.
16. Economou J. T., Colyer R.E. Modeling of skid steering and fuzzy logic vehicle ground interaction // Proceedings of the American Control Conference. 2000. Vol. 1, pp. 100-104. doi:10.1109/acc.2000.878781
17. Жаков А. О., Трояновская И. П. Влияние анизотропии на силовое взаимодействие гусеничного движителя с грунтом при повороте машины // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 2. С. 43–49. doi:10.31992/0321-4443-2020-2-43-49
18. Вязников М. В. Использование теории комбинированного трения при составлении математической модели криволинейного движения гусеничных машин // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. № 12. С. 279–290.

REFERENCES

1. Zhao J., Li H., Yang C., Wang W. A novel path planning method for wheel-legged unmanned vehicles based on improved ant colony algorithm. *60th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan*. 2021. pp. 696-701. doi:10.1109/TRO.2021.3053649
2. Bakenov A. Zh. Motion control system for a mobile robot using computer vision [Sistema upravleniya dvizheniyem mobil'nogo robota s ispol'zovaniyem komp'yuternogo zreniya]. *Science of the present and future*. 2020; 2: 111-114. (in Russ.)
3. Zhang P., Chen K., Yang T. Tracking the trajectory of autonomous ground vehicles with dead zones of actuators // *International Computer Games Magazine*. 2021. no. 2914190. doi:10.1155/2021/2914190
4. Pestrikov S. A. Current issues of economic efficiency of land unmanned vehicles [Aktual'nyye voprosy ekonomicheskoy effektivnosti nazemnykh bespilotnykh transportnykh sredstv]. *Financial economics*. 2019; 12: 375-378. (in Russ.)
5. Du J., Zhou H., Jin X. Vehicle motion simulation method in urban traffic scene // *Lecture notes in computer science (including subseries lecture notes in artificial intelligence and lecture notes in bio-informatics)*. 2020. Vol. 12341 LNCS. pp. 312-321. doi:10.1007/978-3-030-60816-3_34.
6. Kuwata Y., Teo J., Fiore G., Karaman S., Frazzoli E., How J.P. Real-time motion planning with applications to autonomous urban driving. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2009; 17(5): 1105-1118. doi:10.1109/TCST.2008.2012116.
7. Zhang H., Yang X., Liang J., Xu X., Sun X. Gps path tracking control of military unmanned vehicle based on preview variable universe fuzzy sliding mode control. *Machines*. 2021. Vol. 9(12), no. 304. doi:10.3390/machines9120304
8. Hu Y., Wang X., Hu J., Gong J., Wang K., Li G., Mei C. An Overview on Unmanned Vehicle Technology in Off-Road Environment. *Beijing Ligong Daxue Xuebao/Transaction of Beijing Institute of Technology*. 2021. Vol. 41(11), pp. 1137-1144 doi:10.15918/j.tbit1001-0645.2020.144.
9. Koltukov A. A., Shestakov V. A., Golubenko Y. A. Foreign experience in making unmanned ground transport means to solving the problems of troops logistic support in combat conditions [Zarubezhnyy opyt sozdaniya bespilotnykh nazemnykh transportnykh sredstv dlya resheniya zadach material'no-tekhnicheskogo obespecheniya voysk v usloviyakh boyevykh deystviy]. *Military Thought*. 2019; 8: 136-142. (in Russ.)
10. Thamrin N. M., Arshad N.H.M., Adnan R., Sam R. Forward Navigation for Autonomous Unmanned Vehicle in Inter-Row Planted Agriculture Field. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2022; 371: 183-198. doi:10.1007/978-3-030-74540-0_7.
11. Troyanovskaya I. P., Pozin B. M., Noskov N. K Ploughing Tractor Lateral Withdrawal Model. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 206. pp. 1540-1545. doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.674.
12. Troyanovskaya I. P., Zhakov A. O., Starunova I. N. Mathematical model of passive withdrawal of a tractor unit // *IOP Conference series: Earth and environmental Science*. 2021. Vol. 659(1), no. 012081. doi:10.1088/1755-1315/659/1/012081.
13. Kazachenko G. V., Basalai R. A., Troinich V. A. Equations of equilibrium at slipping a track machine and their study. [Uravneniya ravnovesiya pri uvode gusenichnoy mashiny i ikh issledovaniye]. *Mining mechanics and mechanical engineering*. 2020; 1: 17-22. (in Russ.)
14. Troyanovskaya I. P., Zhakov A. O. Model of uncontrolled displacement on the example of road construction machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021. Vol.8 (6). pp. 678-687. doi:10.26518/2071-7296-2021-18-6-678-687 (in Russ.)
15. Troyanovskaya I. P. Breakaway during passive turning of road construction machines [Stragivaniye pri passivnom povorote stroitel'no-dorozhnykh mashin]. *Construction and road machines*. 2011; 1: 49-52. (in Russ.)
16. Economou J.T., Colyer R.E. Modeling of skid steering and fuzzy logic vehicle ground interaction // *Proceedings of the American Control Conference*. 2000. Vol. 1, pp. 100-104. doi:10.1109/acc.2000.878781
17. Zhakov A. O., Troyanovskaya I. P. The effect of anisotropy on the interaction of the caterpillar propeller with the soil during the vehicle turn. [Vliyaniye anizotropii na vzaimodeystviye gusenichnogo dvizhitelya s gruntom pri povorote mashiny]. *Tractors and agricultural machines*. 2020; 2: 43-49. doi:10.31992/0321-4443-2020-2-43-49 (in Russ.)
18. Vyaznikov M. V. Using the theory of combined friction when making mathematical models of curvilinear motion of tracked vehicles. [Ispol'zovaniye teorii kombinirovannogo treniya pri sostavlenii matematicheskoy modeli krivolineynogo dvizheniya gusenichnykh mashin]. *Science and education of the Bauman MSTU*. 2014; 12: 279-290. (in Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Трояновская И. П. – 50%.

Жаков А. О. – 50%.

COAUTORS' CONTRIBUTION

Irina P. Troyanovskaya – 50%

Andrey O. Zhakov – 50%

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Трояновская Ирина Павловна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Колесные и гусеничные машины»; проф. кафедры «Тракторы, сельскохозяйственные и земледелие».

Жаков Андрей Олегович – аспирант кафедры «Колесные и гусеничные машины».

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Irina P. Troyanovskaya – Dr. of Sci., Professor, the Wheeled and Tracked Vehicles Department; the Tractors, Agricultural Machinery and Agriculture Department.

Andrey O. Zhakov – Postgraduate student, the Wheeled and Tracked Vehicles Department.

УДК 62-529

<https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-522><https://elibrary.ru/FUWXGR>

Научная статья



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

Р. Ю. Сухарев*Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия**suharev_ry@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2627-8110>*

Уточнение к статье, опубликованной в Т. 19. № 2 (84) 2022 стр. 156-169. В конце статьи были внесены изменения, указан переводчик статьи: Перевод И. Н. Чуриловой.

<https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-156-169-522><https://elibrary.ru/FUWXGR>

Original article

PURE PURSUIT METHOD USE TO CONTROL UNMANNED MOTOR GRADER

Roman Yu. Sukharev*Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia**suharev_ry@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2627-8110>*

The clarification to the article published in volume 19 No. 2 (84) 2022 pp. 156-169 is the following: the article has been amended at the end, the translator of the article is indicated: the translation was made by I. N. Churilova.

© Сухарев Р. Ю., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT



«ВЫТЯГИВАЮЩАЯ» МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УЧАСТНИКОВ КОНТРАКТА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Н. А. Амосов*, Е. Ю. Кузнецова²

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия
nikita.amosov@urfu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6355-1470>
e.y.kuznetsova@urfu.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1225-457X>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Новым вызовом для производителей является возможность управлять жизненным циклом транспортных средств. Управление подразумевает под собой контроль и получение различных данных о состоянии и качестве функционирования транспортного средства на этапах жизненного цикла. На сегодняшний день большинство методик управления жизненным циклом транспортных средств направлены на этапы производства и эксплуатации. Заключительный этап остается вне фокуса не только управления, но и самой реализации процесса утилизации. Процесс утилизации транспортных средств является максимально сложным как технологически, так и организационно.

Цель работы – создать модель взаимодействия заказчика и исполнителя по контракту жизненного цикла, которая позволит осуществить своевременный переход транспортного средства на все последующие этапы жизненного цикла и реализацию процесса утилизации после выхода транспортного средства из эксплуатации.

Материалы и методы. В исследовании предложена новая модель организации взаимодействия между участниками исполнения этапов жизненного цикла транспортных средств, при которой будет гарантирована реализация всех этапов. Для разработки новой модели был проведен анализ существующей модели. Первостепенное использование новой модели предложено в рамках контракта жизненного цикла, внедряемого в практику закупок транспортных средств. Данная модель получила определение согласно принципу своего действия – «вытягивающая» модель. В ходе анализа действующих контрактов жизненного цикла на поставку транспортных средств было обнаружено, что этап утилизации не реализуется. Выявлены причины отсутствия заключительного этапа жизненного цикла. Определена роль государства при внедрении «вытягивающей» модели. В работе предложен алгоритм создания и включения утилизационных мощностей в единую утилизационную систему. Предложена методика размещения утилизационных мощностей на территории России.

Результаты. Сформирована схема взаимодействия участников контракта жизненного цикла. Авторы определили ответственных за реализацию этапов контракта жизненного цикла и их обязанности. Сформированы требования новой модели к предыдущим этапам жизненного цикла для обеспечения выполнения заключительного этапа. Выявлена роль «вытягивающей» модели в реализации концепции «устойчивого развития».

Заключение. Научная новизна данной работы заключается в разработанной «вытягивающей» модели, основанной на обратном принципе действия существующей, которая сформировала требования финального этапа жизненного цикла транспортных средств к проектированию, производству и сервисному обслуживанию транспортных средств для реализации процесса утилизации после выхода из эксплуатации. Предложенная модель при включении единой утилизационной системы в общий механизм полноценного выполнения контракта жизненного цикла позволит своевременно реализовывать утилизацию вышедших из эксплуатации транспортных средств, тем самым снижая экологическую нагрузку на окружающую среду.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: утилизация транспортных средств, заключительный этап жизненного цикла, единая утилизационная система, контракт жизненного цикла, «вытягивающая» модель.

Статья поступила в редакцию 21.06.2022; одобрена после рецензирования 23.07.2022; принята к публикации 27.07.2022.

© Амосов Н. А., Кузнецова Е. Ю., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Амосов Н. А., Кузнецова Е. Ю. «Вытягивающая» модель взаимодействия участников контракта жизненного цикла транспортных средств // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 4 (86). С. 524-535. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-524-535>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-524-535>

EDN: DYEAAU

"PULL" MODEL OF INTERACTION OF PARTICIPANTS OF A LIFE CYCLE CONTRACT OF VEHICLES

Nikita A. Amosov*, Elena Yu. Kuznetsova

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin

nikita.amosov@urfu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6355-1470>

e.y.kuznetsova@urfu.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1225-457X>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. A new challenge for manufacturers is the ability to manage the life cycle of vehicles. Control means monitoring and obtaining various data on the state and quality of the vehicle during the life cycle. To date, most vehicle life cycle management techniques are focused on the production and exploitation phases. The final stage remains outside the focus not only of management, but also of the implementation of the utilization process itself. The utilization process of vehicles is as complex as possible, both technologically and organizationally. The aim of the work is to create a model of interaction between the customer and the performer under a life cycle contract. The model will allow the timely transition of the vehicle to all subsequent stages of the life cycle and the implementation of the utilization process after the vehicle is out of service. The article is devoted to the issue of vehicle life cycle management. The main provisions of the operator's and manufacturer's interest in the exploitation phase and its completion are determined. The reasons for the lack of implementation of the final stage of the life cycle (utilization) are formulated. The actions of car dealerships, which aggravate the problem with worn out transport, are described. An assessment of the Accounts Chamber on the use of the utilization fee is given.

Materials and methods. The study proposes a new model for the organisation of interaction between participants in the life cycle of vehicles, which will guarantee the implementation of all stages. An analysis of the existing model was carried out to develop a new model. The primary implementation of the new model was proposed as part of the life-cycle contract being introduced into vehicle procurement practices. This model was defined according to the principle of its action – 'pull out' model. An analysis of existing life-cycle contracts for vehicles revealed that the utilization phase was not being implemented. The reasons for the absence of the final stage of the life cycle have been identified. The role of the state in the implementation of the 'pull out' model has been determined. The article offers an algorithm of inclusion and creation of utilization capacities in a unified utilization system. The method of disposition of utilization capacities on the territory of Russia is offered.

Results. The scheme of interaction between the customer, the performer and the unified utilization system according to the life cycle contract is formed. The authors identified responsibilities and requirements for the life cycle phases of the contract. The requirements of the new model to the previous stages of the life cycle have been formed to ensure the completion of the final stage. The role of the 'pull out' model in the implementation of the concept of 'sustainable development' has been revealed.

Conclusion. The scientific novelty of this work lies in the developed «pulling» model, based on the reverse principle of the existing, which formed the requirements of the final stage of the vehicle life cycle to design, production and maintenance of vehicles to implement the utilization process after decommissioning. The proposed model, with the inclusion of a unified utilization system in the general mechanism for the full implementation of the life cycle contract, will allow timely implementation of the utilization of vehicles that have been decommissioned, thereby reducing the environmental impact.

KEYWORDS: utilization of vehicles, final stage of the life cycle, unified utilization system, life-cycle contract, 'pull out' model.

© Amosov N. A., Kuznetsova E. Yu., 2022



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

The article was submitted 21.06.2022; approved after reviewing 23.07.2022; accepted for publication 27.07.2022.

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: Amosov Nikita A., Kuznetsova Elena Yu. A pull out model of interaction between participants in the vehicle lifecycle contract. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2022; 19 (4): 524-535. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-524-535>

ВВЕДЕНИЕ

Управление жизненным циклом (ЖЦ) транспортного средства (ТС) является новым вызовом для производителей. Контроль и получение различных данных о состоянии и качестве функционирования системы на этапах ЖЦ ТС позволяет производителям анализировать и корректировать процесс производства для исключения проблем на других этапах ЖЦ. Разрабатываются системные подходы для определения баланса мощностей предприятий, занимающиеся производством и эксплуатацией [1]. Создаются алгоритмы управления ЖЦ ТС на стадии его эксплуатации [2].

Большинство методик управления ЖЦ ТС направлены на этапы производства и эксплуатации. Эксплуатанты заинтересованы в нормальном регламентируемом прохождении ЖЦ транспортным средством, за которое будет отвечать производитель, а производитель в свою очередь ставит цель разработать ТС таким образом, чтобы его ТС эксплуатировалось без серьезных поломок только в период гарантийного обслуживания, а сам период эксплуатации завершился в строго регламентируемое время [3, 4].

Процесс утилизации ТС остается вне фокуса заинтересованности производителя и эксплуатанта, поэтому возникает множество проблем с последующей утилизацией ТС. Для ТС процесс утилизации является максимально сложным как технологически, так и организационно [5]. В действительности заключительный этап ЖЦ ТС практически не реализуется. Поступающие в автосалоны ТС по программам обновления автомобильного парка чаще всего будут проданы на вторичный рынок после косметического внешнего и незначительного технического ремонта. Такие действия автосалонов только усугубляют проблему страны с изношенным автопарком.

Сложность управления утилизацией заключается в многокомпонентном составе ТС, отсутствии единой системы обращения с вышедшими из эксплуатации ТС. В России нет явных ответственных за процесс утилизации. Связано это с высокой стоимостью создания утилизационных мощностей и самого процес-

са утилизации, а также сложностью организации и планирования всего технологического процесса. В стоимость новых ТС включен утилизационный сбор, но в 2021 г. Счетная палата дала отрицательную оценку использованию утилизационного сбора, т. к. он не выполняет функции, для которых был создан [6].

Целью данной работы является создание модели взаимодействия заказчика и исполнителя по контракту жизненного цикла, которая позволит осуществить своевременный переход транспортного средства на все последующие этапы жизненного цикла и реализацию процесса утилизации после выхода транспортного средства из эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Переход от «выталкивающей» к «вытягивающей» модели. С начала 2000-х годов в практику работы промышленных предприятий был внедрен подход управления жизненным циклом [7]. Интерес промышленных предприятий заключается в сокращении жизненного цикла изделия для того, чтобы у потребителей как можно скорее гарантированно возник спрос на обновление продукта, которым они пользуются [8]. Таким образом, производитель добивается раннего и физического, и морального износа своего продукта (ТС) путем закладывания скорейшего «старения» ТС на этапе проектирования [9, 10]. Но на деле потребитель не обновляет свое ТС после одного из видов износов, что привело к повышенному количеству эксплуатируемых «старых» ТС и сложившаяся ситуация только ухудшается [11].

Сегодня в транспортной отрасли России работает модель организации взаимодействия между производителем и эксплуатантом, которая приводит к долгосрочному удержанию транспортного парка на стадии эксплуатации, ее можно назвать «выталкивающей» [12]. Эксплуатанты заинтересованы в максимальном использовании своих ТС по причине экономии денежных средств, не обновляя парк. Даная политика управления транспортным парком приводит к эксплуатации устаревшего парка ТС, который является аварийно-опасным, к

снижению средней скорости на дорогах и непредвидимым поломкам ТС.

Производитель заинтересован сделать и продать как можно больше ТС для улучшения показателей своей деятельности, «выталкивая» выпущенные ТС на рынок. В таком случае качество массового сегмента ТС имеет тенденцию к снижению из-за желания производителя создать как можно больше единиц продукции и стремления снизить затраты на производство. Для производителя главными факторами качества являются безремонтная работа ТС в гарантийный период и сохранение минимальной безопасности для соответствия стандартам. Интерес производителя заключается в том, чтобы потребитель не обращался по гарантийному обслуживанию, а само ТС вышло из этапа эксплуатации как можно скорее для создания мотива потребителю купить новое ТС. Таким образом, реальный запланированный и гарантированный срок эксплуатации ТС минимальный, и ТС на сегодняшний день не имеют большого запаса надежности. Эксплуатанты, наоборот, стараются максимально продолжительно использовать ТС, удерживая на стадии эксплуатации как можно дольше, для минимизации собственных издержек. Заключительный этап при «выталкивающей» модели откладывается на длительное время либо совсем не реализуется.

Объективные обстоятельства вынуждают задуматься об обратной модели, которая будет основываться на том, что заключительный этап ЖЦ обеспечивается путем формирования требований к этапам проектирования, производства и эксплуатации ТС для его технологически доступной своевременной утилизации. На этапах проектирования и производства производитель должен будет предусмотреть упрощенную технологию разборки ТС, а также использовать материалы, наиболее подходящие для процесса утилизации, но не уступающие в эксплуатационных характеристиках существующим. «Вытягивающую» модель следует внедрить и апробировать в самом регулируемом сегменте рынка – B2G. «Вытягивающая» модель внедряет дополнительные условия по закупке новых ТС в сегменте B2G. Поставляемое ТС не должно эксплуатироваться после регламентируемого срока эксплуатации, а быть передано в соответствующую организацию для утилизации. Закупка новых ТС должна осуществляться по причинам своевременного обновления парка ТС или в случае увеличения его операционной деятельности.

На сегодняшний день государственный заказчик все чаще производит закупку ТС по контракту жизненного цикла (КЖЦ). Развитие данной формы государственных заказов произошло после вступления в силу Федерального закона (ФЗ) № 44 от 5 апреля 2013 г. В рамках 44-ФЗ по КЖЦ чаще всего закупаются ТС для общественного транспорта. Однако 44-ФЗ (ч. 16 ст. 34) регламентирует правило, согласно которому заказчик может заключить КЖЦ только в том случае, если предметом контракта являются новые машины и оборудование, или в иных условиях, установленных Правительством РФ в Постановлении от 28 ноября 2013 г. № 1087. Таким образом, согласно закону, заказчик может закупить ТС по КЖЦ только новый вид машин (электробусы, низкопольные трамваи и автобусы), а вот автобусы в классическом исполнении не закупаются по КЖЦ [13].

КЖЦ подразумевает под собой реализацию нескольких этапов ЖЦ. КЖЦ включает в себя производство и своевременную поставку ТС заказчику, а после исполнитель реализует, согласно контракту, запланированные технические обслуживания ТС. Все это выполняется и финансируется в рамках одного контракта на протяжении всего срока эксплуатации ТС [14, 15].

В действующих КЖЦ отсутствует этап утилизации, на наш взгляд, КЖЦ и задумывался для решения вопросов беспрепятственного обслуживания и эксплуатации ТС. Исполнитель КЖЦ не имеет технической возможности реализовать заключительный этап ЖЦ в связи с отсутствием у производителей утилизационных мощностей. Заключить договор со сторонней организацией у исполнителя КЖЦ нет возможности, т. к. в случае с ТС необходимо будет заключить ряд договоров на утилизацию с большим количеством организаций по причине необходимости утилизации разнородных элементов – агрессивных жидкостей, пластмассы и пр. Предприятий по утилизации ТС полного цикла не существует. В случае если в КЖЦ прописать обязательную утилизацию ТС, то производители откажутся от данного контракта в связи с отсутствием возможности реализовать заключительный этап ЖЦ [13].

Сложность в исполнении заключительного этапа ЖЦ заключается в необходимости разборки ТС и частичной отправки компонентов в разные утилизационные предприятия. Логистические затраты в таком случае будут очень высокими. Возможность утилизации всех компонентов ТС остается под вопросом [16].

Роль государства во внедрении «вытягивающей» системы и создания единой утилизационной системы (ЕУС). Заключительный этап при «вытягивающей» модели возможно реализовать при создании единой утилизационной системы (ЕУС) в форме отдельной компании под управлением государства. ЕУС будет выступать в роли оператора. Задачи ЕУС будут заключаться в планировании и распределении «транспортных отходов» между утилизационными мощностями по их технологиям обращения, и в исключении недозагруженности одних предприятий и переизбытка загрузки других. Действующие утилизаторы смогут заключить договор с ЕУС для оказания им услуг контроля и распределения «транспортных отходов».

В настоящее время утилизацией ТС занимаются частные узкоспециализированные компании, которые утилизируют малый спектр компонентов. Утилизационных мощностей недостаточно для своевременной утилизации всего парка ТС, нуждающегося в утилизации, а у производителей отсутствуют собственные утилизационные мощности. Проблема заключается в том, что утилизация ТС – это многоотраслевой вопрос. Утилизация ТС включает в себя большое количество технологических процессов, направленных на широкий спектр материалов (черные и цветные металлы, стекло, резина, пластмассы и т. д.). Сложность процесса утилизации заключается и в многоэтапном технологическом процессе, что подразумевает постепенную передачу отходов в несколько предприятий. Для высокого процента рециклинга на территории России должны быть предприятия для утилизации всего перечня материалов ТС, а сами утилизаторы должны иметь высокую степень взаимодействия между собой.

Заключение договора между ЕУС и утилизаторами позволит осуществить централизованную передачу ТС в центры приема, что приведет к росту поступления ТС на этап утилизации. Улучшение взаимодействия между утилизаторами позволит создать цепочки передачи отходов для обеспечения утилизации всех компонентов. Государству следует осуществить на начальном этапе финансовую поддержку утилизаторов, которые примут решение заключить договор с ЕУС. Государство должно снизить налоговую нагрузку для ути-

лизаторов, которые имеют низкую рентабельность из-за специфики технологии утилизации компонентов. Разные условия поддержки государством в виде длительных налоговых каникул, небольших по величине налоговых сборов должны быть изучены отдельно [17]. При таком большом количестве условий только государство может являться гарантом создания системы обращения с отходами ТС.

В отчете за 2021 г. Счетная палата предложила Минпромторгу России совместно с заинтересованными федеральными органами исполнительной власти рассмотреть возможность возобновления программ утилизации вышедших из эксплуатации ТС за счет утилизационного сбора. Утилизационный сбор является неналоговым доходом, поэтому все средства должны быть направлены на создание ЕУС и поддержку утилизаторов¹.

В первую очередь ЕУС следует создать для того, чтобы исключить отрицательное влияние отходов ТС на экологию. Но при объединении и возникновении целого пула сложных технологических производств существует возможность улучшить экономическую, а затем и социальную сферу. ЕУС способствует созданию концепции «устойчивого развития» [18]. Сам процесс утилизации уже направлен на экологическую сферу. Главные факторы достижения экологической составляющей будут заключаться в том, что процесс утилизации приносит меньше вреда окружающей среде, чем постепенное природное разложение отходов, и создается возможность использовать переработанные материалы повторно. Экономическая сфера проявляется в создании новых утилизирующих производств и в улучшении стабильности работы имеющихся. В итоге это приводит к созданию новых рабочих мест, повышению платежеспособности населения и росту экономики в целом. Повышение уровня жизни людей способствует развитию и становлению социальной сферы.

Алгоритм управления утилизационными мощностями при создании ЕУС. Для включения «вытягивающей» модели в контракт жизненного цикла и технологического выполнения процесса утилизации ТС, после его выхода из эксплуатации, следует реализовать на территории России ЕУС. На рисунке 1 представлен алгоритм управления утилизационными мощностями.

¹ Разъяснение федерального закона № 89: экологический и утилизационный сборы не имеют отношения к тарифу коммунальной услуги «Обращение с ТКО» [Электронный ресурс]. URL: <https://ecostr.ru/novosti/razjasnenie-federalnogo-zakona-89-jekologicheskij-i-utilizacionnyj-sbory-ne-imejut-otnoshenija-k-tarif-u-kommunalnoj-uslugi-obrashhenie-s-tko/> (дата обращения: 04.06.2022).

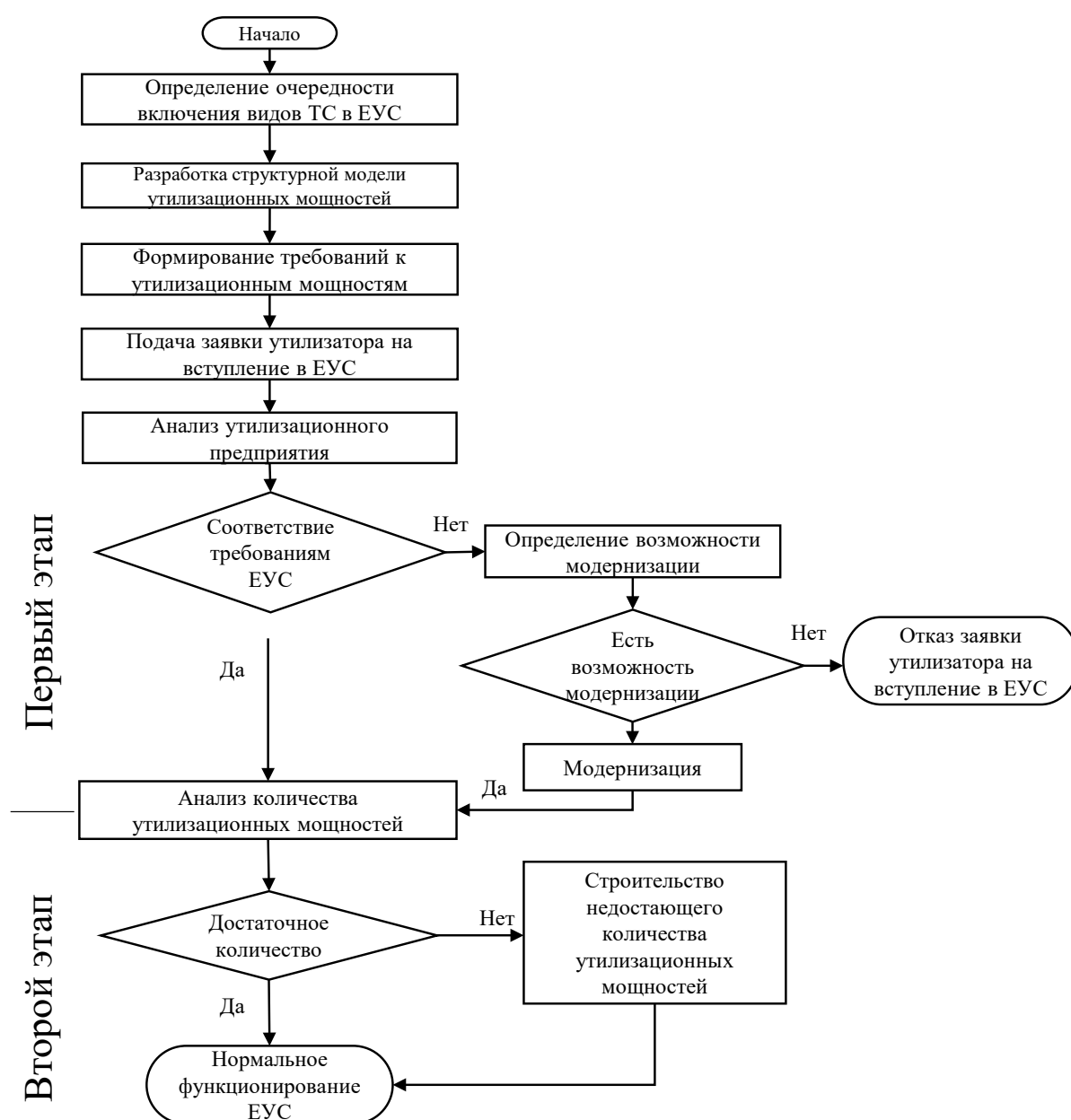


Рисунок 1 – Алгоритм управления утилизационных мощностей
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Utilization capacity management algorithm
Source: compiled by the authors.

Реализация ЕУС заключается в двух этапах:

Первый этап. Заключение договора между действующими утилизаторами и ЕУС после проверки на соответствие современным требованиям утилизирующего производства. Отметим, что действующие утилизаторы получили лицензию от Росприроднадзора, но при заключении договора с ЕУС следует провести

повторную проверку организаций, включить повышенные требования по эффективности переработки. В случае если утилизатор не соответствует заявленным требованиям ЕУС, будет проведена оценка предприятия на возможность модернизации с целью дальнейшего заключения этого предприятия с ЕУС.

Второй этап. Расчет и анализ утилизационных мощностей, работающих с ЕУС.

Результатом второго этапа будет являться заключение о количестве недостающих утилизационных мощностей для своевременной утилизации устаревшего парка ТС в данный период времени.

Строительство недостающего количества утилизационных мощностей будет реализовано с помощью построения унитарных предприятий. Территориальное расположение унитарных предприятий будет находиться с помощью авторской методики, основанной на нахождении потенциалов городов наибольшего скопления ТС, вышедших из эксплуатации и нахождения между ними центральной точки, после определения равнозначной потенциальной точки между двумя близлежащими городами наибольшего скопления ТС.

Формула для расчета потенциала:

$$P_{i \text{ итог}} = \frac{N_i}{\sum N_j} \times \sum \frac{N_j^2}{S_{ij}^2} + \sum \frac{N_j^2}{S_{ij}^2}, \quad (1)$$

где I – множество городов, потенциал которых рассчитывается;

J – множество городов, относительно которых рассчитывается потенциал;

N_i – количество ТС в конкретном городе из множества « i »;

$\sum N_j$ – сумма количества ТС в городах из множества « j »;

$\sum P_{ij}$ – суммарный потенциал конкретного города из множества « i » относительно количества ТС в каждом отдельно взятом городе множества « j »;

S_{ij} – расстояние между конкретными городами из множества « i » и множеством « j »;

$\sum N_j$ – сумма количества ТС в городах из множества « j ».

Следующий этап будет заключаться в группировке городов наибольшего скопления ТС по принадлежности к федеральным округам. В каждой группе будет определяться равнозначная потенциальная точка между двумя близлежащими городами наибольшего скопления в этой группе.

Формула по определению равнозначной потенциальной точки между двумя близлежащими городами наибольшего скопления ТС [19, 20]:

$$L = \frac{S_{AB}}{1 + \sqrt{\frac{P_A}{P_B}}}, \quad (2)$$

где L – расстояние от города «А» до расположения равнозначной потенциальной точки на отрезке, соединяющей два города в группе;

S_{AB} – расстояние между двумя населенными пунктами в группе;

P_A, P_B – потенциалы общих близлежащих городов.

После нахождения равнозначных потенциальных точек в группе будет найден центр масс с помощью графического метода. Итоговым результатом будет являться населенный пункт, имеющий железнодорожный грузовой терминал, максимально приближенный к рассчитанной точке [20].

Далее будет проведена проверка полученных результатов на возможность построения утилизирующих мощностей в найденном населенном пункте по оценке трудовых ресурсов «К» [20, 21].

$$K = \sqrt{\frac{Zn}{Z_{cp}} \cdot \frac{Cn}{C_{cp}}} \cdot \frac{\gamma \cdot N1}{N_{min}}, \quad (3)$$

где n – множество регионов, в которых находятся населенные пункты, имеющие железнодорожный грузовой терминал, максимально приближенный к рассчитанной точке.

Zn – средняя заработная плата в регионе « n »;

Z_{cp} – средняя заработная плата в России;

Cn – стоимость квадратного метра жилья в регионе « n »;

C_{cp} – стоимость квадратного метра жилья в России;

γ – коэффициент запаса;

$N1$ – количество безработных человек за 2021 г.;

N_{min} – необходимое количество работников для утилизационного центра.

Недостающие утилизационные мощности могут быть построены производителями ТС. При включении производителей в процесс утилизации будет решена часть важных задач. Производители будут более тщательно заниматься подбором состава материалов изделия, пригодных для последующей утилизации или рециклинга.

Построение недостающих утилизационных мощностей предполагается в малых и средних городах России. Крупные города исключаются из перечня потенциальных городов. Принятые ограничения направлены на улучшение социально-экономического состояния небольших городов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Реализация «вытягивающей» модели в КЖЦ. Для своей успешной реализации следует объединить идеологии и организационные технологии КЖЦ и ЕУС на основе «вытягивающей» модели. Заключительный этап ЖЦ задает условия для всех предыдущих этапов, меняя их качество и принцип перехода ТС на следующие этапы ЖЦ.

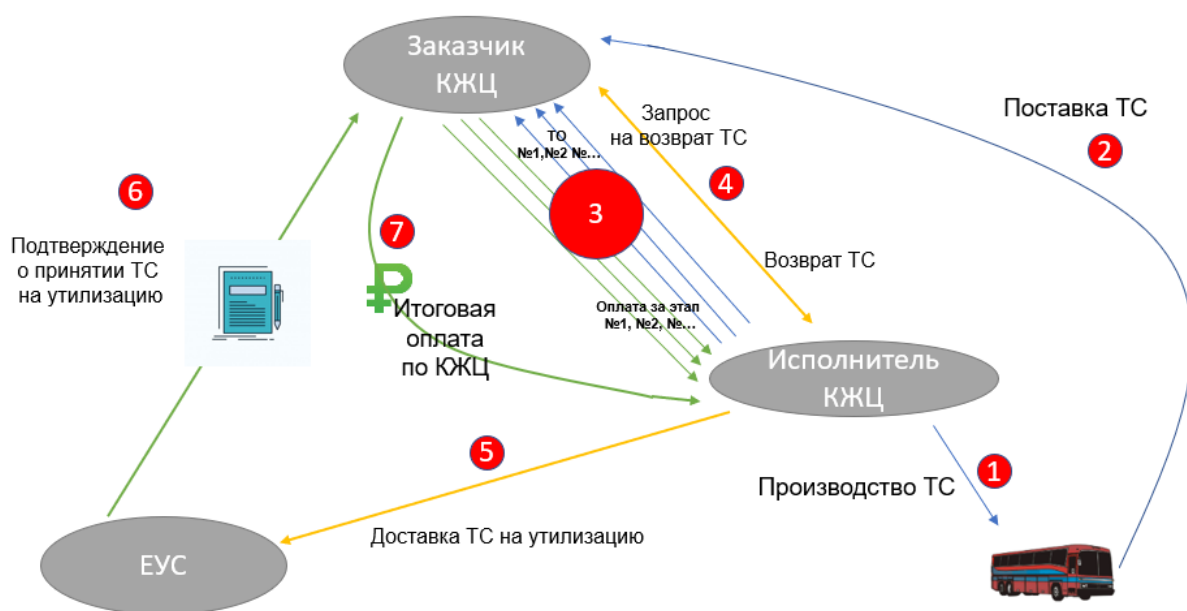


Рисунок 2 – Схема взаимодействия между заказчиком, исполнителем и ЕУС по КЖЦ
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – The scheme of interaction between the customer, the performer and the unified utilization system under the lifecycle contract
Source: compiled by the authors.

Исполнитель-производитель забирает ТС после этапа эксплуатации у заказчика-эксплуатанта и доставляет его в пункт сбора, сотрудничающий с ЕУС. ЕУС в рамках контракта обязуется в определенный срок принять ТС для дальнейшей утилизации. После доставки ТС в пункт сбора все остальные организационно-технические сложности и затраты процессов утилизации будут возложены на ЕУС. Процесс своевременного изъятия ТС у заказчика и его передача в ЕУС осуществляет исполнитель КЖЦ. Управляющий орган ЕУС планирует процесс утилизации ТС по конкретному КЖЦ, составляя цепочку передачи отходов ТС по утилизирующим предприятиям. С учетом строгого графика эксплуатации и последующего выхода из использования ТС по соответствующему контракту возможно максимально точно определить, в каком году и месяце должно быть доставлено ТС к утилизатору. На рисунке 2 изображена поэтапная схема взаимодействия между заказчиком, исполнителем и ЕУС по КЖЦ.

Если исполнитель не уведомляет и не забирает ТС у заказчика в назначенный срок по контракту, то следуют начисление пени за каждый день просрочки и возможность невыполнения условий контракта. Применение штрафной системы и включение дополнительного условия по закрытию контракта

повысит заинтересованность исполнителя в осуществлении последних обязательств по контракту. Предлагаемые меры не позволят эксплуатировать ТС после назначенного срока эксплуатации путем изъятия ТС у заказчика для последующей передачи ТС в пункт сбора. ЕУС после приемки ТС для последующей утилизации уведомит заказчика о принятии ТС от исполнителя КЖЦ. Далее заказчик должен выплатить все оставшиеся суммы исполнителю и закрыть КЖЦ.

Обеспечение выполнения условий КЖЦ при «вытягивающей» модели гарантируется исполнением обязанностей сторонами контракта, приведенными в таблице.

При каждом переходе ТС на следующий этап ЖЦ меняется ответственный, который в свою очередь принимает ТС в свой круг обязанностей и несет ответственность за реализацию этого перехода.

Формирование требований «вытягивающей» модели к этапу проектирования и этапу производства ТС. Из обязанностей ответственных (см. таблицу) вытекают очевидные требования к этапам ЖЦ для их своевременного перехода на следующий этап, но важно отметить неявные требования «вытягивающей» модели. Неявные требования связаны с возможностью дальнейшего перехода ТС от этапа эксплуатации к исполнению заключи-

Таблица

Обязанности сторон контракта по выполнению условий КЖЦ при «вытягивающей» модели
Источник: составлено авторами.

Table

The contract partners obligations on the life cycle contract terms fulfilment using the 'pull out' model
Source: compiled by the authors.

№	Ответственный	Этап ЖЦ ТС	Обязанности
1.	Исполнитель	Проектирование, производство	Производство ТС из материалов, поддающихся дальнейшей переработке
2.	ЕУС	Проектирование, производство	Сотрудничество с производителями в области принятия конструкторских решений для обеспечения дальнейшего процесса утилизации
3.	Заказчик	Эксплуатация	Принятие ТС в эксплуатацию. Эксплуатация ТС строго по плану-графику
4.	Исполнитель	Эксплуатация	Проведение планового технического осмотра в указанный срок
5.	Исполнитель	Эксплуатация	Передача замененных деталей по регламентируемому техническому обслуживанию в ЕУС
6.	ЕУС	Эксплуатация	Изъятие комплектующих ТС на дальнейшую утилизацию
7.	ЕУС	Эксплуатация	Утилизация комплектующих ТС
8.	Исполнитель	Переход от эксплуатации к заключительному этапу ЖЦ	Изъятие ТС у заказчика после выхода из эксплуатации и его передача в пункт сбора ЕУС для дальнейшей утилизации
9.	ЕУС	Переход от эксплуатации к заключительному этапу ЖЦ	Принятие ТС, вышедших из эксплуатации, от исполнителя КЖЦ
10.	ЕУС	Заключительный этап ЖЦ	Утилизация ТС

тельного этапа ЖЦ. Все требования «вытягивающей» модели заключаются в повышении заинтересованности конечного пункта в цепочке передачи ТС по КЖЦ. Конечным пунктом будут являться утилизационные предприятия, заключившие договор с ЕУС.

На этапе проектирования производитель должен исключить применение в конструкции ТС сложно-утилизируемых материалов [22]. Формируется требование к конструкции ТС – проектирование таким образом, чтобы ее конечный разбор на комплектующие и детали был максимально прост. Простота разборки ТС и повышение коэффициента рециклинга материалов повысит эффективность работы ЕУС.

Требования к этапу производства заключаются в способности самого производства к гибкости и адаптированности технологического процесса к обработке утилизационно-пригодных материалов вместо стандартных. Без современного оборудования и технических специалистов высокого уровня на предприятиях не получится произвести максимально эффективные ТС для процесса утилизации [23].

Роль «вытягивающей» модели в реализации концепции «устойчивого развития». Включение ЕУС в КЖЦ при использовании «вы-

тягивающей» модели взаимодействия может быть рассмотрено как инструмент достижения концепции «устойчивого развития». Сам КЖЦ дает стабильность работы его исполнителю на основе государственного финансирования, а для заказчика – своевременно обслуженное ТС. При включении ЕУС в КЖЦ добавляется явный параметр концепции «устойчивого развития», а именно экологическая сфера [24]. Экологический аспект заключается не только в результате утилизации ТС, но и в создании рабочих мест на производствах высокого уровня с минимальным влиянием на окружающую среду [25, 26].

Создание ЕУС и ее дальнейшее применение в КЖЦ на основе «вытягивающей» модели взаимодействия в рамках концепции «устойчивого развития» может стать драйвером роста экономики и благосостояния населения в городах, где будут построены недостающие утилизационные мощности.

Возвратная логистика в контексте рециклинга материалов слабо развита из-за относительной доступности запасов природных ресурсов в стране. Однако принципы создания ЕУС для ТС показывают, насколько актуальна на сегодняшний день задача утилизации материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научная новизна данной работы заключается в разработанной «вытягивающей» модели, основанной на обратном принципе действия существующей, которая сформировала требования финального этапа жизненного цикла транспортных средств к проектированию, производству и сервисному обслуживанию транспортных средств для реализации процесса утилизации после выхода из эксплуатации.

При создании ЕУС реализация заключительного этапа ЖЦ ТС становится реальной. На сегодняшний день КЖЦ на производство, поставку и эксплуатацию городских ТС заключаются в крупнейших городах России между производителем ТС и унитарным предприятием города. ЕУС рассматривается как возможность создания целой отдельной компании, которую возможно будет включить в КЖЦ для реализации заключительного этапа ЖЦ. Полагаем, что в концепцию КЖЦ постепенно будут вовлекаться и другие виды транспортных средств. Например, ОАО «РЖД» уже имеет опыт по закупке подвижного состава по КЖЦ. ЕУС, помимо выполнения заключительного этапа ЖЦ в КЖЦ, также будет использоваться для утилизации легковых автомобилей по существующим программам утилизации ТС. Поэтому строительство утилизационных мощностей ЕУС следует рассматривать с перспективой дальнейшего увеличения потенциального объема утилизирующих ТС.

Наибольшее количество пунктов по сбору ТС, вышедших из эксплуатации, будет размещено в самых крупных городах России, где численность населения более 1 млн чел., как в городах наибольшего скопления ТС. В дальнейшем следует увеличивать количество пунктов по сбору ТС, вышедших из эксплуатации, и размещать их в менее крупных городах страны. Доставка ТС исполнителем КЖЦ в пункт сбора не составит организационных или технических сложностей.

Представленная схема взаимодействия заказчика и исполнителя согласно «вытягивающей» модели взаимодействия не позволит эксплуатировать ТС после их запланированного выхода из эксплуатации. Включение ЕУС в КЖЦ будет необходимо как для исполнителей, чтобы обеспечить реализацию заключительного этапа ЖЦ и выполнить весь перечень услуг КЖЦ, так и для ЕУС, чтобы добиться предсказуемой загруженности утилизационных мощностей. Заказчик при новой схеме взаимодействия получает не только техническую поддержку от исполнителя во время эксплуатации, но и своевременное об-

новление парка ТС по причине регламентирующего изъятия ТС по действующему КЖЦ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Южанин И. Н., Терентьев А. В. Анализ нормативной базы, регламентирующей вывод АТС из эксплуатации // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 2.
2. Терентьев А. В. Управление жизненным циклом автомобиля на стадии эксплуатации // *Вестник гражданских инженеров*. 2015. № 3 (50).
3. Enriquez J. G. et al. An approach to characterize and evaluate the quality of Product Lifecycle Management Software Systems // *Computer Standards & Interfaces*. 2019. Vol. 61. P. 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2018.05.003>.
4. Boucher X. et al. Digital technologies to support lifecycle management of smart product-service solutions // *Computers in Industry*. 2022. Vol. 141. P. 103691. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103691>.
5. Numfor S. A., Takahashi Y., Matsubae K. Energy recovery from end-of-life vehicle recycling in Cameroon: A system dynamics approach // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 361. P. 132090. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132090>.
6. Петров Л.Р. Экономические и экологические аспекты вторичной переработки отслуживших автомобилей в Европе / Л.Р. Петров, В.И. Седугин // *Журнал автомобильных инженеров*. 2013. № 4. С. 7–13. ISSN 2073-9133.
7. Liu X. L. et al. Industrial blockchain based framework for product lifecycle management in industry 4.0 // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020. Vol. 63. P. 101897. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101897>.
8. McKendry D. A., Whitfield R. I., Duffy A. H. B. Product Lifecycle Management implementation for high value Engineering to Order programmes: An informational perspective // *Journal of Industrial Information Integration*. 2022. Vol. 26. P. 100264. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100264>.
9. Kosai S., Nakanishi M., Yamasue E. Vehicle energy efficiency evaluation from well-to-wheel lifecycle perspective // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2018. Vol. 65. P. 355–367. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.09.011>.
10. Yao Z. et al. Service operations of electric vehicle carsharing systems from the perspectives of supply and demand: A literature review // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2022. Vol. 140. P. 103702. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103702>.
11. Scorrano M., Danielis R. Simulating electric vehicle uptake in Italy in the small-to-medium car segment: A system dynamics/agent-based model parametrized with discrete choice data. // *Research in Transportation Business & Management*. 2021. P. 100736. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2021.100736>.
12. Wen W. et al. Impacts of COVID-19 on the electric vehicle industry: Evidence from China // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021a. Vol. 144. P. 111024. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111024>.

13. Кузнецова Е. Ю., Амосов Н. А. Применение контрактов жизненного цикла в транспортной отрасли: проблемы и перспективы // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (53). DOI: 10.20291/2079-0392-2022-1-92-101.
14. Никитин Ю. А. Особенности контракта жизненного цикла / Ю. А. Никитин, Н. И. Васильев, Г. Б. Детков // Теория и практика сервиса: экономика, социальная сфера, технологии. 2019. № 2 (40). С. 33–41. ISSN 2078-5852.
15. Тургенева В. В., Секерин В. Д. «Контракт жизненного цикла» в сфере транспортной инфраструктуры как новый механизм государственно-частного партнерства // Модернизация. Инновации. Развитие. 2017. № 8 (4). С. 536–543. ISSN 2079-4665
16. Ракута Н. В. Использование контрактов жизненного цикла при госзакупках. Опыт развитых стран // Вопросы государственного и муниципального управления. 2015. № 2. С. 53–78. ISSN 1999-5431.
17. Murugan M., Marisamynathan S. Elucidating the Indian customers requirements for electric vehicle adoption: An integrated analytical hierarchy process – Quality function deployment approach // Case Studies on Transport Policy. 2022. P. S2213624X22000694. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.03.017>.
18. Korczak J., Kijewska K. The Concept of Sustainable Development of Public Passenger Transport in Koszalin // Transportation Research Procedia. 2016. Vol. 16. P. 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.021>.
19. Кузменко Ю. Г., Савельева И. П., Конькова Е. Д. Логистика торгового обслуживания: модели и методы территориального размещения объектов рыночного хозяйства – зарубежный опыт // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. 2015. Т. 9, № 3. С. 159–168. ISSN 1997-0129
20. Кузнецова Е. Ю., Амосов Н. А. Организация единой утилизационной системы для транспортных средств на территории России // Вестник Уральского Государственного Университета Путей Сообщения. 2022. № 2 (54). DOI: 10.20291/2079-0392-2022-2-.
21. Юкиш В. Ф. Анализ и проблемы использования трудовых ресурсов России // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 6–2. С. 112–116. ISSN 2073-0071.
22. Liu J. et al. Impact of recycling effect in comparative life cycle assessment for materials selection - A case study of light-weighting vehicles // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 349. P. 131317. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131317>.
23. Bhadra U., Mishra P. P. Extended Producer Responsibility in India: Evidence from Recykal, Hyderabad // Journal of Urban Management. 2021. Vol. 10. № 4. Pp. 430–439. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2021.07.003>.
24. Niemets K. et al. World cities in terms of the sustainable development concept // Geography and Sustainability. 2021. Vol. 2. № 4. Pp. 304–311. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.12.003>
25. Kowalska-Pyzalska A., Kott J., Kott M. Why Polish market of alternative fuel vehicles (AFVs) is the smallest in Europe? SWOT analysis of opportunities and threats // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 133. P. 110076. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110076>.
26. Leng J. et al. Blockchain-empowered sustainable manufacturing and product lifecycle management in industry 4.0: A survey // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 132. P. 110112. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110112>.

REFERENCES

1. Juzhanin I. N., Terent'ev A. V. Analiz normativnoy bazy, reglamentiruyushhej vyvod ATS iz jekspluatacii [Analysis of the regulatory framework governing the withdrawal the vehicle from exploitation]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014; 2. (in Russ.)
2. Terent'ev A. V. Upravlenie zhiznennym ciklom avtomobilja na stadii jekspluatacii [Management of the life cycle of the automobile at the operation stage]. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov*. 2015; 3 (50). (in Russ.)
3. Enriquez J. G. et al. An approach to characterize and evaluate the quality of Product Lifecycle Management Software Systems. *Computer Standards & Interfaces*. 2019. Vol. 61. P. 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2018.05.003>.
4. Boucher X. et al. Digital technologies to support lifecycle management of smart product-service solutions. *Computers in Industry*. 2022. Vol. 141. P. 103691. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103691>.
5. Numfor S. A., Takahashi Y., Matsubae K. Energy recovery from end-of-life vehicle recycling in Cameroon: A system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 361. P. 132090. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132090>.
6. Benzidia S., Luca R. M., Boiko S. Disruptive innovation, business models, and encroachment strategies: Buyer's perspective on electric and hybrid vehicle technology. *Technological Forecasting and Social Change*. 2021. Vol. 165. P. 120520. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120520>.
7. Liu X. L. et al. Industrial blockchain based framework for product lifecycle management in industry 4.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020. Vol. 63. P. 101897. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101897>.
8. McKendry D. A., Whitfield R. I., Duffy A. H. B. Product Lifecycle Management implementation for high value Engineering to Order programmes: An informational perspective. *Journal of Industrial Information Integration*. 2022. Vol. 26. P. 100264. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100264>.
9. Kosai S., Nakanishi M., Yamasue E. Vehicle energy efficiency evaluation from well-to-wheel life-cycle perspective. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2018. Vol. 65. P. 355–367. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.09.011>.
10. Yao Z. et al. Service operations of electric vehicle carsharing systems from the perspectives of supply and demand: A literature review. *Transportation Re-*

search Part C: Emerging Technologies. 2022. Vol. 140. P. 103702. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103702>.

11. Scorrano M., Danielis R. Simulating electric vehicle uptake in Italy in the small-to-medium car segment: A system dynamics/agent-based model parameterized with discrete choice data. *Research in Transportation Business & Management*. 2021. P. 100736. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2021.100736>.

12. Wen W. et al. Impacts of COVID-19 on the electric vehicle industry: Evidence from China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021a. Vol. 144. P. 111024. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111024>.

13. Kuznetsova E. Yu., Amosov N.A. Application of life cycle contracts in the transport industry: problems and prospects // *Herald of the Ural State University of Railway Transport* 2022. № 1 (53). DOI: 10.20291/2079-0392-2022-1-92-101 (in Russ.)

14. Nikitin Yu. A., Vasil'ev N. I., Detkov G. B. Osobenosti kontrakta zhiznennogo cikla [Life Cycle Contract Features]. *Teoriya i praktika servisa: ekonomika, social'naya sfera, tekhnologii*. 2019; 2 (40): 33–41. ISSN 2078-5852. (in Russ.)

15. Turgeneva V. V., Sekerin V. D. «Kontrakt zhiznennogo tsikla» v sfere transportnoj infrastruktury kak novyy mekhanizm gosudarstvenno-chastnogo partnerstva [«Life cycle contract» in the field of transport infrastructure as a new mechanism of public-private partnership]. *Modernizatsiya. Innovatsii. Razvitie*. 2017; 8 (4): 536–543. ISSN 2079-4665. (in Russ.)

16. Rakuta N. V. Ispol'zovanie kontraktov zhiznennogo tsikla pri goszakupkakh. Opyt razvitykh stran [The use of life cycle contracts in public procurement. Experience of developed countries *Voprosy gosudarstvennogo i munitsipal'nogo upravleniya*. 2015; 2: 53–78. ISSN 1999-5431. (in Russ.)

17. Murugan M., Marisamynathan S. Elucidating the Indian customers requirements for electric vehicle adoption: An integrated analytical hierarchy process – Quality function deployment approach. *Case Studies on Transport Policy*. 2022. P. S2213624X22000694. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.03.017>.

18. Korczak J., Kijewska K. The Concept of Sustainable Development of Public Passenger Transport in Koszalin. *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 16. P. 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.021>.

19. Kuzmenko Ju. G., Savel'eva I. P., Kon'kova E. D. Logistika trgovogo obsluzhivaniya: modeli i metody territorial'nogo razmeshheniya ob'ektov rynochnogo hozjajstva - zarubezhnyj opyt [Logistics of trade services: models and methods of territorial placement of market facilities - foreign experience]. *Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika i menedzhment*. 2015. T. 9; 3: 159–168. ISSN 1997-0129. Author. 2022. (in Russ.)

20. Kuznetsova E. Yu., Amosov N.A. Organization of a unified recycling system for vehicles on the territory of Russia // *Herald of the Ural State University of Railway Transport* 2022. № 2 (54). DOI: 10.20291/2079-0392-2022-2-.

21. Jukish V. F. Analiz i problemy ispol'zovaniya trudovykh resursov Rossii [Analysis and problems of the use of labor resources in Russia]. *Aktual'nye problemy*

gumanitarnykh i estestvennykh nauk. 2016; 6-2: 112–116. ISSN 2073-0071. (in Russ.)

22. Liu J. et al. Impact of recycling effect in comparative life cycle assessment for materials selection - A case study of light-weighting vehicles. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 349. P. 131317. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131317>.

23. Bhadra U., Mishra P. P. Extended Producer Responsibility in India: Evidence from Recycal, Hyderabad. *Journal of Urban Management*. 2021. Vol. 10. No. 4. Pp. 430–439. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2021.07.003>.

24. Niemets K. et al. World cities in terms of the sustainable development concept. *Geography and Sustainability*. 2021. Vol. 2. № 4. Pp. 304–311. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.12.003>

25. Kowalska-Pyzalska A., Kott J., Kott M. Why Polish market of alternative fuel vehicles (AFVs) is the smallest in Europe? SWOT analysis of opportunities and threats. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 133. P. 110076. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110076>.

26. Leng J. et al. Blockchain-empowered sustainable manufacturing and product lifecycle management in industry 4.0: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 132. P. 110112. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110112>.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Амосов Н. А. Вклад в общую работу составил 50%. Участвовал в разработке следующих разделов научной статьи: аннотации, введения, материалов и методов, результатов, заключения.

Кузнецова Е. Ю. Вклад в общую работу составил 50%. Участвовала в разработке следующих разделов научной статьи: аннотации, введения, материалов и методов, результатов, заключения.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Nikita A. Amosov. The contribution to the overall work is 50%. Participation in the development of the following sections of a scientific article: abstract, introduction, materials and methods, results, conclusion.

Elena Yu. Kuznetsova. The contribution to the overall work is 50%. Participation in the development of the following sections of a scientific article: abstract, introduction, materials and methods, results, conclusion.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Амосов Никита Андреевич – аспирант кафедры организации машиностроительного производства.

Кузнецова Елена Юрьевна – д-р. экон. наук, проф.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikita A. Amosov – Postgraduate student, the Engineering Production Management Department.

Elena Yu. Kuznetsova - Dr. of Sci., Professor.

УДК 625.72.003.1
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-536-545>
EDN: OTBRNI
Научная статья



СХЕМА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН В ЦЕПОЧКАХ ПОСТАВОК В ТРАНСПОРТНЫХ УЗЛАХ

Ли Бинчжан

Донской государственный технический университет
г. Ростов-на-Дону, Россия
runa666.6@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2129-168X>

АННОТАЦИЯ

Введение. Эффективные грузовые перевозки в крупных транспортных узлах и управление ими имеют решающее значение для мировой торговли. Существующие системы организации грузовых перевозок не обеспечивают прослеживаемость, прозрачность, информационную безопасность и неизменность данных, хранящихся и обмениваемых в ходе различных операционных процессов. В результате это негативно сказывается на производительности транспортных узлов.

Материалы и методы. Использование цифровых приложений информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) в транспортной отрасли может привести к высокой автоматизации процессов и более экономичным решениям. Грузовые перевозки требуют использования обмена данными в режиме реального времени между различными участвующими в процессе заинтересованными сторонами. Традиционные логистические системы на базе ИКТ используют централизованную архитектуру для размещения и обработки данных и услуг. Однако централизованные логистические системы не могут обеспечить безопасный доступ к данным в режиме реального времени, оперативную видимость и доверие между участвующими организациями.

Результаты. Автоматизация различных функций транспортного узла с помощью «Интернета вещей» (IoT) и облачных вычислений может адекватно повысить производительность операций транспортного узла. Эти операции включают автоматизацию интерфейса транспортных средств, контейнерных площадок, внутрипортовой логистики и пункта приема терминала.

Обсуждение и заключение. В данной статье нами рассмотрены возможности для улучшения процесса путем интеграции информационного обмена между различными участниками с использованием сквозных технологий в транспортных узлах, в частности концепции блокчейн, для оптимизации операций в международной торговле путем интеграции и обмена информацией между участниками процесса перевозки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грузовые перевозки, информационно-коммуникационные технологии, транспортный узел, блокчейн, интеллектуальные транспортные системы, «Интернет вещей», смарт-контракт, сквозные технологии, облачные вычисления, логистические системы.

БЛАГОДАРНОСТИ. Автор выражает благодарность руководителю редакции журнала «Вестник СибАДИ» и рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 01.06.2022; одобрена после рецензирования 23.07.2022; принята к публикации 27.07.2022.

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: Ли Бинчжан. Схема использования технологии блокчейн в цепочках поставок в транспортных узлах // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19, № 4 (86). С. 536-545. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-536-545>

© Бинчжан Л., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-536-545>
EDN: OTBRNI

BLOCKCHAIN TECHNOLOGY USE CASE IN SUPPLY CHAINS IN TRANSPORT HUBS

Li Binzhang

Don State Technical University

Rostov-on-Don, Russia

runa666.6@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2129-168X>

ABSTRACT

Introduction. Efficient freight transport and management in large transportation hubs is crucial to world trade. Existing freight management systems fail to ensure traceability, transparency, information security and consistency of data stored and exchanged during the various operational processes. As a result, this has a negative impact on the performance of transport hubs.

Materials and methods. The use of digital information and communication technology (ICT) applications in the transport industry can lead to highly automated processes and more cost-effective solutions. Freight transport requires the use of real-time data exchange between different stakeholders involved in the process. Traditional ICT-based logistics systems use a centralised architecture to host and process data and services. However, centralised logistics systems cannot ensure secure access to real-time data, operational visibility and trust between participating organisations.

Results. Automation of various transport hub functions using the Internet of Things (IoT) and cloud computing can adequately improve the performance of transport hub operations. These operations include automation of vehicle interface, container yards, intra-port logistics and terminal receiving point.

Discussion and Conclusions. In this paper, we have explored opportunities for process improvement by integrating information exchange between different actors using end-to-end technologies in transport hubs, in particular the concept of blockchain, to optimise operations in international trade by integrating and sharing information between actors in the transport process.

KEYWORDS: freight; information and communication technology; transport hub; blockchain; intelligent transport systems; Internet of things; smart contract, end-to-end technology; cloud computing; logistics systems.

ACKNOWLEDGEMENTS. The author would like to thank the supervisor, the editorial board of the Russian Automobile and Highway Industry Journal and the reviewers of the article.

The article was submitted 01.06.2022; approved after reviewing 23.07.2022; accepted for publication 27.07.2022.

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: Li Binzhang Blockchain technology use case in supply chains in transport hubs. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (4): 536-545. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-536-545>

© Binzhang L., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

Технология блокчейн в паре со смарт-контрактами – это надежный метод автоматизации бизнес-правил в эффективном и доверительном механизме. Смарт-контракт – это самоисполняющийся фрагмент кода, который работает на платформе блокчейн. Предопределенные правила между участвующими организациями переводятся в функции смарт-контракта для установления доверия.

Проблема разработки научных и методических положений, способствующих решению задач грузовых перевозок в транспортных узлах, рассматривается как актуальная, причем как в теоретико-методологическом смысле, так и в отношении организационно-методических решений.

На транспорте цифровые технологии как научно-прикладной инструментарий находят самое широкое применение. Теоретической и научно-методической базой развития школы транспорта являются труды российских и китайских ученых и специалистов-транспортников (И. Е. Агуреев, С. Ш. Аkenов, Ю. О. Баранова, Бянь Синь, А. В. Вельможин, А. М. Гаджинский, ГеФувэй, Л. В. Еремина, С. В. Жанказиев, В. В. Зырянов, В. А. Корчагин, В. М. Курганов, В. С. Лукинский, Л. Б. Миротин, Ю. Н. Ризаева, В. И. Сергеев, Фань Шицин, Ю Цзе, Ян Ган, Ян Вэй Се Лэй, Чжан Фэшун, Чжан Дин, Чжао Синьфэй, Чжэн Чунхун, Шен Пэйи, С. А. Ширяев и др.) в области транспорта, теории развития транспортных узлов, моделирования транспортных систем, развития контейнерных, интермодальных перевозок, повышения качества транспортного обслуживания и ряду других вопросов.

Теоретической основой исследования являются теоретико-методологические и практические разработки как российских, так и китайских ученых в области науки и техники, занимающихся исследованием и совершенствованием технологии и организации перемещения грузов, процессами, обеспечивающими эти перемещения, их взаимодействием с природой и обществом. Значение решения научных и практических проблем данной специальности для экономики состоит в совершенствовании методов и средств перемещения грузов и процессов, их обеспечивающих, в целях повышения эффективности транспортного обслуживания и минимизации затрат ресурсов и потерь, связанных с ними.

Исследование выполнено в следующих областях исследований, указанных в паспорте научных специальностей 2.9.4 – Управление

процессами перевозок: п.7. «Развитие технических средств и систем управления, цифровизация управления транспортными технологическими процессами» и п. 15. «Управление перевозочными процессами с использованием грузоперерабатывающей инфраструктуры транспортных коридоров, транспортных узлов и стыковых пунктов». Разработка и внедрение транспортных узлов является одним из эффективных путей экономического и социального развития как отдельных регионов стран, так и России и Китая в целом. Новый подход к транспорту как к составной части производственно-распределительной системы приводит к необходимости рассмотрения его в соответствующих аспектах. Переход на цифровую концепцию управления перевозками грузов позволяет существенно повысить эффективность и качество транспортного обслуживания потребителей. Концепция цифровизации стимулирует целостный подход к управлению грузовыми перевозками при внешнеэкономических операциях [1, 2, 3, 4, 5].

Созданная теоретическая база позволяет решать проблемы, связанные с разработкой и внедрением инструментов цифровизации в деятельность грузовых перевозок в транспортных узлах. Необходимость проработки данного вопроса, актуальность определили выбор темы, постановку цели и задач, основные направления исследования.

Целью исследования является повышение эффективности организационно-функциональной деятельности транспортных узлов посредством цифровизации. Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- обосновать предпосылки применения технологии блокчейн к управлению организационно-функциональной деятельностью транспортного узла;
- спроектировать системы управления грузовыми перевозками в транспортных узлах с использованием сквозных технологий при перевозке грузов;
- представить схемы использования смарт-контрактов в транспортных узлах.

Объектом исследования выступают транспортные узлы, в частности Шанхайский морской порт. Предмет исследования – организация и управление грузовыми перевозками под влиянием сквозных технологий, в частности блокчейн, формирующего транспортную привлекательность и обуславливающего экономическую активность в транспортных потоках.

Обоснование и подтверждение достовер-

ности теоретических результатов проводилось путем сравнения с результатами ранее проводимых исследований других авторов.

Научная новизна работы определяет возможности технологии блокчейн во многих потенциальных приложениях в процессе грузовых перевозок в транспортных узлах. Кроме того, предложены основанные на блокчейн структуры, архитектуры и схемы последовательности для доверенных операций между различными заинтересованными сторонами в транспортном узле на примере порта Шанхай.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования заключается в разработке и создании карты логистических операций и услуг порта с целью выделить компоненты системы, альтернативные варианты развертывания, участников и определение ролей, методики применения технологии блокчейн в транспортных узлах и возможности ее использования при принятии решений по развитию транспортной инфраструктуры соответствующего уровня.

Использование в практической деятельности транспортных предприятий методических и организационных рекомендаций способствует финансовой устойчивости, предотвращению потерь, повышению надежности функционирования и эффективности принятия управленческих решений. Значимость исследования подтверждена документами о внедрении. Получено свидетельство на программу для ЭВМ «Программа организации грузовых перевозок с использованием технологии блокчейн и смарт-контракта для цепочек поставок LCL».

Технология блокчейн обеспечивает прослеживаемость, прозрачность, проверяемость посредством неизменяемых данных о происхождении доверенных транзакций в цепи, децентрализованно, без посредников или доверенных третьих сторон. В исследовании мы рассмотрели потенциальную роль технологии блокчейн в преобразовании портовых логистических операций и услуг, способы использования, которые улучшают обслуживание в транспортных узлах. Кроме того, мы используем архитектуру блокчейн с разрешением для создания карты портовых логистических услуг, чтобы выделить компоненты системы, участников и альтернативные варианты развертывания для автоматизации перевозок в транспортных узлах [6]. Поскольку в блокчейне отслеживается движение всех биткоинов с момента их создания, по бухгалтерской книге можно проверить, кому именно принадлежит тот или иной биткоин в любой момент време-

ни. Этот механизм владения, который помогает отслеживать биткоины, называется текущим «состоянием» блокчейна. Транзакция происходит только тогда, когда она добавляется в блок. По мере добавления новых блоков состояние блокчейна обновляется. Поскольку все транзакции обновляются в блокчейне, пользователь может в любой момент получить доступ к блокчейну и посмотреть, какие транзакции были совершены [7, 8, 9].

Блокчейн – это технология, которая облегчает одноранговую P2P (англ. peer-to-peer, P2P – равный к равному) передачу ценностей [10]. Технология блокчейн в паре со смарт-контрактами – это надежный метод автоматизации бизнес-правил в эффективном и доверительном механизме [11].

Смарт-контракт – это самоисполняющийся фрагмент кода, который работает на платформе блокчейн. Предопределенные правила между участвующими организациями переводятся в функции смарт-контракта для установления доверия. Предопределенные правила между участвующими организациями переводятся в функции смарт-контракта для установления доверия.

Внедрение блокчейн-подхода к построению и функционированию транспортных узлов как в Китае, так и во всем мире ускорит продвижение материальных потоков, развитие контейнерных перевозок грузов в интермодальном сообщении, обеспечение высокого транспортно-логистического сервиса в транспортных узлах, сократит запасы в производстве, снабжении и сбыте, снизит себестоимость производства и затраты в дистрибуции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Нами разработан смарт-контракт для цепочки поставок в транспортных узлах. Предлагаемая схема использования технологии блокчейн и смарт-контракта в цепочках поставок позволяет обеспечить более надежное и точное представление репутации стороны в перевозочном процессе [3]. В данной работе мы предлагаем создать платформу экспорта LCL с использованием концепции блокчейн для оптимизации операций LCL для международной торговли КНР путем интеграции и обмена информацией между экспедиторскими агентствами и их клиентами. Рассмотрена и предложена к работе блокчейн-модель для операций по снижению загрузки контейнеров в Китае. Разработаны смарт-контракты на Ethereum с целью демонстрации работы платформы.

Схема использования технологии блокчейн направлена на использование смарт-контрактов для решения трех основных задач в управлении цепочкой поставок:

- 1) определение происхождения товара;
- 2) отслеживание продвижения товаров по цепочке поставок;
- 3) укрепление доверия через открытую базу данных партнеров по цепочке поставок, включая их репутацию.

ОЕМ («original equipment manufacturer» – оригинальный производитель оборудования) является центральной организацией и отвечает за координацию цепочки поставок. Остальные стороны обозначены как сторона предложения или сторона спроса. Поставщик А получает сырье и отправляет его поставщику В, производящему отдельные компоненты. Затем детали отправляются производителю оборудования, собирающему конечный продукт. Продукт отправляется дистрибьютору, который распределяет его розничному продавцу для продажи потребителю.

Предлагаемая схема работает в цепочке блоков, к которой будут иметь доступ все партнеры по цепочке поставок (потребители могут получить доступ к определенным функциям, таким как проверка происхождения). Он может быть развернут и администрирован как основной организацией, так и нейтральной третьей стороной (например, запуском блокчейн, таким как Provenance, Modum.io) [12, 13].

Предостережение заключается в том, что по-прежнему требуется некоторый уровень существующего доверия к стороне, управляющей блокчейном, поэтому он не является полностью безнадежным. Тем не менее это позволит лучше контролировать и выполнять посреднические действия в случае, если что-то пойдет не так.

Чтобы определить происхождение, поставщик 1 (источник цепочки поставок) должен будет записать свои данные и сведения о своем грузе в блокчейн. Благодаря интеграции с интеллектуальным датчиком, место и время отгрузки могут быть неизменными. Это позволит любой из других сторон, включая потребителя, получить доступ к информации через цепочку блоков (рисунок 1). Предоставляя быстрый способ определения происхождения, поставщики сырья остаются подотчетными, и стороны могут легко проверить источник своей продукции.

Для отслеживания продукта в цепочке поставок каждая сторона должна будет записывать данные в блокчейн всякий раз, когда они отправляют или получают партию. Когда груз будет получен, принимающая сторона подтвердит, что все в порядке. Если груз прибывает вовремя, в правильное место (проверяется интеллектуальными датчиками), отправителю производится оплата в виде криптовалюты [14].

На рисунке 2 показан пример: OEM-производитель заранее определяет приемлемое время выполнения заказа и правильное место для каждого этапа отгрузки (шаг 1). Поставщик 1 записывает детали в блокчейн, когда он отправляет сырье поставщику 2 (шаг 2). Когда поставщик 2 получает груз, он также записывает детали (шаг 3). Смарт-контракт проверяет соответствие отгрузки и соответствие заданным критериям. Если все в порядке (шаг 4, а), производится платеж от OEM поставщику 1 (шаг 5); в противном случае срабатывает предупреждение, чтобы стороны могли исправить любые проблемы (шаг 4, б). Автоматическое отслеживание и оплата помогут упростить процессы в цепочке поставок и предоставить обновления в режиме реального времени о статусе груза, чтобы стороны могли оставаться гибкими в случае непредвиденных обстоятельств.

Наконец, чтобы поддерживать открытую базу данных информации, все стороны в цепочке поставок должны записывать свои данные в цепочку блоков. Кроме того, может отображаться оценка репутации. Простой способ определить репутацию стороны – это подсчитать количество успешных отправок (т. е. оригинальный товар, количество, местоположение и вовремя) в процентах от общего количества выполненных отправок. Это можно включить как часть смарт-контракта для отслеживания товаров, и смарт-контракт базы данных может получить доступ к оценке репутации, вызвав этот контракт [15]. Его можно обновлять по мере увеличения количества поставок (рисунок 3). Открытая база данных будет стимулировать стороны работать над поддержанием хорошей репутации и поможет укрепить доверие между сторонами с большей прозрачностью.

Управление этими смарт-контрактами в блокчейн выгодно, поскольку оно обеспечивает неизменяемую запись, которую можно легко проверять и которая открыто доступна для соответствующих сторон.

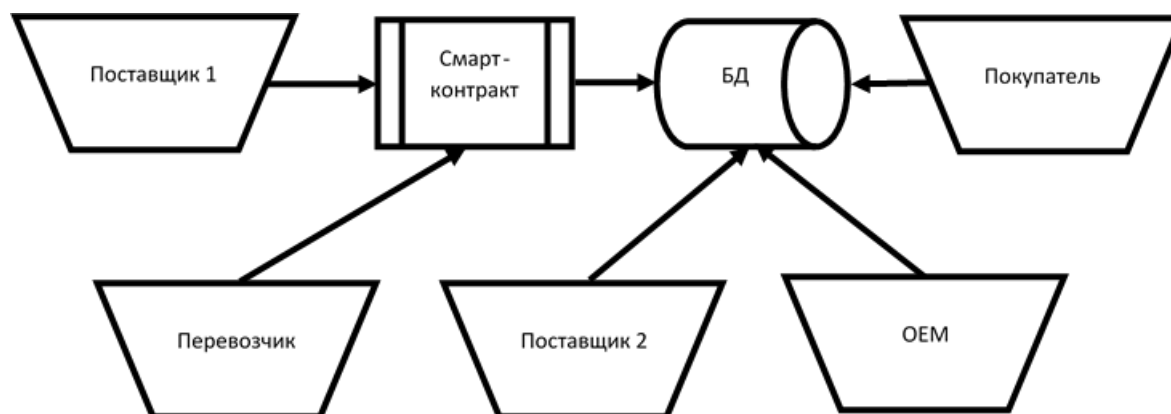


Рисунок 1 – Использование смарт-контрактов для определения происхождения сырья
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Using smart contracts to determine the origin of raw materials
Source: compiled by the author.

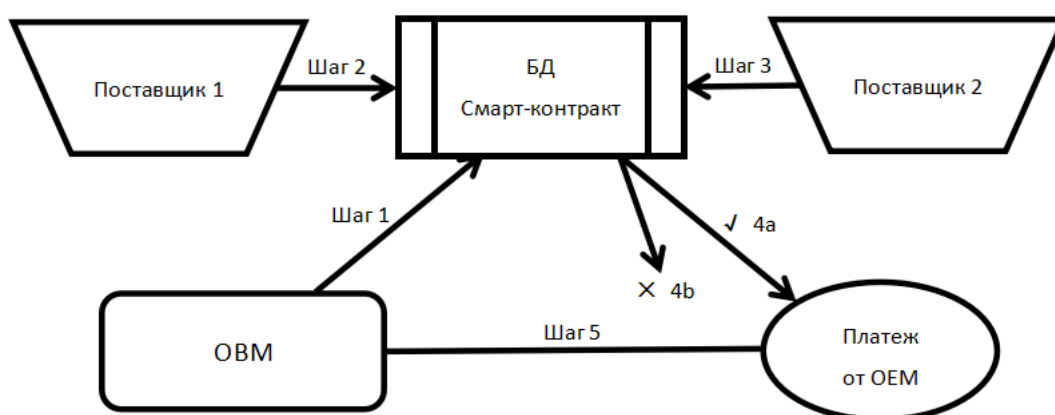


Рисунок 2 – Использование смарт-контрактов для отслеживания товаров и выполнения платежей
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Using smart contracts to track goods and make payments
Source: compiled by the author.

Помимо хэшей транзакций, которые генерируются каждый раз, когда транзакция успешно записывается в блокчейн, использование событий помогает четко указать, когда произошли соответствующие транзакции (например, когда товары были отправлены, получены или когда платеж был выполнен). Они также запускают оповещения, когда определенные

транзакции неуспешны, чтобы стороны могли быстро и легко определить проблему и работать над ее оперативным исправлением. Это более эффективно, чем используемые в настоящее время частично автоматизированные системы, в которых ошибки могут оставаться незамеченными в течение длительного периода времени.

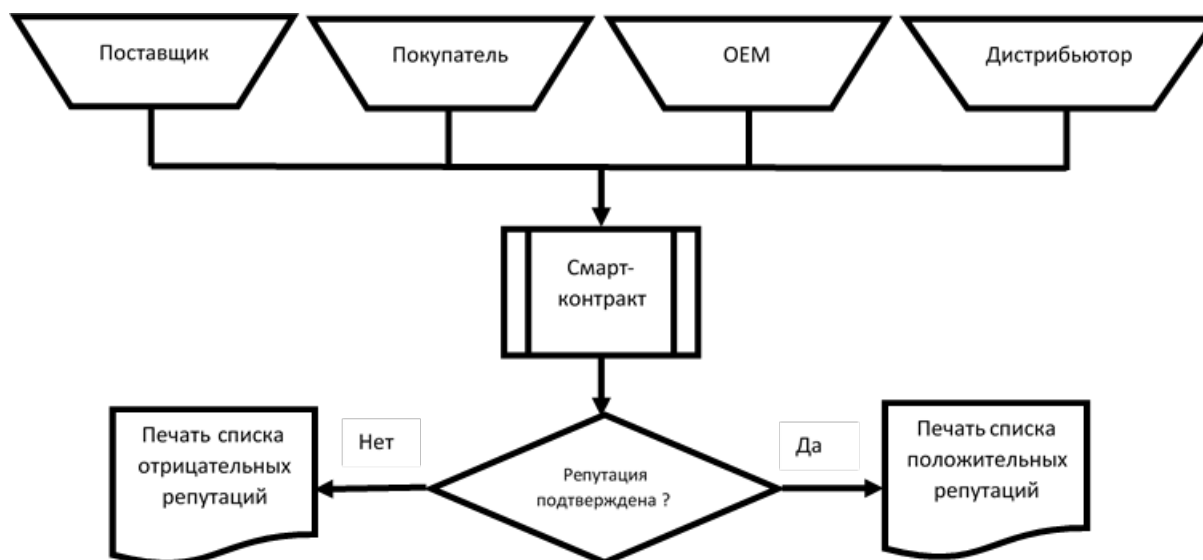


Рисунок 3 – Использование смарт-контрактов для открытой базы данных и управления репутацией
Источник: составлено автором.

Figure 3 – Using smart contracts for open database and reputation management
Source: compiled by the author.

Наличие стандартного шаблона контракта также гарантирует, что все стороны одинаково обмениваются информацией. Это снижает риск неправильной интерпретации или потери информации из-за использования разных типов форм и устраняет необходимость поддерживать разные методы ввода данных. В целом эффективность всей цепочки поставок повышается, поскольку больший объем информации передается легко полученный, помогая сторонам оставаться на той же странице.

Значительное преимущество использования смарт-контрактов в управлении цепочкой поставок основано на их способности взаимодействовать с устройствами IoT, такими как интеллектуальные датчики, для получения информации в реальном времени.

Поэтому для получения внешних данных, например от интеллектуальных датчиков, им необходимо полагаться на «оракулов». Оракул (или поток данных) – это доверенная сторонняя служба, которая получает запрашиваемые реальные данные и отправляет их в блокчейн для использования смарт-контрактами [16, 17]. В частности, аппаратные оракулы получают информацию из физического мира, например интеллектуальные датчики. Проблема, с

которой они сталкиваются, – обеспечение безопасной передачи данных без вмешательства. Как вариант – использование криптографической защиты в датчиках для предотвращения несанкционированного доступа. Такие датчики можно использовать в качестве аппаратных оракулов, связывающих реальные данные с блокчейном [17].

Хотя блокчейн обещает разрешить обмен данными в системе без доверия, с помощью своей децентрализованной технологии, проверка концепции в ее текущем состоянии по-прежнему требует определенного уровня доверия, поскольку есть некоторые функции, которые контролируются администратором контрактов. Следовательно, должно быть неявное доверие к тому, что администратор (будь то центральная организация в цепочке поставок или нейтральный сторонний поставщик решений для цепочки блоков) не будет злоупотреблять своими дополнительными полномочиями.

Сохраняется определенный риск мошенничества из-за неточного сообщения информации партнерами по цепочке поставок или фальсификации товаров. Даже несмотря на то, что внедрение защищенных от взлома ап-

паратных оракулов может в некоторой степени предотвратить это, необходимо провести дополнительные исследования, чтобы изучить другие способы снижения риска нарушений безопасности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Использование смарт-контрактов в управлении цепочкой поставок позволяет решить многие из проблем и даже потенциально может произвести революцию в отрасли. Поэтому неудивительно, что крупные игроки отрасли выделяют значительные ресурсы на технологию блокчейн. IBM сделала свое программное обеспечение блокчейн открытым, запустив Hyperledger Foundation для сотрудничества в области технологий блокчейн в разных отраслях и странах, чтобы ускорить их разработку в направлении массового коммерческого внедрения. Он установил партнерские отношения с гигантами в области цепочки поставок, работая с Maersk над отслеживанием транспортных контейнеров по всему миру и предотвращением подделки отгрузочных документов [18].

Другая компания, Mojix, предлагает использовать платформу Microsoft BaaS для внедрения отслеживания запасов в режиме реального времени без помощи рук с помощью RFID. Отслеживая доставку товаров на каждом этапе, повышается доверие и снижаются накладные расходы. Эта технология также может использоваться для управления запасами, предоставляя «самую последнюю информацию о запасах и пополнении запасов на уровне SKU (складской единицы), отдела или магазина» [18].

Сама по себе тема цифровизации грузовых перевозок в транспортных узлах с использованием технологии блокчейн сегодня очень актуальна. Степень развития грузовых перевозок в транспортных узлах существенно влияет на уровень цен, на обеспеченность населения промышленными и продовольственными товарами, на экологическую обстановку и другие процессы [19]. Транспортно-логистический сектор Китая чрезвычайно сложен. Десятки тысяч компаний борются за долю этого быстро растущего рынка, общая стоимость которого с середины 2000-х годов увеличилась более чем в два раза. Переход Китая к экономике, в большей степени ориентированной на потребление, в сочетании с улучшением доступности внутренних регионов, направил внимание отрасли от внешней ориентации к

удовлетворению потребностей новых внутренних рынков. На таком большом и разнообразном рынке многие компании добились успеха, экспериментируя и находя свою нишу. Сложность рынка приводит к тому, что крупнейшие операторы с оптимизированными процессами и более адаптируемыми и масштабируемыми бизнес-моделями оказываются в еще более выгодном положении.

По мере роста внутренних потребительских рынков и расширения инвестиций в новые внутренние регионы транспортная и логистическая инфраструктура Китая сталкивается с новыми проблемами и новым вниманием со стороны бизнеса и государственных органов планирования. Высокие темпы экономического роста Китая, стимулируя спрос на логистические услуги, также создают проблемы для операторов.

Поощрение роста частного потребления и продвижение китайской промышленности вверх по цепочке создания стоимости поможет в этом отношении. По мере того как в стране будет развиваться сфера услуг и высокотехнологичные отрасли, компаниям потребуется более мощная логистическая поддержка для повышения эффективности их работы. В свою очередь это потребует более совершенных методов управления, более широкого использования информационных технологий и систем, способных интегрировать и контролировать перемещение товаров и материалов как по стране, так и внутри страны и за ее пределами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное исследование посвящено проблеме цифровизации грузовых перевозок и изучению роли блокчейна в решении этой проблемы. В результате исследования было установлено, что блокчейн может выступать в качестве вспомогательного средства и улучшить существующий процесс в отрасли контейнерных перевозок. Благодаря неизменяемой природе блокчейна, он обладает потенциалом для укрепления доверия между участниками перевозочного процесса, такими как таможенники, грузоотправители, экспедиторы и т. д. [20].

Проведен анализ цепочки поставок и проблем в управлении цепочками поставок, что позволило сделать выводы: нами спроектирована система управления транспортным узлом с использованием технологии блокчейн в системе перевозок грузов и разработан смарт-контракт для цепочки поставок в транс-

портных узлах. Предлагаемая схема использования технологии блокчейн и смарт-контракта в цепочках поставок позволяет обеспечить более надежное и точное представление репутации стороны в перевозочном процессе.

В данной работе мы предлагаем создать платформу экспорта LCL с использованием концепции блокчейн для оптимизации операций LCL для международной торговли КНР путем интеграции и обмена информацией между экспедиторскими агентствами и их клиентами.

Рассмотрена и предложена к работе блокчейн-модель для операций по снижению загрузки контейнеров в Китае. Разработаны смарт-контракты на Ethereum с целью демонстрации работы платформы.

Рассчитаны результаты моделирования двух сценариев до и после внедрения технологии блокчейн на объекте внедрения. В настоящее время правительство Китая активно поддерживает такие меры. В 2018 г. правительство запустило «План по корректировке и оптимизации логистической отрасли». Его целью стала рационализация отрасли путем поощрения таких практических мер, как установление технологических и других стандартов, ускорение темпов слияний и поглощений, поддержка схем обучения и повышение использования информационных технологий за счет инвестиций в исследование и разработку, применение новых технологий, актуальных для отрасли [19]. Основные положения этого плана были дополнены более конкретными мерами, последним стал комплекс из восьми мер, объявленный Госсоветом в 2019 г. В совокупности изменение формы внутреннего рынка Китая, акцент чиновников на улучшение работы логистического сектора и амбиции различных корпоративных игроков приведут к преобразованию отрасли в течение ближайшего десятилетия, хотя, скорее всего, постепенно, а не одним смелым рывком вперед.

Учитывая вышеперечисленные проблемы, с которыми сталкивается индустрия грузовых перевозок, мы пытаемся оценить, могут ли современные и перспективные технологии, такие как блокчейн, помочь в снижении такой неэффективности [20].

Существует необходимость в разработке комплексной информационной системы, использующей передовые информационные технологии для улучшения управления терминалом, обмена информацией между транспортными компаниями и обслуживания клиен-

тов грузового терминала. Также необходимо исследовать технологические возможности технологий для всей системы, их потенциальные затраты и выгоды.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Blockchain in 2017: The Year of Smart Contracts <https://www.pcmag.com/article/350088/blockchain-in-2017-the-yearof-smart-contracts> Retrieved: Oct, 2017
2. Wang, F.-Y. (2014). Complex Systems and Complexity Science, 1 (4), 25-35.
3. Eremina, L., Mamoiko, A., & Bingzhang, L. (2020). Use of blockchain technology in planning and management of transport systems. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015704014>
4. Li Bingzhang, Vladimir Zirianov (2021). Blockchain in agricultural supply chain management. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127308029>
5. Wang, F.-Y. (2014). Control and Decision, 19 (5), 485-489.
6. Nozdrev S. China in the system of world finance. World Economy and International Relations, 2016, Vol. 60, No. 10, p.29-40.
7. Daniel S. Markey and James West (2016). Behind China's Gambit in Pakistan. https://www.cfr.org/expert-brief/behind-chinas-gambit-pakistan?cid=soc-facebook-in-behind_chinas_gambit_pakistan-080916
8. Yang, C.-S. & Lirn, T.-C. (2017). Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag., 47, 884-905.
9. Dong Suocheng, Cheng Hao, Guo Peng, Li Fujia, Li Yu, Li Zehong, Zhang Xiaoxiao. Transportation Industry of the Belt and Road. Bulletin of Chinese Academy of Sciences (In Chinese), 2016, vol. 31, no 6, pp. 663-668. DOI: 10.16418 / j.issn.1000-3045.2016.06.003
10. 刘卫东. “一带一路”战略的认识误区. [Misunderstandings of BRI (In Chinese)]. Journal of Chinese Academy of Government, 2016, no. 1, pp. 30-34.
11. Bair J. Commodity Chains in and of the World System. Journal of WorldSystem Research, 2014, vol. 20. no. 1, pp. 1-10.
12. Yu, N.; De Jong, M.; Storm, S.; Mi, J. The growth impact of transport infrastructure investment: A regional analysis for China (1978–2008). Policy Soc. 2012, 31, 25–38.
13. Chen Lurong, De Lombaerde P. China Moving Up the Value Chain: What Can Be Learned from the Asian NICs? International Area Studies Review, 2013, no. 16 (4), pp. 407-430. DOI: 10.1177 / 2233865913507441
14. Yuan, Y. & Wang, F.-Y. (2016). ActaAutomaticaSinica, 42 (4), 481-494.
15. Zhang, J.-P., Wang, F.-Y., Wang, K.-F., Lin, W.-H., Xu, X. & Chen, C. (2011). IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 12, 1624-1639.
16. Luan, X.; Cheng, L.; Yu, W.; Zhou, J. Multimodal Coupling Coordination Analysis at the Comprehensive Transportation Level. J. Transp. Syst. Eng. Inf. Technol. 2019, 3, 27–33.

17. Yeung H.W.C. Historical Context: Finance, Geopolitics and Bureaucracy. Area Development and Policy, 2017, no. 2 (1), pp. 1-23 DOI: 10.1080 / 23792949.2016.1264868

18. Hong, J.; Chu, Z.; Wang, Q. Transport infrastructure and regional economic growth: Evidence from China. Transportation 2011, 38, 737–752.

19. Li, Bingzhang, LubaEremina. Development of the transport corridor “The New Silk Road” in China. Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration” - Reports in English. Part 2. (December 12, 2018. Beijing, PRC) p. 208-215

20. Li Bingzhang, LubaEremina, Elena Semchugova, Anton Volohov, Anton Mamoiko, Elena Shatalova/ Innovative use of blockchain technology

in the logistics industry/ / Proceedings of International Conference on Finance, Entrepreneurship and Technologies in Digital Economy (FETDE 2020), St. Petersburg University of Management Technologies and Economics, St. Petersburg, Russia, p. 629-638 <https://doi.org/10.15405/epsbs.2021.03.79>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ли Бинчжан – аспирант кафедры «Организация перевозок и дорожного движения».

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Li Bingzhang, postgraduate student, Transport and Traffic Management Department.

УДК 621.757
 DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-546-559>
 EDN: PYNRLX
 Научная статья



ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ С ПОДЛОЖКОЙ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАНСПОРТА, РАБОТАЮЩИХ ПРИ ГИДРОАБРАЗИВНОМ ИЗНАШИВАНИИ

А. Н. Котомчин

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

*Приднестровский государственный университет им. Т. Г. Шевченко,
Молдова, Приднестровье, г. Тирасполь
aleshka81@list.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4750-525>*

АННОТАЦИЯ

Введение. В процессе хромирования деталей автомобилей необходимо получать хромовые покрытия с высоким качеством с заданными физико-механическими свойствами. Поэтому электрохимическая обработка перед нанесением покрытий играет решающую роль в процессе формирования покрытий с высокой контактной прочностью и износостойкостью. Исследование процесса электрохимической обработки позволит разработать рекомендации для получения качественных покрытий при восстановлении деталей автотранспорта.

Материалы и методы. Для проведения достоверных исследований применялось необходимое оборудование, которое позволяло получать данные с нужной точностью. Также для проведения математической обработки использовались современные средства обработки данных, которые исключали возможность ошибки и тем самым получить зависимости факторов с необходимой точностью.

Результаты. При использовании разработанного нового электролита хромирования возникла необходимость проведения исследований режимов и времени проведения электрохимической обработки перед нанесением покрытия деталей, изготовленных из сталей, содержащих хром, и упрочненных закалкой до твердости HRC 55–60. Исходя из полученных результатов было выявлено, что наибольшая прочность сцепления будет при использовании электрохимического травления с плотностью тока 130–140 А/дм² и времени выдержки 60–70 с. Также необходима активация в самом растворе хромирования с анодной плотностью тока 70–80 А/дм² и время проведения 30–40 с, с резким переключением на режим хромирования. Сделаны выводы по оптимизации электрохимической обработки поверхности перед хромированием с целью получения наибольшего сцепления с подложкой.

Обсуждение и заключение. В результате проведенных исследований электрохимической обработки детали перед хромированием получено, что при восстановлении деталей, работающих при гидроабразивном изнашивании, необходимо соблюдать заданные условия для получения качественных покрытий с высокой прочностью сцепления с сохранением высоких физико-механических свойств покрытия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: хромирование, прочность сцепления, электрохимическое травление, активирование, уравнение регрессии, время выдержки, плотность тока, оптимизация, подложка.

БЛАГОДАРНОСТИ. Благодарность рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 03.07.2022; одобрена после рецензирования 26.07.2022; принята к публикации 27.07.2022.

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: Котомчин А. Н. Влияние электрохимической обработки на прочность сцепления с подложкой при восстановлении деталей автотранспорта, работающих при гидроабразивном изнашивании // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 4 (86). С. 546-559. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-546-559>

© Котомчин А. Н., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-546-559>
EDN: PYNRLX

EFFECT OF ELECTROCHEMICAL TREATMENT ON SUBSTRATE ADHESION STRENGTH IN THE RESTORATION OF MOTOR VEHICLE PARTS OPERATING UNDER HYDROABRASIVE WEAR

Aleksei N. Kotomchin

*Moscow State Automobile and Highway Technical University (MADI),
Moscow, Russia*

*Pridnestrovian State University named after T. G. Shevchenko
Tiraspol, Moldova*

aleshka81@list.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4750-525>

ABSTRACT

Introduction. In the process of chrome plating of car parts, it is necessary to obtain high-quality chrome coatings with specified physical and mechanical properties. Therefore, electrochemical treatment before coating plays a crucial role in the formation of coatings with high contact strength and wear resistance. The study of the electrochemical treatment process will make it possible to develop recommendations for obtaining high-quality coatings when restoring vehicle parts.

Materials and methods. To conduct reliable research, the necessary equipment was used, which made it possible to obtain data with the necessary accuracy. Also, modern data processing tools were used to carry out mathematical processing, which excluded the possibility of error and thereby obtain the dependences of factors with the necessary accuracy.

Results. When using the developed new chromium plating electrolyte, it became necessary to conduct studies of the modes and time of electrochemical treatment before coating parts made of steels containing chromium and hardened to HRC 55-60 hardness. Based on the results obtained, it was found that the greatest adhesion strength will be when using electrochemical etching with a current density of 130-140 A/dm² and a holding time of 60-70 s. It is also necessary to activate in the chrome plating solution itself with an anode current density of 70-80 A/dm² and a time of 30-40 s, with a sharp switch to the chrome plating mode. Conclusions are drawn on the optimization of electrochemical surface treatment before chrome plating, in order to obtain the greatest adhesion to the substrate.

Discussion and conclusion. As a result of the conducted studies of the electrochemical processing of the part before chrome plating, it was possible to obtain that when restoring parts operating under waterjet wear, it is necessary to observe the specified conditions for obtaining high-quality coatings with high adhesion strength while maintaining high physical and mechanical properties of the coating.

KEYWORDS: chrome plating, adhesion strength, electrochemical etching, activation, regression equation, exposure time, current density, optimization, substrate.

ACKNOWLEDGMENTS. Thanks to the reviewers of the article.

The article was submitted 03.07.2022; approved after reviewing 26.07.2022; accepted for publication 27.07.2022.

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: Kotomchin Aleksei N. Effect of electrochemical treatment on substrate adhesion strength in the restoration of motor vehicle parts operating under hydroabrasive wear. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2022; 19 (4): 546-559. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-546-559>

© Kotomchin A. N., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

Специализированный автотранспорт эксплуатирует для управления рабочими процессами гидропривод. Из источника [1] известно, что наибольший процент неисправностей гидропривода приходится на гидрораспределители и гидронасосы, у которых ресурсопределяющими деталями являются золотники и плунжера. Даже незначительный износ их приводит к потере работоспособности агрегата и автомобиля в целом.

В основном восстановление деталей, работающих при гидроабразивном изнашивании, на предприятиях, эксплуатирующих специализированный автотранспорт, не производится. При ремонте агрегатов гидропривода происходит замена на новые или заранее отремонтированные, что увеличивает стоимость эксплуатации в целом. Поэтому восстановление деталей в условиях отсутствия оригинальных деталей становится востребованным и экономически целесообразным.

Хромирование – один из способов электрохимического наращивания хрома, который используют для упрочнения или восстановления деталей автотранспорта и дорожно-строительных машин. Хром обладает достаточно хорошими свойствами – износостойкостью, высокой твердостью, стойкостью к низким температурам, отсутствием термического влияния на поверхности детали, хорошим сцеплением с основой детали и т. д. [2, 3].

Однако при разработке новых электролитов, при которых используют различные органические и неорганические добавки, возникает дополнительная потребность в исследованиях прочности сцепления с основной поверхностью детали, в особенности деталей, изготовленных из стали с добавлением хрома при последующей закалке.

В результате проведенного литературного анализа было выявлено, что основными операциями, влияющими на прочность сцепления, являются электрохимическое травление и активирование.

Поэтому электрохимическое травление используют с целью ускорения процесса травления и повышения прочности сцепления электролитических хромовых покрытий. Оно отличается от химического тем, что процесс происходит при пропускании через детали и

раствор электрического постоянного тока от внешнего источника, при этом скорость травления увеличивается в десятки раз, уменьшается расход кислоты [4, 5].

Для травления черных металлов обычно используют растворы кислот, чаще серной, и солей соответствующих металлов. Детали закладывают в ванну и включают в качестве катода или анода в электрическую цепь. Различают катодное и анодное травление.

Наиболее распространенным считается анодное травление. Оно происходит за счет электрохимического растворения металла, химического растворения и механического отрывания оксидов от поверхности металла выделяющимся на аноде кислородом. Обычно для анодного травления стали применяют серную кислоту концентрации 200...250 г/л или подкисленные растворы сульфата или хлорида железа¹. Температура электролитов 20...60 °С, анодная плотность тока 5... 10 А/дм² [5, 6].

Обычно катодами при травлении в серно-кислом электролите служит свинец, а в хлористом – сталь. Продолжительность обработки зависит от состояния поверхности и режимов травления (чем выше температура раствора и плотность тока, тем больше скорость травления) и колеблется от 0,5 до 5 мин. Частицы шлама с поверхности металла удаляют так же, как и при химическом травлении.

Известно, что при катодном травлении на поверхности изделия бурно выделяется водород, который частично восстанавливает оксиды, разрыхляет их пленку и механически отрывает ее от поверхности металла. При этом исключается опасность перетравливания, однако происходит наводороживание поверхности (но значительно меньше, чем при химическом травлении), что повышает хрупкость и снижает сцепляемость покрытия. Кроме того, при катодном травлении процесс продолжается в 1,5 раза дольше, чем при анодном. Для предохранения стали от наводороживания применяют специальные растворы, содержащие соли свинца или олова. Иногда попеременно включают изделия в качестве катода и анода (или наоборот)². При такой обработке используют положительные стороны катодного и анодного процессов, что ускоряет травление, способствует уменьшению наводороживания и образования шлама [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14].

¹ Котомчин А. Н., Синельников А. Ф., Корнейчук Н. И. Сравнительная характеристика электролитов хромирования для восстановления и упрочнения деталей машин // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2020. № 7. С. 50–55.

² Петров Ю. Н., Корнейчук Н. И. [и др.] Прогрессивные способы восстановления деталей машин и повышения их прочности // Межвузовский сборник научных трудов. Кишинёв: Кишиневский сельскохозяйственный институт им. М. В. Фрунзе, 1979. С. 48–51.



Рисунок 1 – Образцы для исследования прочности сцепления на различных режимах
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Samples for the study of adhesion strength in various modes
Source: compiled by the author.

Активация – обработка поверхности покрываемого металла химическим или электрохимическим способом для снятия окисного слоя непосредственно перед получением покрытия. Она представляет собой окончательную операцию подготовки деталей, заключающуюся в легком травлении их поверхности и обеспечивающую высокую прочность сцепления покрытий. Ее проводят непосредственно перед погружением деталей в гальваническую ванну для покрытия или в самой ванне.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБОРУДОВАНИЕ

В качестве исследований был взят разработанный электролит хромирования состава: 420 г/л хромового ангидрида, 50 г/л карбоната кальция, 10 г/л сульфата никеля, 10 г/л сульфата кобальта и 0,65–0,9 г/л плавиковой кислоты [6].

В качестве образцов для исследований использовали стержни диаметром 10 мм, изготовленных из стали 40Х и закалённых до твердости HRC 55...60 (рисунок 1).

Травление проводили в электролите с содержанием 365 г/л серной кислоты (30%-ный раствор) и 15...20 г/л сернистого железа

($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) плотностью 1,23 г/см³ при температуре 18...25 °С. Для приготовления растворов рабочую ванну заполняли водой до половины объема. Затем осторожно добавляли серную кислоту при перемешивании, после чего ванну доливали водой до рабочего уровня.

Детали навешивали на анодную специальную подвеску. Катодами служили свинцовые пластины, площадь которых в 3...4 раза больше площади покрываемых поверхностей деталей. Стальные изделия обрабатывали при анодной плотности тока 20...150 А/дм² в течение 20...120 мин, используя специальную установку для поддержания необходимых режимов [15].

При данных режимах через некоторое время после начала травления напряжение на ванне повышается, а сила тока снижается. Это объясняется переходом металла из активного состояния в пассивное (пассивирование поверхности) и сопровождается бурным выделением кислорода. Пузырьки кислорода срывают травильный шлак, и обрабатываемая поверхность становится чистой, с отчетливо выявленной кристаллической структурой и специфическим микрорельефом³ [16, 17, 18, 19, 20].

³ Петроченкова И. В., Помогаев В. М., Волкович А. В. Особенности влияния температуры на рассеивающую способность электролитов // Сб. научных трудов: Успехи в химии и химической технологии. Новомосковск: НИ РХТУ, 2004. С. 44–51.

Контроль за качеством анодной обработки проводили визуально по изменению цвета. Нормально протравленная поверхность светло-серого, матового цвета, металлический блеск на отдельных участках или всей поверхности свидетельствует о недостаточной обработке, а тёмные полосы, чёрные точки на тёмно-сером общем фоне поверхности – о её перетравливании.

Активирование осуществляли непосредственно в растворе хромирования известного состава, при этом изменяли количество плавиковой кислоты и время активации. При этом определяли прочность сцепления с изменением параметров проведения процесса. Режимы проведения активации изменяли при анодной плотности тока $20 \dots 100 \text{ А/дм}^2$ в течение $10 \dots 60$ с при температуре электролита $18 \dots 35^\circ \text{C}$.

В процессе эксплуатации состав электролита изменялся. В нем постепенно накапливалось железо (при травлении деталей из черных металлов) и уменьшалась концентрация кислоты, в результате этого снижается скорость травления. Кроме того, вследствие испарения и уноса электролита деталями изменяется его концентрация и уровень. С помощью ареометра проверяли концентрацию электролита и, если необходимо, добавляли кислоту или воду.

При нарушении нормальной работы состав электролита травления проверяли химическим анализом [20, 21, 22].

Прочность сцепления измеряли с помощью матрицы и пресса гидравлического на 10 т. При этом прочность определялась исходя из давления, при котором происходило разрушение или повреждение хромового покрытия.

Математическую обработку полученных результатов исследований проводили с помощью программы Statistica.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При проведении исследований было получено, что наилучшую прочность сцепления хромовых покрытий с закалённой сталью 40Х можно получить после двукратной анодной обработки поверхностей деталей: электрохимического травления в разбавленной серной кислоте и активирования в рабочем растворе электролита хромирования. При этом существенное влияние на прочность сцепления оказывают режимы анодной обработки – продолжительность травления, анодная плотность тока. Кроме того, при проведении ак-

тивирования в рабочем растворе влияние на прочность сцепления оказывает количество плавиковой кислоты, которая может варьироваться в пределах $0,6 \text{--} 0,9 \text{ г/л}$ [22].

Предварительными исследованиями, проведёнными нами, была выбрана оптимальная анодная плотность тока 120 А/дм^2 при травлении в сернокислой ванне. При плотности анодного тока от 130 до 160 А/дм^2 продолжительность эффективного травления до начала перетравливания поверхности составляла соответственно 60 и 40 с. В интервале плотностей тока $100 \text{--} 120 \text{ А/дм}^2$ осуществляли травление поверхности без видимых следов перетравливания в течение $90 \text{--} 120$ с. Снижение анодной плотности тока от 100 до 60 А/дм^2 приводило к увеличению времени травления от 120 до 180 с соответственно, причем цвет обрабатываемой поверхности за всё время травления оставался серым, ближе к тёмно-серому. Дальнейшее снижение анодной плотности тока до 20 А/дм^2 приводило к увеличению длительности травления до 7 мин, причём на протяжении первых 90 с поверхность имела явно выраженный металлический блеск, свидетельствовавший о неэффективности анодного травления. В целях плавности управления процессом и повышения эффективности анодного травления нами была выбрана плотность 120 А/дм^2 .

В результате проведенных исследований было получено, что при этой плотности тока максимальное значение прочности сцепления достигается при продолжительности анодной обработки 30 с и достигает значения 285 МПа (рисунок 2). Дальнейшее увеличение продолжительности анодного травления приводит к снижению прочности на срез до 195 МПа . С целью обеспечения наилучшей сменяемости покрытий с основой продолжительность обработки должна составлять $30 \text{--} 40$ с.

При проведении исследований влияния продолжительности и анодной плотности тока активирования на сцепляемость хромовых покрытий, осаждённых из разработанного электролита с добавкой плавиковой кислоты, проводили непосредственно в ванне хромирования при концентрации неорганической добавки плавиковой кислоты $0,8 \text{ г/л}$. Предварительно осуществляли анодное травление образцов в ванне травления при плотности тока 120 А/дм^2 , температуре 20°C в течение 60 с, а затем кратковременную промывку в проточной воде [23].

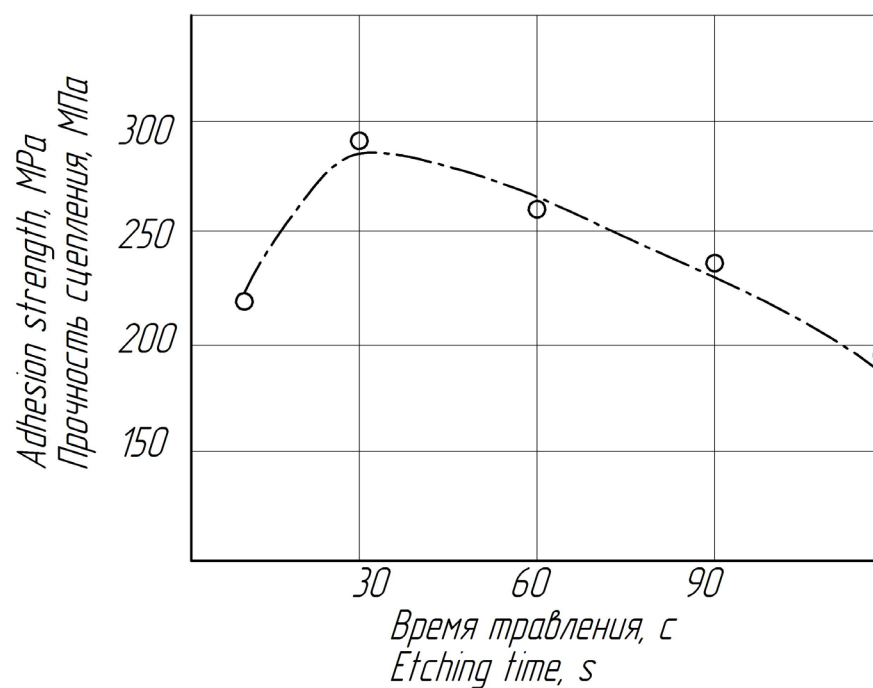


Рисунок 2 – Влияние продолжительности анодного травления на прочность сцепления при анодной плотности тока $D_a = 120-130 \text{ A/dm}^2$
Источник: составлено автором.

Figure 2 – The effect of anode etching duration on the adhesion strength at the anode current density of $D_a = 120-130 \text{ A/dm}^2$
Source: compiled by the author.

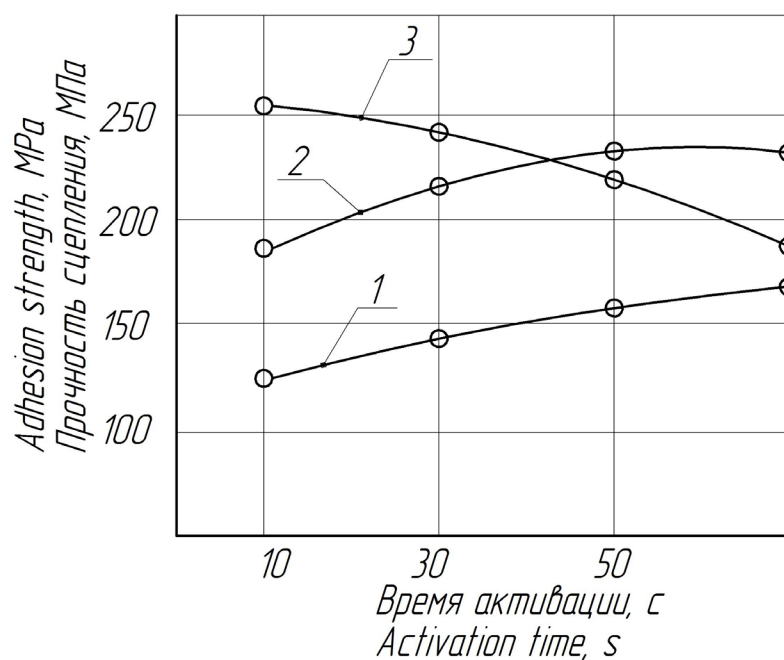


Рисунок 3 – Влияние продолжительности активирования в ванне хромирования на прочность сцепления при концентрации плавиковой кислоты 0,8 г/л и анодной плотности тока, A/dm^2 : 1 – 40; 2 – 80; 3 – 100
Источник: составлено автором.

Figure 3 – The effect of the activation duration in the chrome plating bath on the adhesion strength at a hydrofluoric acid concentration of 0.8 g/l and the anode current density, A/dm^2 : 1 – 40; 2 – 80; 3 – 100
Source: compiled by the author.

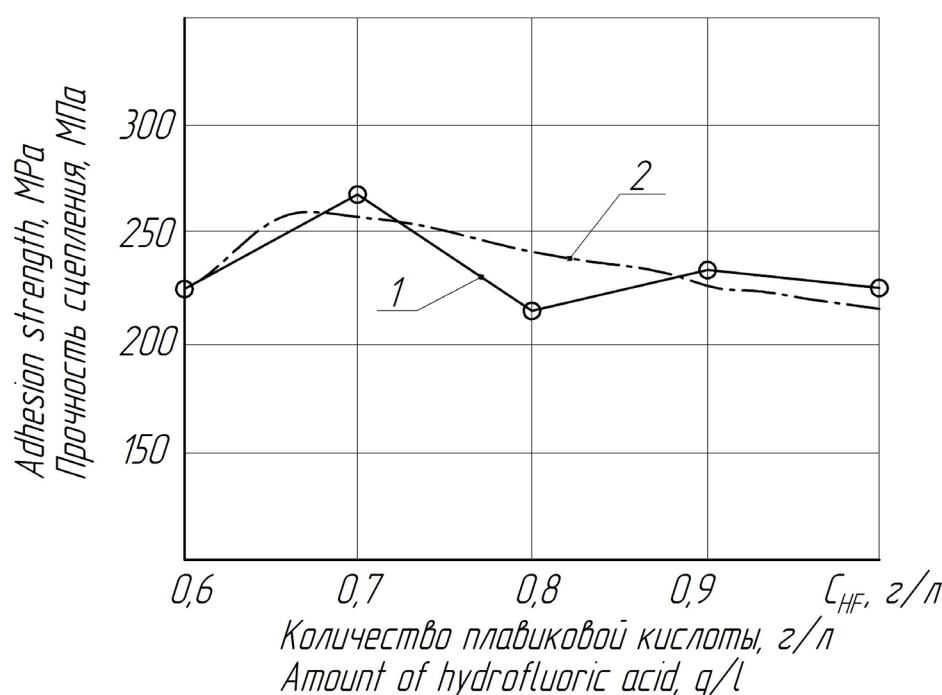


Рисунок 4 – Влияние концентрации плавиковой кислоты на прочность сцепления покрытий с основой: 1 – экспериментальная зависимость; 2 – теоретическая функция
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Effect of hydrofluoric acid concentration on the adhesion strength of coatings to the substrate:
1 – experimental dependence; 2 – theoretical function
Source: compiled by the author.

При анодной плотности тока 40 A/дм^2 (рисунок 3) с увеличением продолжительности активирования прочность сцепления повышается от 126 до 168 МПа. Однако более эффективно активирование при анодной плотности 80 A/дм^2 и продолжительности операции более 50 с (рисунок 3, кривая 2).

Однако при анодной плотности тока 100 A/дм^2 и продолжительности 10 с (см. рисунок 3, кривая 3) имеет место наибольшая прочность сцепления. Однако увеличение продолжительности процесса способствует уменьшению прочности сцепления покрытий с материалом основы. Это снижает стабильность и надёжность получения высокой прочности сцепления, усложняет эксплуатацию ванны.

Исследования показали, что введение в разработанный электролит неорганической добавки плавиковой кислоты не ухудшает

прочности сцепления осаждаемого покрытия с основой по сравнению с покрытиями, полученными из электролита без добавки (рисунок 4). Прочность сцепления покрытий при изменении концентрации плавиковой кислоты от 0,6 до 0,9 г/л колебалась в интервале 270–218 МПа, а разрушение покрытий происходило с частичным разрушением металла основы со следами покрытия на образце (см. рисунок 4). Это позволило предположить, что силы сцепления хромового покрытия и основного материала соизмеримы с межмолекулярными силами покрытия и материала основы.

Выявленные закономерности изменения прочности сцепления условий анодной подготовки (см. рисунки 2, 3, 4) наиболее полно описываются математическим анализом полученных результатов.

Таблица 1
Уровни варьирования факторов
Источник: составлено автором.

Table 1
Levels of factors variation
Source: compiled by the author.

Независимые факторы		Значение параметра/кодированное		
		Нижний уровень	Средний уровень	Верхний уровень
Время электрохимического травления, с	X_1	20 (-1)	85 (0)	150 (1)
Плотность тока электрохимического травления, А/дм ²	X_2	20 (-1)	90 (0)	160 (1)
Количество плавиковой кислоты в растворе электролита, г/л	X_3	0,6 (-1)	0,8 (0)	1,0 (1)

Таблица 2
Матрица проведения экспериментов
Источник: составлено автором.

Table 2
Matrix of experiments
Source: compiled by the author.

№ опыта	Время электрохимического травления, с	Плотность тока электрохимического травления, А/дм ²	Количество плавиковой кислоты в растворе электролита, г/л	Прочность сцепления, МПа
1	-1	-1	-1	220
2	-1	-1	0	235
3	-1	-1	1	215
4	-1	0	-1	235
5	-1	0	0	250
6	-1	0	1	225
7	-1	1	-1	260
8	-1	1	0	280
9	-1	1	1	250
10	0	-1	-1	225
11	0	-1	0	240
12	0	-1	1	220
13	0	0	-1	240
14	0	0	0	260
15	0	0	1	235
16	0	1	-1	260
17	0	1	0	285
18	0	1	1	245
19	1	-1	-1	215
20	1	-1	0	240
21	1	-1	1	220
22	1	0	-1	230
23	1	0	0	235
24	1	0	1	210
25	1	1	-1	245
26	1	1	0	260
27	1	1	1	235

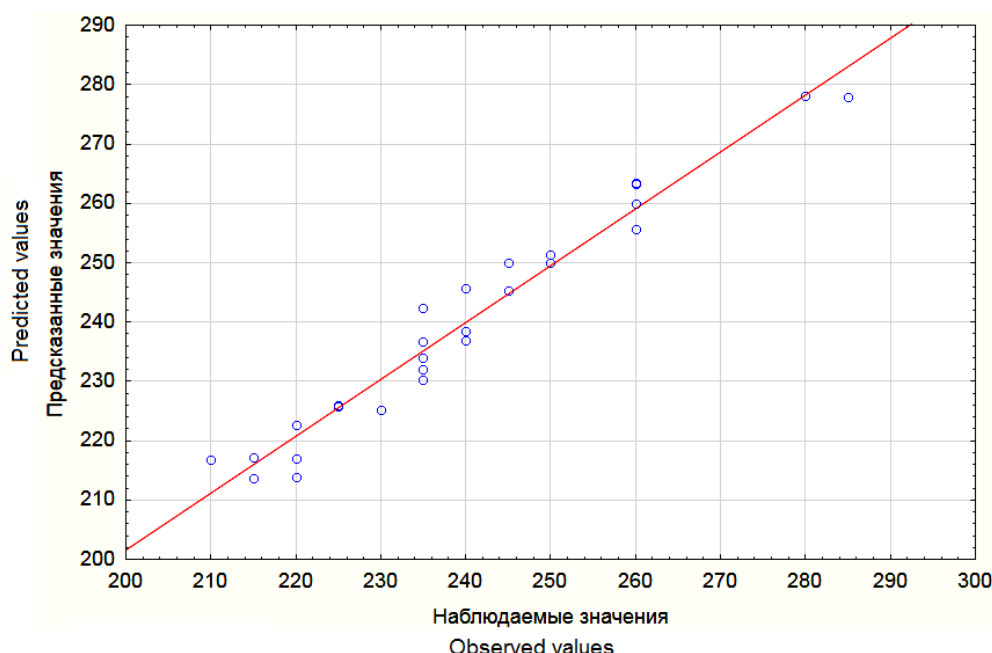


Рисунок 5 – График рассеивания наблюдаемых и предсказанных значений прочности сцепления, МПа
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Dispersion graph of observed and predicted values of adhesion strength, MPa.
Source: compiled by the author.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения математической зависимости и построения модели изменения прочности сцепления получаемого хромового покрытия с основой был проведен статистический анализ данных результатов с целью получения зависимости и влияния основных независимых факторов [24].

Было определено, что наиболее значимыми, независимыми факторами, влияющими на прочность сцепления, являются – время электрохимического травления, плотность тока электрохимического травления и количество плавиковой кислоты в растворе электролита. Остальные факторы были отброшены из-за малого влияния на прочность сцепления хромового покрытия с основой детали.

С целью дальнейшего варьирования полученными результатами были определены уровни максимального, минимального и среднего значения независимых факторов, которые указаны в таблице 1.

При проведении статистической обработки было определено, что наиболее точно можно

получить результаты при плане проведения многофакторного эксперимента 3-1-27, при котором 3 – количество независимых факторов, 1 – количество зависимых факторов, 27 – количество проводимых опытов. Значения независимых факторов брались как среднее значение из 3 повторяющихся опытов, при одинаковых условиях и режимах (таблица 2).

Для обработки полученных статистических данных использована программа Statistica, с помощью которой был проведен анализ результатов и получены необходимые графики и математическая модель прочности сцепления хромового покрытия с основой детали. При этом обработка данных показала, что полученные значения находятся с минимальными отклонениями и погрешностью, соответствуют табличным значениям Стьюдента и Фишера. Поэтому были сделаны выводы, что полученная математическая модель является адекватной и отражает точное предсказание полученных результатов⁴ [24, 25, 26].

Полученные результаты графика рассеивания показали, что все точки проведенных 27 опытов находятся в границах факторного пространства и соответствуют закону распре-

⁴ Горбунов И. П., Горбунов Д. И. Математическое моделирование процесса диффузионного хромирования стали. Теория и практика производства листового проката. Сборник научных трудов. Часть 2. Липецк: ЛГТУ, 2008. С. 68–72.

деления. Кроме того, все точки располагаются симметрично, что подтверждает соответствие его определённому закону, который близок к нормальному. Поэтому отсутствует влияние

случайных величин, что в свою очередь не требует проведения дополнительных опытов для достоверности полученных результатов (рисунок 5).

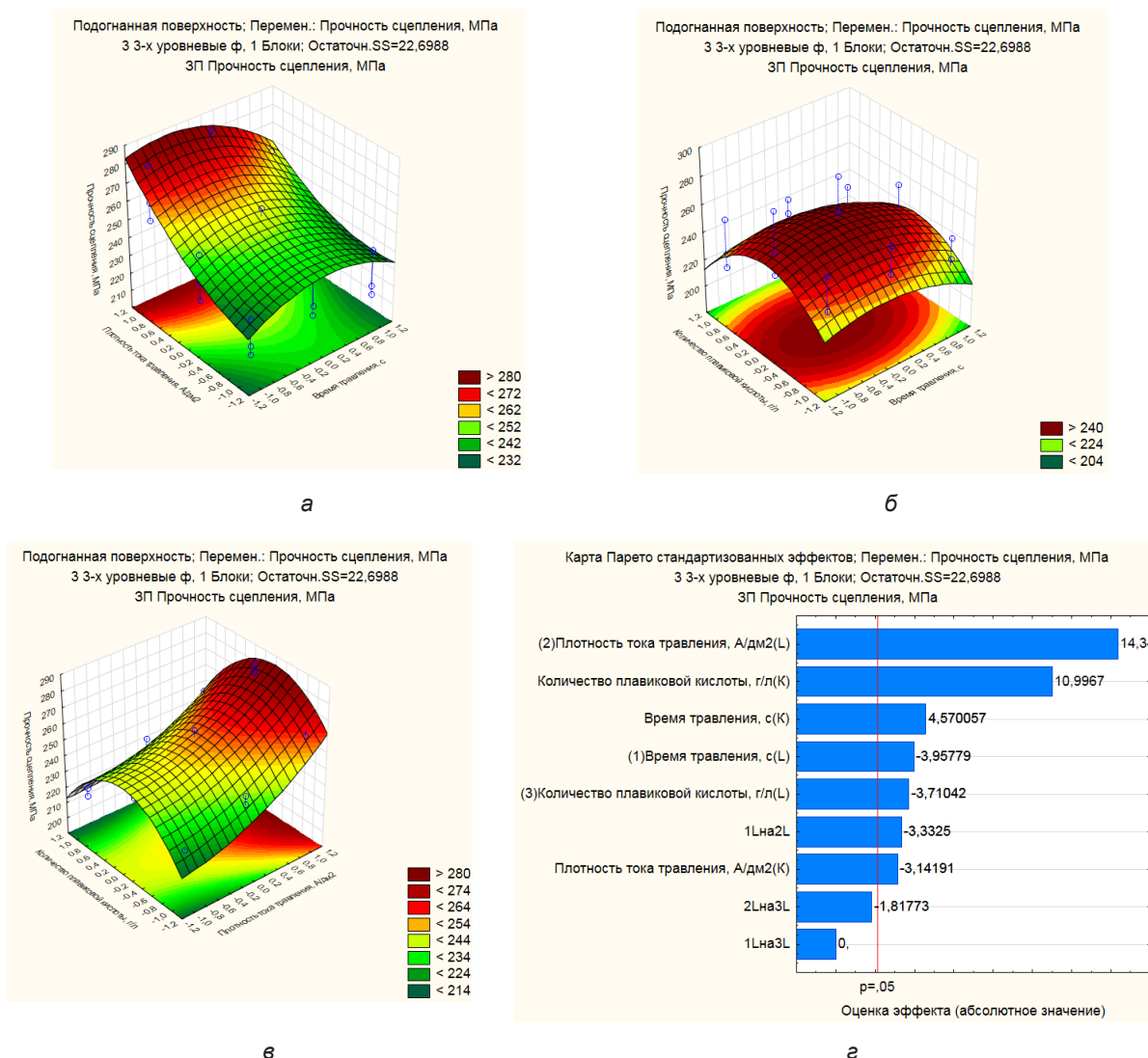


Рисунок 6 – Изображения полученных подогнанных поверхностей прочности сцепления хромового покрытия с основной детали, при различных значениях независимых факторов при проведении статистического анализа: а – изменение значения плотности тока травления при среднем значении количества плавиковой кислоты; б – изменение значения количества плавиковой кислоты и времени травления при среднем значении плотности тока травления; в – изменение значения количества плавиковой кислоты и плотности тока травления при среднем значении времени травления; г – карта Парето при построении подгонных поверхностей модели второго порядка
Источник: составлено автором.

Figure 6 – Images of the obtained fitted surfaces of the adhesion strength of the chrome coating to the base of the part, with different values of independent factors during statistical analysis: а – change in the value of the etching current density and etching time at an average value of the amount of hydrofluoric acid; б – change in the value of the amount of hydrofluoric acid and etching time at an average value of the etching current density; в – change in the value of the amount of hydrofluoric acid and the etching current density at the average etching time; г – Pareto map in the construction of fitting surfaces of the second-order model
Source: compiled by the author.

С целью получения наглядного изображения подогнанной поверхности, где в качестве зависимого фактора выступает прочность сцепления, а в качестве изменяющегося значения два независимых фактора при среднем значении одного независимого фактора. При этом получились виды подогнанных поверхностей и карта Парето, показывающие влияние независимых факторов на прочность сцепления хрома с основой детали, которые показаны на рисунке 6.

При анализе статистической обработки полученных результатов опытов в виде графического изображения полученных поверхностей при влиянии независимых факторов было получено, что наибольшее сцепление хромового покрытия с основой детали можно получить при следующих значениях: плотность тока травления в пределах 130–140 А/дм², время травления 60–90 с и количества плавиковой кислоты 0,65–0,9 г/л в растворе электролита хромирования.

Для получения уравнения регрессии были проведены расчёты с помощью программы Statistica и получены коэффициенты, которые являются значимыми для получения уравнения регрессии прочности сцепления. Значимые коэффициенты выделены красным цве-

том и изображены в виде таблицы, взятые из программы Statistica (таблица 3).

В результате полученных данных дисперсионного анализа (см. таблицу 3), последние четыре столбца в таблице определены как значимые для уравнения регрессии. Первый столбец значения коэффициента включён в уравнение с использованием значений, выделенных красным цветом, как наиболее значимых, влияющих на конечный результат прочности сцепления. Далее приведём полученное линейное уравнение регрессии, которое будет определять зависимость времени электрохимического травления, плотности травления и количество плавиковой кислоты на прочность сцепления хромового покрытия с основой детали.

$$Y = 239,6295 - 4,44 \cdot X_1 + 4,44 \cdot X_1^2 + 16,11 \cdot X_2 - 3,06 \cdot X_2^2 - 4,17 \cdot X_3 + 10,69 \cdot X_3^2 - 4,58 \cdot X_1 \cdot X_2,$$

где Y – значение, предсказываемое прочностью сцепления хромового покрытия с основой детали, МПа;

X_1 , X_2 , X_3 – перекодированные независимые факторы времени электрохимического травления, времени травления и количества плавиковой кислоты соответственно.

Таблица 3
Анализ дисперсии при получении математической линейной модели
Источник: составлено автором.

Table 3
Analysis of variance in obtaining a mathematical linear model
Source: compiled by the author.

Фактор	Коэффициент	Статистическая ошибка коэффициента	-95,% - доверительно предельные	+95,% - доверительно предельные
Сред/Св.член	239,6296	0,916895	237,6952	241,5641
(1)Время травления, с(L)	-4,4444	1,122962	-6,8137	-2,0752
Время травления, с(K)	4,4444	0,972514	2,3926	6,4963
(2)Плотность тока травления, А/дм ² (L)	16,1111	1,122962	13,7419	18,4804
Плотность тока травления, А/дм ² (K)	-3,0556	0,972514	-5,1074	-1,0037
(3)Количество плавиковой кислоты, г/л(L)	-4,1667	1,122962	-6,5359	-1,7974
Количество плавиковой кислоты, г/л(K)	10,6944	0,972514	8,6426	12,7463
1L на 2L	-4,5833	1,375342	-7,4851	-1,6816
1L на 3L	0,0000	1,375342	-2,9017	2,9017
2L на 3L	-2,5000	1,375342	-5,4017	0,4017

Данное уравнение регрессии по прочности сцепления хромового покрытия с основой детали даст возможность предопределить наиболее оптимальные режимы и состав электролита хромирования для получения покрытий с наибольшей прочностью сцепления с целью возможности использования разработанного электролита при восстановлении деталей специализированного автотранспорта и дорожно-строительных машин, эксплуатирующих гидропривод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведённые исследования позволили установить рациональные условия предварительной подготовки закалённой стали 40Х, из которой изготовлены детали, работающие при гидроабразивном изнашивании – золотники гидрораспределителей, плунжера насосов и др. При этом время электрохимического травления составляет 60–90 с, плотность травления 130–140 А/дм² и количество плавиковой кислоты в диапазоне 0,6–0,9 г/л, что обеспечивает высокую прочность сцепления с хромовыми покрытиями. Поэтому это даёт основание рекомендовать использование таких покрытий для восстановления ответственных деталей автотранспорта, работающих при гидроабразивном изнашивании.

Кроме того, была сделана математическая обработка влияния параметров режимов электрохимического травления и количества плавиковой кислоты в растворе электролита хромирования на прочность сцепления хромового покрытия с основой детали. Благодаря полученным результатам статистической обработки получено уравнение регрессии по прочности сцепления. Оно позволит предсказать оптимальные режимы и количество плавиковой кислоты для получения высокой прочности сцепления с целью использования разработанной технологии при восстановлении деталей машин.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Котомчин А. Н., Корнейчук Н. И. Влияние условий эксплуатации дорожно-строительных машин и специализированного автотранспорта на ресурс их узлов и агрегатов // Технический сервис машин. 2019. № 2(135). С. 135–142.
2. Котомчин А. Н., Синельников А. Ф., Корнейчук Н. И. К вопросу выбора способа восстановления деталей машин. Вестник СибАДИ. 2020;17(1):84–97. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-84-97>
3. Фомичев В. Т., Садовникова В. В., Москвичева Е. В. Легирование электролитического хрома молибденом в электролите, содержащем органи-

ческие добавки // Гальванотехника и обработка поверхности. 1992. Т. 1, № 3. С. 44–46.

4. Ткаченко И. Д. [и др.] Усовершенствование технологии хромирования с применением неорганических и органических композиций // Разработка и применение твердых металлических покрытий. Днепропетровск. 1981. С. 223–224.

5. Котомчин А. Н., Ляхов Ю. Г. Анализ электролитов хромирования для восстановления и упрочнения деталей машин // Вестник Приднестровского университета. Серия: Физико-математические и технические науки. Экономика и управление. 2017. № 3(57). С. 113–119.

6. Котомчин А. Н., Синельников А. Ф., Корнейчук Н. И. Использование износостойкого хромирования при восстановлении и упрочнении деталей автомобилей // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2021. № 1 (64). С. 11–17.

7. Котомчин А. Н., Синельников А. Ф., Корнейчук Н. И. Интенсификация процесса электролитического хромирования при восстановлении и упрочнении деталей машин // Мир транспорта и технологических машин. 2020. № 3 (70). С. 22–32.

8. Елинек Т. В. Успехи гальванотехники. Обзор мировой специальной литературы за 2017–2018 годы // Гальванотехника и обработка поверхности. 2019. Т. 27, № 3. С. 4–14.

9. Едигарян А. А., Полукаров Ю. М. Электроосаждение хрома и его сплавов из сульфатных растворов Cr (III) // Гальванотехника и обработка поверхности. 2001. Т. 9, № 3. С. 17–18.

10. Максименко С. А., Балакина О. А. Электроосаждение хромовых покрытий из электролитов на основе хрома (3) и муравьиной кислоты // Гальванотехника и обработка поверхности. 1992. Т. 1, № 3-4. С. 47–50.

11. Корнейчук Н. И., Лялякин В. П. Перспективы использования промышленных методов восстановления изношенных деталей машин гальваническими и полимерными покрытиями в современных условиях развития агропромышленного технического сервиса // Труды ГОСНИТИ. 2018. Т. 130. С. 254–264.

12. Кудрявцев В. Н., Винокуров Е. Г., Кузнецов В. В. Толстослойное хромирование из электролитов на основе сернокислого хрома // Гальванотехника и обработка поверхности. 1998. Т. 6, № 1. С. 24–30.

13. Солодкова Л. Н., Ващенко С. В., Кудрявцев В. Н. Высокопроизводительный электролит износостойкого хромирования // Гальванотехника и обработка поверхности. 2003. Т. 11, № 3. С. 31–33.

14. Baraldi P., Soragni E. On the kinetics of chromium electrodeposition on copper electrodes // J. Alloys and Compounds. 2001. № 317-318. pp. 612–618.

15. Котомчин А. Н., Синельников А. Ф. Установки для поддержания рабочей температуры электролитов при восстановлении деталей машин гальваническими покрытиями. Вестник СибАДИ. 2020;17(4):500–511. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-500-511>

16. Корнейчук Н. И. Перспективы интенсификации восстановления деталей машин электролитическим хромированием // Труды ГОСНИТИ. 2010. Т. 106. С. 197–203.

17. Chromabscheidung aus wässrigen Lösungen. Aufbau des Kathodenfilms Galvanotechnik. 2006. №12. Teil 11.. pp. 2888–2896.

18. Bolch T., Linde R. u.a. Innovative Oberflächenstrukturen durch elektrochemische Beschichtungsverfahren // Galvanotechnik. 2005. №103. pp. 2095–2100.

19. Chromabscheidung aus wässrigen Lösungen. Chromsaurelösungen Galvanotechnik. 2005. №9. Teil. 1. pp. 2063–2071.

20. Корнейчук Н. И., Ковбасюк А. В. [и др.] Влияние концентрации трехвалентных соединений хрома на некоторые параметры холодного хромирования // Труды Кишиневского СХИ. 1975. № 144. С. 17–23.

21. Аджиев Б. У., Ващенко С. В., Соловьева З. А. Влияние структуры и физико-механических свойств хрома на износостойкость хромовых покрытий // Гальванотехника и обработка поверхности. 1992. Т. 1, № 1. С. 28–31.

22. Солодкова Л. Н., Соловьева З. А. Исследование пленки на катоде при электровосстановлении хромовой кислоты // Электрохимия. 1994. Т. 30, № 10. С. 1254–1256.

23. Шлугер М. А., Ток Л. Д. Новые электролиты для покрытий хромом и его сплавами // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. 1988. Т. 32, № 3. С. 297–305.

24. Зорин В. А., Штефан Ю. В., Тимченко М. И. Планирование экспериментов при создании деталей из композиционных материалов // Механизация строительства. 2018. Т. 79, № 4. С. 5–13.

25. Галдина В. Д., Черногородова М. С. Подбор составов активированных минеральных порошков с использованием метода планирования эксперимента. Вестник СибАДИ. 2017; (2(54)):90–98. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2\(54\)-90-98](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-90-98)

26. Витязь П. А., Жилинский О. В., Лактюшина Т. В. Компьютерная методология выбора технически оптимального варианта в многокритериальных задачах проектирования материалов // Физическая мезомеханика. Томск. 2004. Т. 7. Спец. выпуск. Ч. 1. С. 3–11.

REFERENCES

1. Kotomchin A. N., Kornejchuk N. I. Vliyanie uslovij ekspluatatsii dorozhno-stroitel'nyh mashin i specializirovannogo avtotransporta na resursy ih uzlov i agregatov. [The influence of the operating conditions of road construction machines and specialized vehicles on the resource of their components and aggregates]. *Tekhnicheskij servis mashin*. 2019; 2(135): 135–142. (in Russ.)

2. Kotomchin A. N., Sinelnikov A. F., Kornejchuk N. I. Restoration of machine parts: choice of the method. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(1):84–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-84-97>

3. Fomichev V. T., Sadovnikova V. V., Moskvicheva E. V. Legirovanie jelektroliticheskogo hroma molibdenom v jelektrolite, soderzhashhem organicheskie dobavki [Alloying of electrolytic chromium with molybdenum in an electrolyte containing organic additives]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 1992; vol. 1. no. 3: 44–46. (In Russ.)

4. Tkachenko I. D. i dr. Usovershenstvovanie tehnologii hromirovaniya s primeneniem neorganicheskikh i organicheskikh kompozitsij [Improvement of chrome plating technology with the use of inorganic and organic compositions]. *Razrabotka i primenenie tverdyh metallicheskih pokrytij*. Dnepropetrovsk: 1981: 223–224. (in Russ.)

5. Kotomchin A. N., Lyahov YU. G. Analiz jelektrolitov hromirovaniya dlya vosstanovleniya i uprochneniya detalej mashin. [Analysis of chrome plating electrolytes for the restoration and hardening of machine parts] *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki. Ekonomika i upravlenie*. 2017; 3(57): 113–119. (in Russ.)

6. Kotomchin A. N., Sinelnikov A. F., Kornejchuk N. I. Ispol'zovanie iznosostojkogo hromirovaniya pri vosstanovlenii i uprochnenii detalej avtomobilej [The use of wear-resistant chrome plating in the restoration and strengthening of car parts]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2021; 1 (64): 11–17. (in Russ.)

7. Kotomchin A. N., Sinelnikov A. F., Kornejchuk N. I. Intensifikacija processa jelektroliticheskogo hromirovaniya pri vosstanovlenii i uprochnenii detalej mashin [Intensification of the process of electrolytic chrome plating during restoration and hardening of machine parts]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. 2020; 3 (70): 22–32. (in Russ.)

8. Elinek T. V. Uspehi gal'vanotekhniki. Obzor mirovoj special'noj literatury za 2017–2018 gody [Advances in electroplating. World literature review for 2017–2018]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 2019; vol. 27. no. 3: 4–14. (in Russ.)

9. Edigarjan A. A., Polukarov Ju. M. *Jelektroosazhdenie hroma i ego splavov iz sul'fatnyh rastvorov Sg (III)* [Electrodeposition of chromium and its alloys from SG (III) sulphate solutions]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 2001; vol.9. no. 3: 17–18. (in Russ.)

10. Maksimenko S. A., Balakina O. A. Jelektroosazhdenie hromovyh pokrytij iz jelektrolitov na osnove hroma (3) i murav'inoj kisloty [Electrodeposition of chromium coatings from electrolytes based on chromium (3) and formic acid]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 1992; vol.1. no. 3–4: 47–50. (in Russ.)

11. Kornejchuk N. I., Lyalyakin V. P. Perspektivy ispol'zovaniya industrial'nyh metodov vosstanovleniya iznoshennykh detalej mashin gal'vanicheskimi i polimernymi pokrytiami v sovremennykh usloviyah razvitiya agropromyshlennogo tekhnicheskogo servisa.

[Prospects of using industrial methods of restoration of worn-out machine parts by electroplating and polymer coatings in modern conditions of development of agro-industrial technical service]. *Trudy GOSNITI*. 2018; vol.130: 254-264. (in Russ.)

12. Kudrjavcev V. N., Vinokurov E. G., Kuznetsov V. V. Tolstoslojnoe hromirovanie iz jelektrolitov na osnove sernokislogo hroma [Thick-layer chromium plating of chromium sulphate electrolytes]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 1998; vol. 6. no.1: 24-30. (in Russ.)

13. Solodkova L. N., Vashhenko S. V., Kudrjavcev V. N. Vysokoproizvoditel'nyj jelektrolit iznosostojkogo hromirovanija [High-performance wear-resistant chrome-plated electrolyte]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 2003; vol. 11. no. 3: 1-33. (in Russ.)

14. Baraldi P., Soragni E. On the kinetics of chromium electrodeposition on copper electrodes. *J. Alloys and Compounds*. 2001; 317-318: 612-618.

15. Kotomchin A.N., Sinelnikov A.F. Installation for maintaining the operating temperature of electrolytes when restoring machine parts with electroplated coatings. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020;17(4):500-511. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-500-511>

16. Kornejchuk N. I. Perspektivy intensivifikacii vosstanovleniya detalej mashin jelektroliticheskim. [Prospects of intensification of restoration of machine parts by electrolytic chrome plating]. *Trudy GOSNITI*. 2010; vol.106: 197-203. (in Russ.)

17. *Chromabscheidung aus wassrigen Losungen*. Aufbau des Kathodenfilms Galvanotechnik. 2006. no.12. Teil 11. pp. 2888-2896.

18. Bolch T., Linde R. u.a. Innovative Oberflächenstrukturen durch elektrochemische Beschichtungsverfahren. *Galvanotechnik*. 2005; 103: 2095-2100.

19. Chromabscheidung aus wassrigen Losungen. *Chromsaurelosungen Galvanotechnik*. 2005. no. 9. Teil. 1. pp. 2063-2071.

20. Kornejchuk N. I., Kovbasjuk A.V. i dr. Vlijanie koncentracii trehvalentnyh soedinenij hroma na nekotorye parametry holodnogo hromirovanija [Influence of concentration of trivalent chromium compounds on some parameters of cold chrome plating]. *Trudy Kishinevskogo SHI*. 1975; 144: 17-23. (in Russ)

21. Adzhiev B. U., Vashhenko S. V., Solov'eva Z. A. Vlijanie struktury i fiziko-mehanicheskikh svojstv hroma

na iznosostojkost' hromovyh pokrytij [Influence of the structure and physical and mechanical properties of chromium on the wear resistance of chrome coatings]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 1992; 1. no. 1: 28-31. (in Russ)

22. Solodkova L. N., Solov'eva Z. A. Issledovanie plenki na katode pri jelektrovoosstanovlenii hromovoj kisloty [Investigation of the film on the cathode during the electric recovery of chromic acid]. *Jelektrohimiya*. 1994; vol. 30. no. 10: 1254-1256. (in Russ)

23. Shluger M. A., Tok L. D. Novye jelektrolity dlja pokrytij hromom i ego splavami [New electrolytes for chromium and its alloys coatings]. *Zhurnal Vsesojuznogo himicheskogo obshhestva im. D. I. Mendeleeva*. 1988; vol. 32. no. 3: 297-305. (in Russ)

24. Zorin V. A., Shtefan Ju. V., Timchenko M. I. Planirovanie jeksperimentov pri sozdanii detalej iz kompozicionnyh materialov [Planning experiments when creating parts from composite materials]. *Mehanizacija stroitel'stva*. 2018; vol. 79. no. 4: 5-13. (in Russ)

25. Galdina V. D., Chernogorodova M. S. Selection of structures of the activated mineral powders with use of a method of planning of experiment. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017;(2(54)):90-98. (In Russ.) [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2\(54\)-90-98](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-90-98)

26. Vitjaz' P. A., Zhilinskij O. V., Laktjushina T. V. Komp'juternaja metodologija vybora tehničeski optimal'nogo varianta v mnogokriterial'nyh zadachah proektirovanija materialov [Computer methodology for selecting the technically optimal option in multi-criteria problems of material design]. *Fizicheskaja me-zome-hanika*. Tomsk. 2004; vol. 7. Spec. vypusk. Ch. 1: 3-11.27. (in Russ)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Котомчин Алексей Николаевич – аспирант кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин»; старший научный сотрудник лаборатории «Реновация машин и оборудования».

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Aleksei N. Kotomchin – Postgraduate student of the Cars and Road Vehicles Production and Repair Department; Senior Researcher of the Machinery and Equipment Renovation Laboratory.



ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА АВТОБУСНОГО ПАРКА

Е. В. Феклин

СГТУ имени Гагарина Ю.А.

г. Саратов, Россия

feklin_2013@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6778-4458>

АННОТАЦИЯ

Введение. В последнее время в связи с увеличением количества автотранспортных средств, в том числе общественного транспорта, появляется необходимость упорядочивания системы технического обслуживания и ремонта с учетом массовости поступающих заявок на проведение указанных операций. Снижение производительности может произойти из-за нечёткого распределения работ по исполнителям, несогласованности их действий по времени и нерационального использования технологического оборудования. Целью проводимого исследования является разработка системы организации технического обслуживания и ремонта подвижного состава, основанной на принципах централизации и кооперации с другими производственными структурами. Для достижения указанной цели используются статистические методы, методы теории случайных процессов и теории массового обслуживания. Концентрация производства происходит или за счёт роста доли крупных предприятий в общем объеме производства региона/отрасли (перевозок пассажиров мегаполиса), или за счёт роста размеров самих производственных предприятий. Аргументировать процесс концентрации можно с позиций принципов синергетики.

Материалы и методы. В статье рассмотрено оперативное управление системой технического обслуживания и ремонта автобусного парка. Представлено разделение задач технической службы автотранспортного предприятия на четыре комплекса. Проанализированы два способа составления графика: календарный и по фактическому пробегу автомобилей. В результате анализа были выявлены преимущества и недостатки каждого из вариантов. Проанализированы преимущества и недостатки универсальных и специализированных постов с указанием способов устранения выявленных недостатков. Обоснован положительный эффект от централизации управления указанными комплексами задач по техническому обслуживанию и ремонту подвижного состава.

Результаты. Предложена схема обслуживания заявок на текущий ремонт при децентрализованной и централизованной системах управления производством текущего ремонта подвижного состава. Описаны основные принципы функционирования централизованной системы управления производством. Предложена общая структурная схема работы централизованного специализированного производства. Представлен структурный состав комплекса подготовки производства с описанием каждого подразделения, входящего в его систему: группа комплектации, промежуточный склад, транспортный участок, моечно-дефектовочный участок, инструментальный участок. Обозначены задачи отдела оперативного управления и отдела обработки и анализа информации, входящих в центр управления централизованного специализированного производства.

Обсуждение и заключение. Результаты исследования предназначены для предприятий пассажирского транспорта. Настоящее исследование является составной частью разработки общей системы централизации и кооперации технического обслуживания подвижного состава.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: техническое обслуживание, ремонт, автобус, коэффициент технической готовности, централизованное специализированное производство, центр управления производством, оперативное управление.

БЛАГОДАРНОСТИ. Автор благодарит руководство и коллектив пассажирских предприятий Саратовской области, на которых проводилось исследование, редакцию журнала «Вестник СибАДИ», а также рецензентов статьи.

Статья поступила в редакцию 03.05.2022; одобрена после рецензирования 19.07.2022; принята к публикации 27.07.2022.

© Феклин Е. В., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Феклин Е. В. Оперативное управление системой технического обслуживания и ремонта автобусного парка // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 4 (86). С. 560-568. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-560-568>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-536-544>

EDN: GOUVUG

OPERATIONAL MANAGEMENT OF THE BUS FLEET MAINTENANCE AND REPAIR SYSTEM

Evgeny V. Feklin

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Saratov, Russia

feklin_2013@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6778-4458>

ABSTRACT

Introduction. Recently, due to the increase in the number of vehicles, including public transport, there is a need to streamline the system of maintenance and repair, taking into account the mass of incoming applications for these operations. A decrease in productivity may occur due to an unclear distribution of work by performers, inconsistency of their actions in time and irrational use of technological equipment. The purpose of the research is to develop a system for organizing maintenance and repair of rolling stock based on the principles of centralization and cooperation with other production structures. To achieve this goal, statistical methods, methods of the theory of random processes and queuing theory are used. The concentration of production occurs either due to the growth of the share of large enterprises in the total volume of production of the region / industry (transportation of passengers of the metropolis) or due to the growth of the size of the manufacturing enterprises themselves. The process of concentration can be argued from the standpoint of the principles of synergetics.

Materials and methods. The article discusses the operational management of the system of maintenance and repair of the bus fleet. The division of tasks of the technical service of a motor transport enterprise into four complexes is presented. Two ways of drawing up a schedule are analyzed: calendar and by actual mileage of cars. The analysis revealed the advantages and disadvantages of each of the options. The advantages and disadvantages of universal and specialized posts are analyzed, indicating ways to eliminate the identified shortcomings. The positive effect of centralization of management of the specified complexes of tasks for maintenance and repair of rolling stock is substantiated.

Results. A scheme for servicing applications for routine repairs with decentralized and centralized systems for managing the production of routine repairs of rolling stock is proposed. The basic principles of functioning of a centralized production management system are described. A general structural scheme of centralized specialized production is proposed. The structural composition of the pre-production complex is presented, with a description of each unit included in its system: a complete set group, an intermediate warehouse, a transport section, a washing and defect section, a tool section. The tasks of the operational management department and the information processing and analysis department, which are part of the control center of a centralized specialized production, are outlined.

Discussion and conclusions. The results of the study are intended for the enterprises of passenger transport. This study is an integral part of the development of a common system of centralization and cooperation of maintenance of rolling stock.

KEYWORDS: maintenance, repair, bus, technical readiness coefficient, centralized specialized production, production management center, operational management.

ACKNOWLEDGEMENTS: The author thanks the management and the team of passenger enterprises of the Saratov region, which conducted the study, the editorial office of the Journal The Russian Automobile and Highway Industry Journal as well as the reviewers of the article.

© Feklin E. V., 2022



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

The article was submitted 03.05.2022; approved after reviewing 19.07.2022; accepted for publication 27.07.2022.

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: Feklin E. V. Operational management of the bus fleet maintenance and repair system. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2022; 19 (4): 560-568. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-560-568>

ВВЕДЕНИЕ

Количество крупных автотранспортных предприятий за последние 30 лет сократилось, однако количество автомобильного парка, наоборот, увеличивается. Следовательно, возникает проблема качественного и своевременного проведения технического обслуживания и ремонта (ТОиР) подвижного состава пассажирского и грузового транспорта собственными силами. А использование специализированных обслуживающих предприятий сопряжено со значительной перегрузкой их производственных мощностей. Одним из вариантов решения данной проблемы является разработка системы централизации и спецификации производственных процессов технического обслуживания и ремонта подвижного состава за счет кооперации с крупными производственными предприятиями, обладающими свободными производственными мощностями для осуществления ТОиР, например с ОАО «РЖД». Одним из элементов этой системы является алгоритм оперативного управления.

Задачи, которые постоянно решает техническая служба автотранспортных предприятий и централизованное специализированное производство (ЦСП), сводятся к четырем комплексам:

1. Определение номенклатуры подвижного состава, планируемого на проведение технического обслуживания (ТО) и определение фактического объема текущего ремонта (ТР).
2. Управление потоками имеющихся запчастей.
3. Распределение ремонтных зон с учетом оснащенности и специализации.
4. Распределение заданий ремонтно-обслуживающему персоналу.

Таким образом, необходима разработка системы оперативного управления техническим обслуживанием и ремонтом автобусного парка для повышения эффективности работы технического сервиса. Вопросам, связанным с организацией и проблемными вопросами технического сервиса автотранспортных средств и его влияния на безопасность транспортного процесса, посвящен ряд работ [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11], при изучении которых опреде-

лено, что разработка системы централизации и спецификации производственных процессов технического обслуживания и ремонта подвижного состава в условиях текущей экономической структуры РФ не рассматривалась.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Подробное описание разрабатываемой системы централизации представлено в работе [12]. На коэффициент технической готовности (КТГ) оказывают влияние не только масштабы предприятий, но и относительная стоимость производственно-технической базы (ПТБ), что представлено на рисунках 1 и 2.

Для решения задач первого комплекса составляется график постановки автомобилей в ТО, который обычно составляют на месяц. Он является документом оперативного управления. Используют два способа составления графика: календарный и по фактическому пробегу автомобилей.

Календарный график составляется с учетом среднесуточного пробега и принятой периодичности ТО. Разделив периодичность ТО на среднесуточный пробег, определяют периодичность ТО в днях, по которой и составляют календарный график ТО на месяц. К положительным сторонам данного графика можно отнести легкость его составления и контроля, равномерную загрузку зоны ТО. К отрицательным сторонам относятся несвоевременность и понижение качества проведения ТО; отсутствие учета простоев подвижного состава в текущем ремонте [13].

При составлении графика ТО по фактическому пробегу постоянно учитывается пробег от предыдущего ТО и при достижении норматива ТО планируется постановка в зону ТО, как правило, на следующий день. Преимущества такого графика: своевременность выполнения ТО, независимость графика от простоев в текущем ремонте. Недостатки такого графика: неравномерная загрузка зоны ТО, относительная сложность составления и контроля выполнения графика [14].

Для решения второго комплекса задач составляется график поставок запасных частей, в котором взаимосвязаны периодичность и размер поставок.

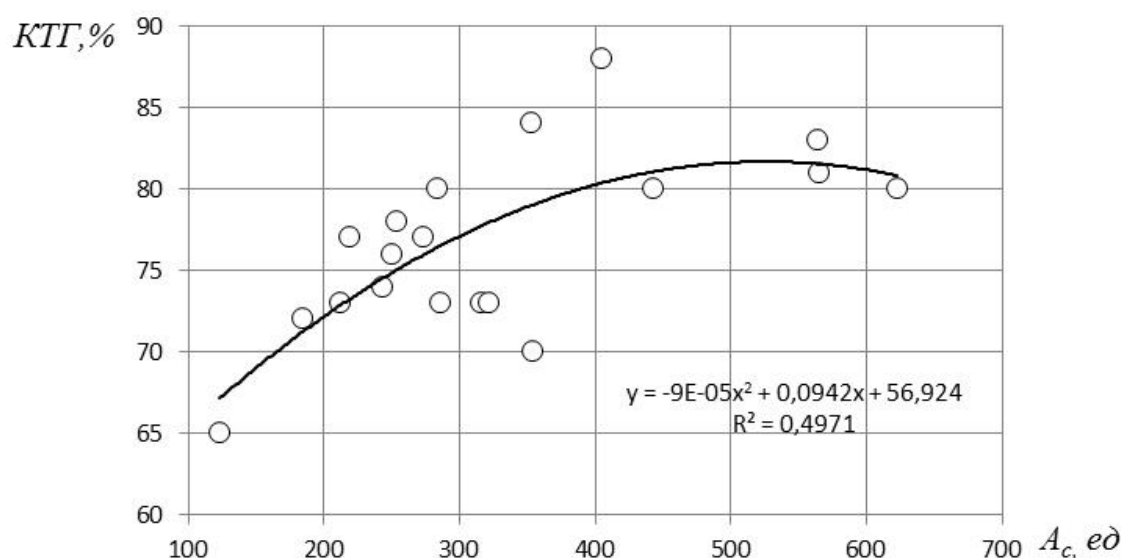


Рисунок 1 – Зависимость КТГ автобусов от масштаба парков по России [12]

Figure 1 – Dependence of technical readiness coefficient for buses on the scale of fleets in Russia [12]

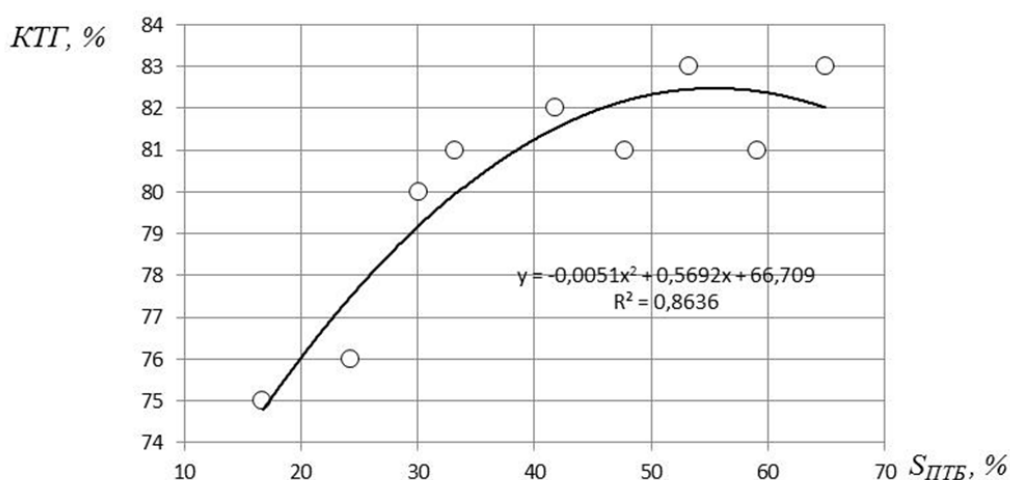


Рисунок 2 – Зависимость КТГ автомобилей от относительной стоимости ПТБ [12]

Figure 2 – Dependence of technical readiness coefficient for cars on the relative cost of PTB [12]

Для этого используются отчётные статистические данные по расходу запасных частей различной номенклатуры за предыдущие периоды. Важное значение при организации поставок имеет работа подразделений комплектации.

При распределении имеющихся запасных частей необходимо учитывать следующие факторы и приоритеты: потребность определяется объективно по результатам диагностирования или подраборки агрегатов; общий

объём текущего ремонта (простой); приоритеты службы коммерческой эксплуатации (полезность для предприятия конкретного автомобиля с учётом обслуживаемой клиентуры). Задачу эту целесообразно решать централизованно с учётом всех указанных факторов.

Третий комплекс задач решается с учётом различного типа специализированных постов текущего ремонта. В зависимости от характера работ посты текущего ремонта могут быть

универсальными (для выполнения всех видов работ по всем типам автотранспортных средств) и специализированными. Для этого они должны быть оснащены технологическим оборудованием для выполнения всех работ текущего ремонта [15, 16].

Преимуществами универсальных постов являются: простота планирования загрузки постов, малое время на заезд на посты ТР и связанные с этим расход топлива и загазованность помещения зоны ТР. Недостатки универсальных постов: требуются ремонтные рабочие широкой квалификации (универсалы), которых всегда не достаёт из-за сложности их подготовки, значительные простои технологического оборудования.

Для снижения влияния этих недостатков используется резервирование с учётом временной и структурной избыточности. Ограничить универсальность постов (номенклатуру работ), чем преобразовать его частично в специализированный с возможностью одновременного исполнения нескольких заявок. Структурную избыточность обеспечивает полная специализация постов (то есть повышение уровня специализации).

На специализированных постах выполняются отдельные группы операций. Основой специализации постов ТР может быть тип подвижного состава, ремонтируемые агрегаты и узлы, тип выполняемых работ. Преимущества специализированных постов: не требуются универсальные ремонтные рабочие, высокая загруженность технологического оборудования. Недостатки специализированных постов: сложность планирования загрузки постов, большие потери времени на перегон автомобилей с поста на пост и связанные с этим расход топлива и загазованность помещения зоны ТР, большие простои автобусов в ожидании ремонта. Обычно для компенсации этих недостатков используют рациональное сочетание специализированных и универсальных постов ТР (в среднем 75% на 25%) [17].

Решение четвёртого комплекса задач связано с тщательной подготовкой производства, которая позволяет ремонтным рабочим заниматься строго своими работами. Обычно ремонтные рабочие в зоне ТР закреплены за определёнными постами или группой постов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Управление процессами в целом предусматривает несколько основных этапов (рисун

ок 3). В основе управления находится цель, поставленная перед управляемой системой (блок 1 на рисунке 3). Для достижения цели необходима информация. После сбора, обработки и анализа информации (блоки 2 – 4 на рисунке 3) наступает этап принятия управленческого решения (блоки 5 – 7). Затем наступает этап действия – выполнение принятого решения. С окончанием действия сравнивают его результат с поставленной целью (блок 8 на рисунке 3).

Если результат действия (блок 9 на рисунке 3) совпадает с целью (что бывает крайне редко), то процесс управления завершён. Если совпадения результата и цели нет, то или корректируется цель, или собирается дополнительная информация и процесс управления повторяется. То есть управление представляет собой итерационный процесс постепенного достижения цели.

Для реализации этапов управления основными функциями являются планирование, организация работы, лидерство (приоритеты), контроль. Далее рассмотрим подробнее место и значимость каждой функции в связи с основными этапами управления.

Одним из вариантов совершенствования процесса ТОиР в крупных масштабах является процесс централизации, положительный эффект от которого показан на рисунке 4.

Децентрализованная система управления выравнивает заявки в несколько очередей (по числу постов ремонта). Очередная заявка занимает место в наименьшей очереди (рисунок 4, а). В этом случае информации о состоянии реализации впереди стоящих заявок нет, следовательно, это приводит к повышению простоев по причине ожидания своей очереди.

Централизованная система выравнивает все заявки в пределах одной очереди (рисунок 4, б). Дальнейшее распределение по постам ТР возлагается на центр управления производством (ЦУП), устраняющий вышеуказанные недостатки. Кроме того, ЦУП может переставлять места в очереди с учётом общего простоя в ремонте, наличия запасных частей, приоритетов службы коммерческой эксплуатации.

В таких предприятиях ежедневно в зоне текущего ремонта может находиться до 50 автомобилей. Для эффективного их ремонта целесообразна централизация процессов управления производством ТОиР автомобилей [18].

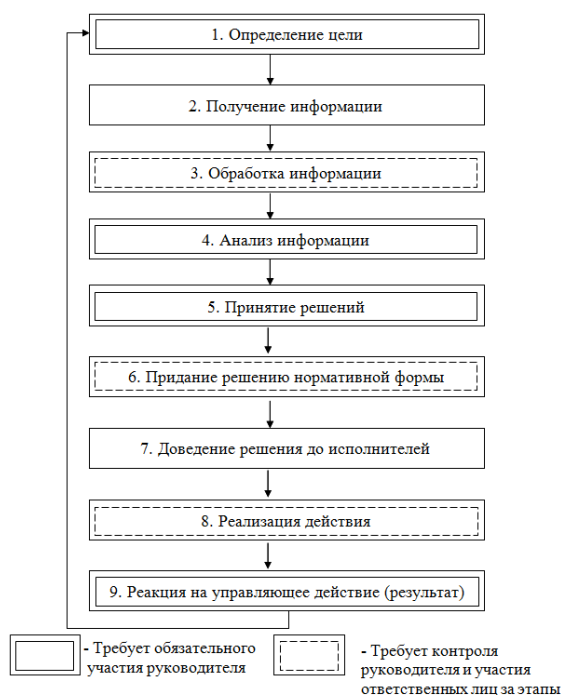


Рисунок 3 – Основные этапы управления [12]

Figure 3 – Main stages of management [12]

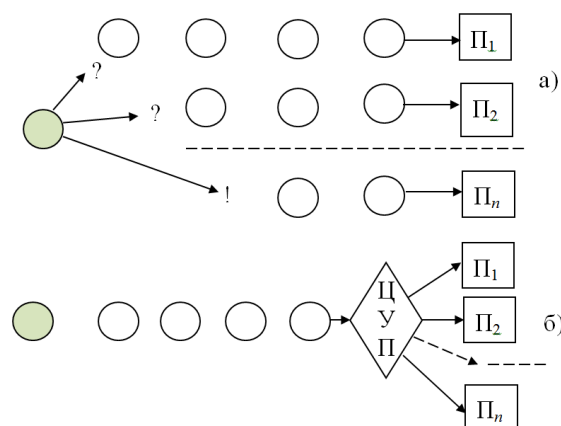


Рисунок 4 – Схема обслуживания заявок на ТР при децентрализованной (а) и централизованной (б) системах управления производством ТР [19]

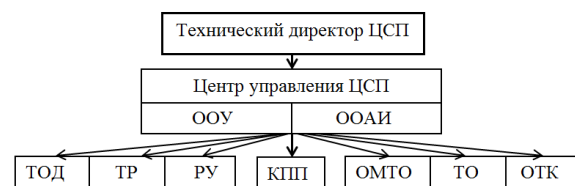
Figure 4 – The scheme of maintenance of requests for maintenance and repair in decentralized (a) and centralized (b) systems of management of maintenance and repair production [19]

Основными принципами централизованной системы управления производством (ЦСУП) являются:

- управление процессами ТОиР, включая диагностические работы, которые реализует ЦУП;

- объединение однородных по видам технических воздействий структурных подразделений в комплексы;
- подготовка производственного процесса по ТОиР является централизованной, т.е. комплексом подготовки производства (КПП);
- обмен информацией между ЦУП и комплексами основывается на принципе двухсторонней системы диспетчеризации.

Схема структуры технической службы при ЦСУП приведена на рисунке 5.

Рисунок 5 – Схема структуры ЦСП
Источник: составлено автором.Figure 5 – Diagram of the centralised specialised production structure
Source: compiled by the authors

Комплекс ТОД выполняет ТО, диагностирование автобусов, сопутствующие ремонты. В состав комплекса входят бригады: ежедневного обслуживания; ТО-1 с диагностированием Д-1; ТО-2; диагностирование Д-2 [20]. Комплекс ТР *включает* подразделения, выполняющие постовые работы.

КПП включает следующие подразделения [21]:

- группа комплектации;
- промежуточный склад;
- транспортный участок;
- моечно-дефектовочный участок;
- инструментальный участок.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, ЦУП осуществляет планирование работ и оперативное управление производственным процессом ТОиР в целом и подразделениями КПП в частности в рамках централизованной системы. В его состав входят две структуры:

- отдел оперативного управления (осуществляет прием смены; оперативный контроль выполнения плана всех видов обслуживания, диагностики и ремонта; оперативное планирование);
- отдел обработки и анализа информации (осуществляет прием и проверку первичных

документов для обработки; планирование и учет подвижного состава, запасных частей, технических воздействий для дальнейшей её передачи руководству предприятия).

Следовательно, использование данной системы оперативного управления ТОиР подвижного состава в рамках централизации сервисного обслуживания позволит ускорить выполнение производственных процессов с учетом массовости поступающих заявок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Басков В. Н., Игнатов А. В. Влияние режимов работы ДВС на загрязнение окружающей среды // Мир транспорта и технологических машин. 2018. № 3(62). С. 112-118.
2. Басков В.Н., Игнатов А.В. Интегральная оценка процесса эксплуатации машинно-тракторного парка // Научное обозрение. 2011. № 6. С. 92-97.
3. Бойко Н. Е., Калинина Е. А. Повышение эффективности функционирования автотранспортного предприятия на базе системного подхода к управлению службой ремонта // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. 2019. Т. 2. № 1. С. 49-59.
4. Бондаренко Е. В., Дрючин Д. А., Булатов С. В. Оценка целесообразности организации входного контроля качества запасных частей в условиях автотранспортного предприятия / Е. В. Бондаренко // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2021. № 2. С. 71-78. DOI 10.25198/2077-7175-2021-2-71.
5. Шиловский В. Н., Гольштейн Г. Ю. Методические основы обоснования мощностей объекта технического сервиса // Resources and Technology. 2020. Т. 17. № 4. С. 95-106. DOI 10.15393/j2.art.2020.5462.
6. Boryaev, A., Malygin, I., & Marusin, A. (2020). Areas of focus in ensuring the environmental safety of motor transport. *Transportation Research Procedia* Vol. 50 pp. 68-76. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.009.
7. Chernyaev, I., Oleshchenko, E., & Danilov, I. (2020). Methods for continuous monitoring of compliance of vehicles' technical condition with safety requirements during operation. *Transportation Research Procedia* Vol.50 pp. 77-85. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.010.
8. Kapustin, A., Vorobiev, S., Gordienko, V., & Marusin, A. (2020). Method for improving the safety of diesel vehicles when operating on gas engine fuel (gas diesel engines). *Transportation Research Procedia* Vol. 50 pp. 226-233. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.028.
9. Malshakov, A., & Akzholov, A. (2020). Method to determine required amount of spare parts for air suspension in large-size buses. *Transportation Research Procedia* Vol. 50 pp. 414-421. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.049.
10. Vladimir Baskov, Alexander Denisov, Anton Ignatov, Ekaterina Isaeva (2021) Mechanism

for assessing the adaptation of motor vehicles to operation in the Arctic zone of the Russian Federation. *Transportation Research Procedia*, Vol. 57, pp. 56-62. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.025>

11. Vladimir Baskov, Anton Ignatov, Vladislav Polotnyanshikov. (2020) Assessing the influence of operating factors on the properties of engine oil and the environmental safety of internal combustion engine. *Transportation Research Procedia*, Vol. 50. Pp. 37-43. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.005>

12. Денисов А. С. Совершенствование сервиса автобусов в условиях мегаполисов / А. С. Денисов, Е. В. Феклин; Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А. Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2020. 160 с. ISBN 978-5-7433-3378-3. EDN AOZZWQ

13. Пестриков С.А., Шумков А.Г. Методика оценки эффективности организации технического обслуживания и ремонта на примере транспортного подразделения филиала ОАО «МРСК Урала» - «Пермэнерго» // Вестник ПНИПУ. Социально-экономические науки. 2019. №1. С 233-244.

14. Крючков Е. Ю., Кабикенов С. Ж., Интыков Т. С. Разработка паспорта планово-предупредительной системы проведения ТО и ТР для автобусов YUTONG на примере ТОО «Автобусный парк №3» г. Караганды // Труды университета. 2020. № 3(80). С. 97-101.

15. Методический подход к определению удельной трудоемкости текущего ремонта автобусов ЛиАЗ-529221 и ЛиАЗ-621321 в эксплуатации / В. А. Максимов [и др.] // Грузовик. 2018. № 8. С. 11-14.

16. Нгендакумана М., Ременцов А. Н. К вопросу оценки надежности автомобилей, выполняющих пассажирские перевозки в Бурунди // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2021. № 1(64). С. 91-99.

17. Булатов С. В. Методика прогнозирования объемов работ по техническому обслуживанию и текущему ремонту автобусов // Мир транспорта и технологических машин. 2018. № 1(60). С. 28-34.

18. Тузов Н. С., Попов Е. В. Техническая подготовка производства технического обслуживания и ремонта автобусов - основа эффективности // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2019. Т. 1. № 3. С. 216-220.

19. Гутуев, М. Ш. Оптимизация системы технического сервиса регионального дилера / М. Ш. Гутуев, О. А. Есин // Аграрный научный журнал. 2016. № 6. С. 51-53. EDN WIQJIL.

20. Карташов В.П. Развитие производственно-технической базы автотранспортных предприятий. М.: Транспорт, 1991. 151 с.

21. Шипов Н. В., Максимов В. А., Поживилов Н. В. Применение планово-предупредительного ремонта при эксплуатации линейных городских автобусов // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2021. № 1. С. 77-83. DOI 10.15593/24111678/2021.01.10.

REFERENCES

1. Baskov V. N., Ignatov A. V. Vliyanie rezhimov raboty DVS na zagryaznenie okruzhajushhej sredy [Influence of the operation modes of internal combustion engines on environmental pollution]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. 2018; 3(62):112-118. (in Russ.)
2. Baskov V. N., Ignatov A. V. Integral'naja ocenka processa jekspluatacii mashinno-traktornogo parka [Integral assessment of the process of operation of the machine and tractor fleet]. *Nauchnoe obozrenie*. 2011; 6: 92-97. (in Russ.)
3. Bojko N. E., Kalinina E. A. Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovaniya avtotransportnogo predpriyatija na baze sistemnogo podhoda k upravleniju sluzhboj remonta [Increasing the efficiency of motor transport enterprise functioning on the basis of a systematic approach to repair service management]. *Vestnik Volzhskogo universiteta im. V.N. Tatishheva*. 2019; T. 2. No. 1: 49-59. (in Russ.)
4. Bondarenko E. V., Drjuchin D. A., Bulatov S. V. Ocenka celesoobraznosti organizacii vhodnogo kontrolja kachestva zapasnykh chastej v uslovijah avtotransportnogo predpriyatija [Assessing the feasibility of organizing the input quality control of spare parts in a motor transport enterprise]. *Intellekt. Innovacii. Investicii*. 2021; 2: 71-78. (in Russ.) DOI 10.25198/2077-7175-2021-2-71.
5. Shilovskij V. N., Gol'shtejn G. Ju. Metodicheskie osnovy obosnovaniya moshhnostej ob'ekta tehničeskogo servisa [Methodological bases of justification of capacity of a technical service object]. *Resources and Technology*. 2020; T. 17. No. 4:95-106. (in Russ.) DOI 10.15393/j2.art.2020.5462.
6. Boryaev A., Malygin, I., & Marusin, A. Areas of focus in ensuring the environmental safety of motor transport. *Transportation Research Procedia*. 2020; Vol. 50: 68-76. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.009.
7. Chernyaev, I., Oleshchenko, E., & Danilov, I. Methods for continuous monitoring of compliance of vehicles' technical condition with safety requirements during operation. *Transportation Research Procedia*. 2020; Vol.50: 77-85. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.010.
8. Kapustin, A., Vorobiev, S., Gordienko, V., & Marusin, A. Method for improving the safety of diesel vehicles when operating on gas engine fuel (gas diesel engines). *Transportation Research Procedia*. 2020; Vol. 50: 226-233. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.028.
9. Malshakov A., & Akzholov A. Method to determine required amount of spare parts for air suspension in large-size buses. *Transportation Research Procedia*. 2020. Vol. 50: 414-421. doi:10.1016/j.trpro.2020.10.049.
10. Vladimir Baskov, Alexander Denisov, Anton Ignatov, Ekaterina Isaeva Mechanism for assessing the adaptation of motor vehicles to operation in the Arctic zone of the Russian Federation. *Transportation Research Procedia*. 2021; Vol. 57: 56-62. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.025
11. Vladimir Baskov, Anton Ignatov, Vladislav Polotnyanshikov. Assessing the influence of operating factors on the properties of engine oil and the environmental safety of internal combustion engine. *Transportation Research Procedia*. 2020; Vol. 50: 37-43. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.005
12. Denisov A. S., Feklin E. V. *Sovershenstvovanie servisa avtobusov v uslovijah megapolisov* [Improvement of bus service in megapolis conditions]. Saratovskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet imeni Gagarina Ju.A.. Saratov: Saratovskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet imeni Gagarina Ju.A., 2020. 160 p. ISBN 978-5-7433-3378-3. (in Russ.) EDN AOZZWQ
13. Pestrikov S. A., Shumkov A. G. Metodika ocenki jeffektivnosti organizacii tehničeskogo obsluzhivaniya i remonta na primere transportnogo podrazdelenija filiala OAO "MRSK Urala" - "Permjenergo" [Methodology for assessing the effectiveness of the organization of maintenance and repair on the example of the transport division of the branch of JSC "MRSK Urals"]. *Vestnik PNIPU. Social'no-jekonomicheskie nauki*. 2019; 1: 233-244. (in Russ.)
14. Krjuchkov E. Ju., Kabikenov S. Zh., Intykov T. S. Razrabotka pasporta planovo-predupreditel'noj sistemy provedeniya TO i TR dlja avtobusov YUTONG na primere TOO "Avtobusnyj park №3" g. Karagandy [Development of the passport of the planned preventive maintenance and servicing system for buses YUTONG on the example of LLP "Bus Park №3" Karaganda]. *Trudy universiteta*. 2020; 3 (80): 97-101. (in Russ.)
15. Maksimov V. A. Metodicheskij podhod k opredeleniju udel'noj trudoemkosti tekushhego remonta avtobusov LiAZ-529221 i LiAZ-621321 v jekspluatacii [Methodical approach to determining the specific labor intensity of the current repair of buses LiAZ-529221 and LiAZ-621321 in operation]. *Gruzovik*. 2018; 8: 11-14. (in Russ.)
16. Ngendakumana M., Remencov A. N. K voprosu ocenki nadezhnosti avtomobilej, vypolnjajushhih passazhirskie perevozki v Burundi [To the question of assessing the reliability of vehicles performing passenger transportation in Burundi]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta (MADI)*. 2021; 1(64): 91-99. (in Russ.)
17. Bulatov S. V. Metodika prognozirovaniya ob'emov rabot po tehničeskomu obsluzhivaniyu i tekushhemu remontu avtobusov [Methodology of forecasting the volume of work on maintenance and current repair of buses]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. 2018; 1(60): 28-34. (in Russ.)
18. Tuzov N. S., Popov E. V. Tehničeskaja podgotovka proizvodstva tehničeskogo obsluzhivaniya i remonta avtobusov - osnova jeffektivnosti [Technical preparation of bus maintenance and repair production - the basis of efficiency]. *Dal'nij Vostok: problemy razvitiya arhitekturno-stroitel'nogo kompleksa*. 2019. T. 13: 216-220. (in Russ.)
19. Gutuev M. Sh., Esin O. A. Optimizacija sistemy tehničeskogo servisa regional'nogo dilera [Optimization of technical service system of a regional dealer]. *Agrarnyj nauchnyj zhurnal*. 2016; 6: 51-53. (in Russ.) EDN WIQJIL.

20. Kartashov V. P. Razvitie proizvodstvenno-technicheskoy bazy avtotransportnyh predpriyatij [Development of the industrial and technical base of motor transport enterprises]. Moscow, Transport, 1991. 151 p. (in Russ.)

21. Shipov N. V., Maksimov V. A., Pozhivilov N. V. Primenenie planovo-predupreditel'nogo remonta pri jekspluatacii linejnyh gorodskih avtobusov [Application of preventive maintenance in the operation of linear city buses]. *Transport. Transportnye sooruzhenija. Jekologija*. 2021; 1: 77-83. (in Russ.) DOI 10.15593/24111678/2021.01.10.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Феклин Евгений Викторович – канд. экон. наук, доц., доцент кафедры «Организация перевозок, безопасность движения и сервис автомобилей».

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Evgeny V. Feklin – Cand. of Sci, Associate Professor, Associate Professor of Transport Organisation, Traffic Safety and Vehicle Service Department.

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE



МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ РОВНОСТИ И ПРОЧНОСТИ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД НА ОСНОВАНИИ ТЕОРЕТИЧЕСКО-ПРАКТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ю. В. Буртыль*, Д. В. Капский

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Беларусь

burtyl76@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9170-5257>
d.kapsky@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-9300-3857>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Существующие средства измерения упругого прогиба дорожной конструкции в большинстве стран являются низкопроизводительными для объемов сети дорог области или страны. Дефлектометры, применяемые при оценке прочности дорожных конструкций выполняют ежегодный объем измерений для сезона положительных температур примерно до 3000 км в год. Таким образом, для Республики Беларусь основной прочностной параметр дороги измеряется с периодичностью 5-7 лет на сети республиканских дорог продолжительностью около 16000 км и с еще большей периодичностью для сети дорог Казахстана, России. Складывающаяся ситуация не позволяет своевременно определять несущую способность конструкции, отсутствие информации приводит к ущербу от проезда тяжелых грузовиков, плату за проезд при снижении несущей способности, формированию критических дефектов дорожной конструкции, снижению эффективности распределения бюджетных средств при планировании ремонтов.

Материалы и методы. Методология исследований основана на существующей практике расчета общего модуля упругости, методах прогнозирования изменения ровности покрытий. Модель может быть дополнением к существующим системам оценки транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог всех уровней.

Результаты. В статье представлена модель зависимости ровности от прочности дорожной конструкции. Исходя из условий эксплуатации и начального значения ровности дорожных покрытий предлагается выполнять расчет коэффициента прочности дорожных конструкций для разных категорий дорог и интенсивности движения. Изменение в структуре материалов вызывают деформации и неровности и показатель ровности интегрирует все виды деформаций. По этой причине предполагается, что существует зависимость между прочностью и ровностью дорожных конструкций.

Заключение. Предлагаемая модель может применяться в первую очередь для оценки прочности дорог низких категорий, на участках дорог местной сети дорог, т.е. там где диагностика не проводится или проводится с большой периодичностью. Данная модель может быть широко использована предприятиями дорожной отрасли, заказчиком для выбора в ремонт наиболее ослабленных участков дорог, подрядчиком для расчета усиления при выполнении ремонтных работ. Практическими измерениями на опытных участках подтверждается зависимость снижения прочности на участках с неудовлетворительной ровностью.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: продольная ровность, коэффициент прочности, нежесткие дорожные одежды, интенсивность движения, математическая модель, несущая способность.

Статья поступила в редакцию 01.06.2022; одобрена после рецензирования 22.07.2022; принята к публикации 27.07.2022.

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: Буртыль Ю. В., Капский Д. В. Моделирование взаимосвязи ровности и прочности нежестких дорожных одежд на основании теоретическо-практических исследований // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19, № 4 (86). С. 570-583. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583>

© Буртыль Ю. В., Капский Д. В., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583>

EDN: MGXUAY

MODELLING THE RELATIONSHIP OF SMOOTHNESS AND RESISTIBILITY IN NON-RIGID PAVEMENTS BASED ON THEORETICAL AND PRACTICAL STUDIES

Yury V. Burtyl*, Denis V. Kapski

Belarusian National Technical University,

Minsk, Belarus

burtyl76@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9170-5257>

d.kapsky@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-9300-3857>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The existing means of measuring the elastic deflection of the road structure in most countries are low-performance for the volume of the road network of a region or country. Deflectometers used in assessing the strength of road structures perform annual measurements for the season of positive temperatures up to about 3000 km per year. Thus, for the Republic of Belarus, the main strength parameter of the road is measured with a frequency of 5-7 years on the network of republican roads of about 16,000 km and with an even greater frequency for the road network of Russia and Kazakhstan. The current situation does not allow to determine the bearing capacity of the structure in a timely manner and the lack of information leads to damage from the passage of heavy trucks, fares with a decrease in bearing capacity, the formation of critical defects in the road structure, and a decrease in the efficiency of budget allocation when planning repairs.

Materials and methods. The research methodology is based on the existing practice of calculating the total modulus of elasticity, methods for predicting changes in the evenness of coatings. The model can be an addition to the existing system for assessing the transport and operational condition of roads at all levels.

Results. The article presents a model of the dependence of evenness on the strength of the road structure. Based on the operating conditions and the initial value of the evenness of road surfaces, it is proposed to calculate the strength factor of road structures. The changes in the structure of materials cause deformations and irregularities, and the evenness index integrates all types of deformations. For this reason, it is assumed that there is a relationship between strength and evenness of road structures.

Conclusion. The proposed model can be used primarily to assess the strength of roads of low categories, road sections of the local road network, i.e. where diagnostics are not carried out or are carried out with a large frequency. This model can be widely used by road industry enterprises, by a customer to select the most weakened road sections for repair, and by the contractor to calculate the reinforcement during repair work. The practical measurements in experimental areas confirm the dependence of the decrease in strength in areas with unsatisfactory evenness.

KEYWORDS: longitudinal evenness, strength factor, non-rigid pavement, traffic intensity, mathematical model, bearing capacity.

The article was submitted 01.06.2022; approved after reviewing 22.07.2022; accepted for publication 27.07.2022.

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: Burtyl Y. V., Kapski D. V. Modelling the relationship of smoothness and resistibility in non-rigid pavements based on theoretical and practical studies. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (4): 570-583. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583>

© Burtyl Y. V., Kapski D. V., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

Предпосылки для исследований. Исследования и методы современной практики подтвердили взаимосвязь процессов формирования дефектов и деформаций с возникновением и отражением неровностей на дорожном покрытии [1, 2]. Деформации материала являются определяющим фактором снижения его прочностных характеристик и в итоге несущей способности. Суммарный объем неровностей отражает все виды разрушений и может служить интегрированным показателем эксплуатационного и безопасного состояния дорог с асфальтобетонным покрытием. Снижение прочности дорожной конструкции вызвано необратимыми деформациями, которые в свою очередь отражаются на ровности покрытия [3].

Использование упругого прогиба конструкции в расчете дорожных одежд представлялось достаточно целесообразным и удобным, учитывая накопленный фактический материал, имеющийся в дорожной отрасли в отношении этого критерия. Этот показатель длительное время являлся и является в настоящее время основой для оценки прочности дорожных одежд в процессе их эксплуатации [4].

Проблематика вопроса. Однако проблематика оценки прочности дорожных конструкций заключается в том, что:

1) измерение упругого прогиба – это дискретные измерения с установленной периодичностью (200 м и более), что не позволяет оценивать прочность на всем участке дороги, а точнее между точками измерения;

2) расчет требуемого модуля упругости проводится на основании только интенсивности движения (7) и не аккумулирует все внешние воздействия, такие как температура, влажность, периодичность и скорость нагружения;

3) расчет общего модуля упругости выполняется по номограммам, при проектировании, а при измерении инструментально на дороге применяется абсолютно другая математическая модель (13), что не позволяет достоверно прогнозировать изменение прочности;

4) пластические деформации не учитываются как вид разрушения при измерении и расчете прочностных характеристик;

5) производительность лабораторий и средств измерений упругого прогиба не позволяют охватывать при проведении диагностики

дорог значительную протяженность сети дорог в год.

Предлагаемое решение. Ровность дорожных покрытий – это критерий прежде всего безопасности и удобства движения, что очень важно для пользователей дорог. Накопление деформаций в дорожной одежде следует также рассматривать как деформационное разупрочнение, описываемое посредством соответствующего изменения макросвойств объема материала, сопровождающееся накоплением неровностей. Таким образом, неровности, отраженные на покрытии, могут характеризовать общее снижение как прочности отдельных материалов, так и надежность конструкции в целом [5]. В качестве оценочного параметра ровности последние десятилетия во многих странах использовался международный индекс ровности IRI¹. Построение математической модели между ровностью и прочностью дорожной конструкции позволит систематизировать общий подход к оценке состояния дорог, в первую очередь по объему неупругих деформаций, которые в настоящее время не учитываются

Практическое применение. Движение по покрытию с различной формой неровностей сопровождается ударами, колебаниями колес и кузова автомобиля, что вызывает увеличение динамических нагрузок на дорожные конструкции и в последствии – преждевременные разрушения. Увеличивается коэффициент динамичности и соответственно осевая нагрузка. Разработка модели прогнозирования ровности от прочности дорожной конструкции позволит более оперативно устанавливать прочностной ресурс дорожных конструкций для сети дорог.

Основной целью исследований является формирование модели зависимости коэффициента прочности дорожной конструкции и ровности покрытия. Реализация выполнения основывается на следующих задачах: разработка математической модели, опытное подтверждение математической модели.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При стабильной работе уплотненных слоев покрытия и основания формирование неровностей к концу расчетного срока проходит в установленных пределах. В этом случае надежность дорожной конструкции в течение всего срока службы по приросту неровностей обеспечена при условии (1) [6]:

¹ ASTM E1170-97 (2017) Standard practices for simulating vehicular response to longitudinal profiles of traveled surfaces

$$K_{н.р.} = \frac{\Delta IRI_{норм}}{\Delta IRI_{факт}} = 1, \quad (1)$$

где $K_{н.р.}$ – коэффициент эксплуатационной надежности по условиям безопасности дорожного движения;

$\Delta IRI_{норм}$ – нормативное значение прироста неровностей дорожного покрытия за расчетный период, м/км;

$\Delta IRI_{факт}$ – фактическое значение прироста неровностей дорожного покрытия, м/км.

Для выражения (1) фактический прирост неровностей покрытия не должен превышать нормативное значение по условиям безопасности в течении расчетного срока службы.

Согласно теории Качанова-Работнова текущее состояние внутренней поврежденности образца можно охарактеризовать с помощью параметра поврежденности D , который является монотонно возрастающей функцией времени в интервале $0 \leq D \leq 1$. Параметр поврежденности интерпретируется как относительное уменьшение площади поперечного сечения вследствие возникновения внутри образца микродефектов (2) [7]:

$$D = \frac{S_{факт}}{S_{норм}}, \quad (2)$$

где $S_{факт}$ – площадь поперечного сечения, уменьшенная вследствие возникновения неупругих деформаций от внешнего воздействия за расчетный период, m^2 .

$S_{норм}$ – площадь поперечного сечения при работе материала при отсутствии неупругих деформаций и микроразрушений, m^2 ;

Деграция материала обусловлена постепенным уменьшением эффективной площади, которая несет растягивающую нагрузку и определяет сопротивляемость образца растяжению. Числитель выражения (2) возрастает с увеличением объемов внешнего воздействия.

Интенсивность движения транспортных средств – это основной фактор, вызывающий прирост деформаций и разрушений в дорожной конструкции. Именно суммарное количество расчетных автомобилей принимается в качестве расчетного параметра прочностных характеристик автомобильных дорог.

По условию накопление усталостных повреждений асфальтобетонного покрытия, с

точки зрения гипотезы Пальмгрена-Майнера, усталостные разрушения зависят от фактического и допустимого количества приложенных расчетных нагрузжений [8]. С точки зрения линейного накопления усталостных деформаций от расчетных нагрузок повреждаемость по (2) для дорожной конструкции представим в виде (3) [9]:

$$D = \frac{n}{N}, \quad (3)$$

где n – фактическое количество приложений расчетной нагрузки в течение расчетного периода, ед.;

N – максимальное количество приложений расчетной нагрузки, которые могут выдержать дорожные одежды для обеспечения заданной надежности при работе конструкции в упругой стадии, ед.

Работоспособность и безопасность дорожного покрытия, дорожной одежды зависят от изменения ровности покрытия и количества приложенных расчетных нагрузок, определяющих величину коэффициента надежности [9]. Следовательно, выражения (1) и (3) тождественны и взаимозависимы, при обеспечении срока службы приравнены (4)

$$\frac{\Delta IRI_{норм}}{\Delta IRI_{факт}} = \frac{n}{N}. \quad (4)$$

Тогда из выражения (4) фактическое значение к концу срока службы определяется выражением (5)

$$\Delta IRI_{факт} = \frac{N}{n} \times \Delta IRI_{норм}. \quad (5)$$

Для определения покрытия с учетом начальных параметров значение ровности заменим как изменение ровности (6)

$$IRI_{факт} - IRI_0 = \frac{N}{n} \times (IRI_{норм} - IRI_0), \quad (6)$$

где IRI_0 – начальное значение ровности при вводе объекта в эксплуатацию по требованию приемочного контроля, м/км (таблица 1);

$IRI_{норм}$ – нормативное значение ровности по условиям безопасности дорожного движения, м/км (таблица 2).

Таблица 1
Нормативные требования к ровности асфальтобетонных покрытий IRI_0
после ремонта (строительства)
Источник: составлено авторами.

Table 1
Regulatory requirements for smoothness of asphalt concrete pavements IRI_0
after repair (construction)
Source: compiled by the authors.

Страна (стандарт, рекомендации)	Ровность дорожных покрытий для категорий автомобильных дорог IRI_0 , м/км				
	I	II	III	IV	V
Беларусь (таблица 15, ТКП 059.1-2020), возведение	1,5	1,8	1,8	2,5	2,5
Россия (п. 16.5, СП 78.13330.2012)	2,2	2,2	2,6	2,6	-
Россия (приложение, ТР 134-03, рекомендации)	1,4	1,6	1,6	1,8	2,1
Казахстан (п. 6, ПР РК 218-03-2016, отлично)	1,8	2,3	2,3	2,3	2,3
Казахстан (п. 4.1.4, ПР РК 218-49-2005)	2,3	2,8	2,8	-	-

Таблица 2
Нормативные требования к ровности асфальтобетонных покрытий IRI_{norm}
по условиям безопасности движения
Источник: составлено авторами.

Table 2
Regulatory requirements for the smoothness of asphalt concrete pavements IRI_{norm}
for traffic safety conditions
Source: compiled by the authors.

Страна (стандарт, рекомендации)	Ровность дорожных покрытий для категорий (уровня требований/ состояния) автомобильных дорог IRI_{norm} , м/км				
	I(1)	II(2)	III (3)	IV(4)	V(5)
Беларусь (п. 6.1.1, СТБ 1291-2016, по уровням требований)]	4,1	5,5	6,2	7,3	7,5
Россия (таблица 5.1, ГОСТ Р 50597-2017)	4,0	4,5	5,0	6,0	7,5
Казахстан (п. 5.2.4, СТ РК 1912-2009, по уровню эксплуатационного состояния)	3,4	4,7	5,0	5,6	5,6

В Республике Беларусь, странах СНГ допустимое количество расчетных автомобилей (N) устанавливается исходя из суточной интенсивности движения, приведенной к расчетной с учетом ежегодного прироста за срок службы. С увеличением количества расчетных автомобилей увеличивается модуль конструкции дорожной одежды (7) [10, с. 177]:

$$E_{\text{тр}} = 98,65 \times (\lg(N) - C), \quad (7)$$

где $E_{\text{тр}}$ – требуемый модуль упругости дорожной конструкции, МПа;

C – параметр уравнения, в зависимости от расчетной нагрузки.

Выражение (6) определения фактической ровности покрытия для эксплуатационного состояния при отношении фактического и требуемого модулей упругости преобразуем в (8)

$$IRI_{\text{факт}} = \frac{E_{\text{тр}}}{E_{\text{факт}}} \times IRI_{\text{норм}} + IRI_0 \times \left(1 - \frac{E_{\text{тр}}}{E_{\text{факт}}}\right), \quad (8)$$

где $E_{\text{факт}}$ – фактический измеренный модуль упругости дорожной конструкции, МПа.

Отношение модулей упругости согласно методике на проектирование нежестких дорожных одежд определяется как коэффициент прочности дорожной конструкции (9), для данного случая фактический коэффициент прочности²:

$$K_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{факт}}}{E_{\text{тр}}}, \quad (9)$$

где $K_{\text{пр}}$ – коэффициент прочности дорожной конструкции.

С учетом отношения (9) определение фактической ровности с учетом текущего эксплуатационного состояния представляется в виде (10)

$$IRI_{\text{факт}} = \frac{1}{K_{\text{пр}}} \times IRI_{\text{норм}} + IRI_0 \times \left(1 - \frac{1}{K_{\text{пр}}}\right). \quad (10)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Построим график изменения коэффициента прочности и фактической ровности для дорог различных категорий, используя уравнение (10) и аппроксимированную линейную функцию (рисунки 1-2).

В научно-прикладной практике учеными предлагались модели зависимости ровности от прочностных характеристик. При отсутствии данных об интенсивности движения минимальный модуль упругости в исследованиях Е. В. Каленовой предлагается определять исходя из максимально допустимой ровности покрытия [11]:

$$E_{\text{min}} = -11,477 \times S + 294,77, \quad (11)$$

где E_{min} – минимальный требуемый модуль упругости дорожной конструкции, МПа;

S – допустимая ровность покрытия к концу срока службы дорожной одежды, измеренная по 3-метровой рейке, мм.

По данным исследований О. А. Красикова установлено, что величина относительного изменения ровности покрытия зависит от прочности и однородности дорожной одежды (12), характеризуемой стандартом отклонения модуля упругости, а также суммарной интенсивностью движения [12]:

$$S_t = S_o \left(1 + c \cdot E_{\text{min}}^d \cdot N_c(t)^{a \cdot E_{\text{min}}^b}\right), \quad (12)$$

где S_t – прогнозируемое значение ровности, см/км;

S_o – начальное значение ровности покрытия, см/км;

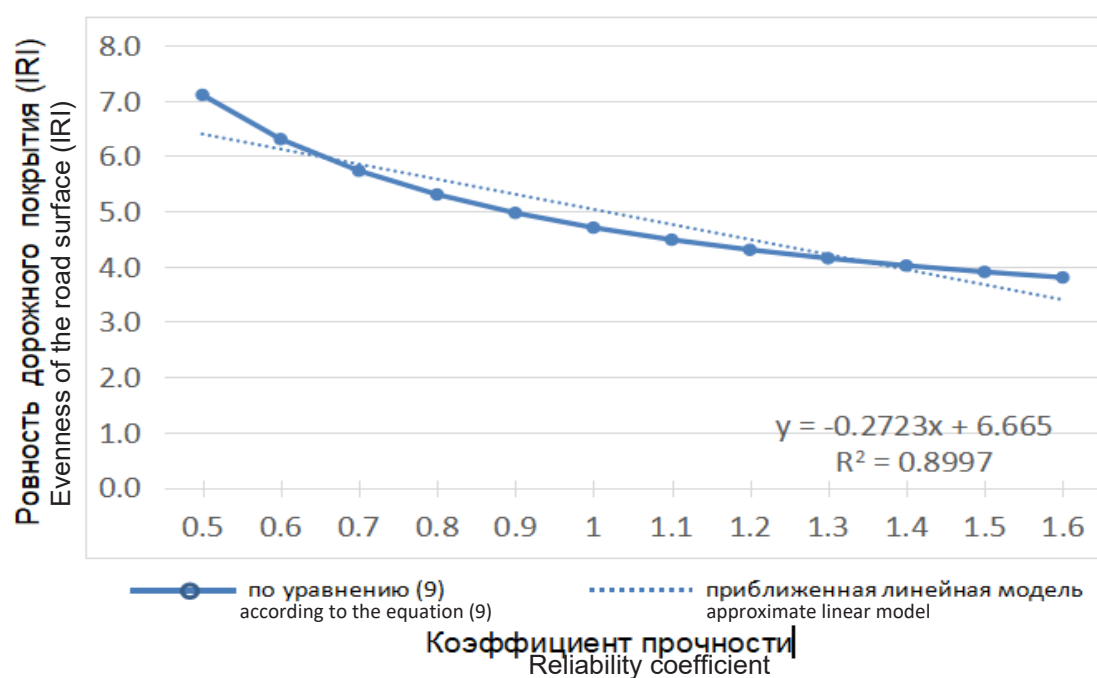
E_{min}^d – минимальный модуль упругости с заданной надежностью при односторонней доверительной вероятности, МПа;

$N_c(t)$ – суммарная интенсивность, приведенная к расчетной нагрузке, авт./сут;

t – время службы дорожной одежды, лет;

a, b, c, d – параметры, значения которых устанавливаются на основании эксперимента.

² Афиногенов О. П. Конструирование и расчет дорожных одежд: учебное пособие / О. П. Афиногенов, С. В. Ефименко, В. Н. Ефименко; под ред. С. В. Ефименко. 2-е изд., доп. и перераб. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2020. 444 с.



a – III категория a – III category

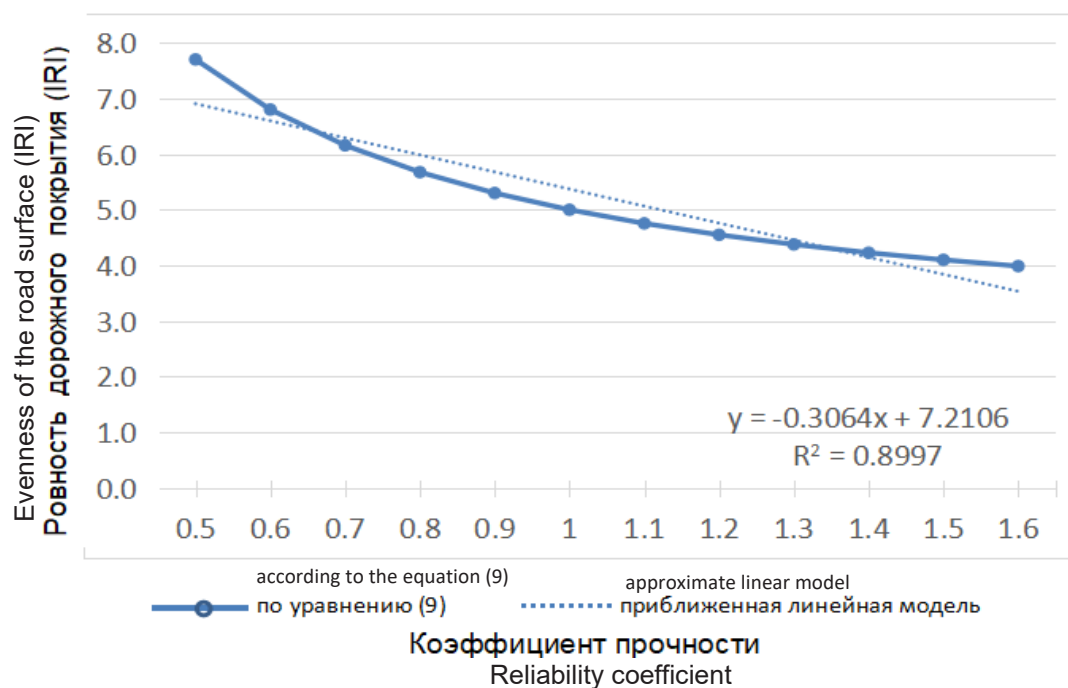


Рисунок 1 – Прогнозное изменение ровности дорожного покрытия при изменении прочности дорожной конструкции для дорог II-III категории
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Predictive change in the smoothness of the road surface with a change in the resistibility of the road structure for roads of 2-3 categories
Source: compiled by the authors.

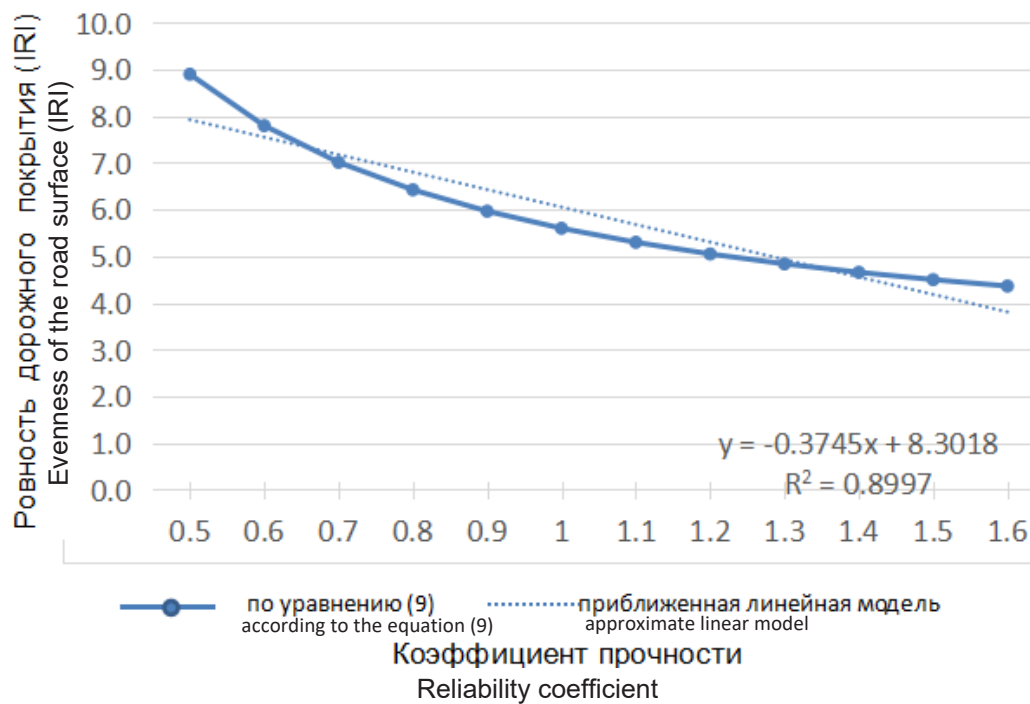


Рисунок 2 – Прогнозное изменение ровности дорожного покрытия
изменении прочности дорожной конструкции для дорог IV категории
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Predictive change in the smoothness of the road surface,
change in the strength of the road structure for roads of 4 category
Source: compiled by the authors.

Испытания по измерению величины упругого прогиба покрытия под воздействием динамического нагружения проводились дефлектометром падающего груза PRI2100 FWD по ГОСТ 32729-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Метод измерения упругого прогиба нежестких дорожных одежд для определения прочности» (рисунок 3).

В качестве объектов исследований принимались опытные участки республиканских автомобильных дорог. Модуль упругости конструкции (E_p) определялся по формуле (13) [13]:

$$E_p = \frac{p \cdot D(1 - \mu^2)}{l_f}, \quad (13)$$

где p – удельное давление, $p=0,6$ МПа;

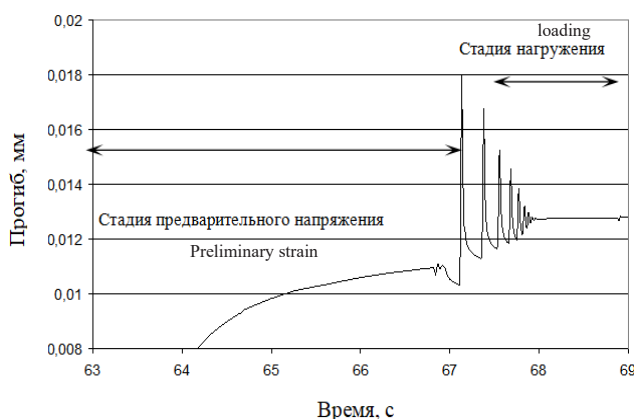
D – диаметр круга, эквивалентный отпечатку штампа, $D = 0,33$ м;

μ – коэффициент Пуассона, $\mu = 0,33$;

l_f – измеренный и далее приведенный к расчетной нагрузке упругий прогиб дорожной одежды по формуле (14), м



а – установка измерения
упругого прогиба
а – Deflection measurement device



б – деформация при проведении
испытаний
b – Deformation during testing

Рисунок 3 – Установка динамического нагружения – дефлектометр падающего груза PRI 2100 FWD для измерения упругого прогиба дорожной конструкции
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Dynamic loading setup - PRI 2100 FWD drop load deflectometer for measuring the elastic deflection of a road structure
Source: compiled by the authors.

$$l_f = l \cdot \frac{Q_p}{Q_f}, \quad (14)$$

где l – измеренный упругий прогиб дорожной одежды, м;

Q_p – расчетная нагрузка, $Q_p = 50$ кН;

Q_f – фактическая нагрузка, кН.

В международном сообществе в качестве одного из способов принято оценивать неровности дорожных покрытий по индексу IRI. Международный индекс IRI – это математическое представление накопленного хода подвески транспортного средства, деленное на пройденное расстояние [14].

Индекс IRI имеет единицы уклона профиля: метр на километр или миллиметр на метр³. Ровность покрытия по индексу IRI измерялось установкой «Профилограф» (рисунок 4).

Принцип работы установки основан на отражении лазерного луча от поверхности по-

крытия. Основным измерительным органом при работе установки «Профилограф» являются лазерные сенсоры.

Измерения проводились на опытных участках республиканских дорог (13 участков), при общем количестве измерений 2477 по ГОСТ 33101-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Покрывтия дорожные. Методы измерения ровности». По результатам измерений на каждом участке строились кумулятивные кривые и для уровня надежности 0,9 принимались значения IRI и E_p на участке⁴. Оценка на долговечность дорог может быть разработана и внедрена на основе базы данных ровности дорог без дорогостоящего сбора данных о воздействии конкретного автомобиля [15]. Результаты проведения испытаний приведены в таблице 3⁵.

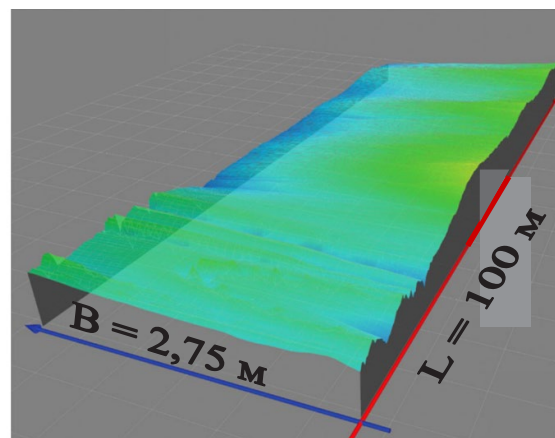
³ ASTM E950 / E950M-09 Standard test method for measuring the longitudinal profile of traveled surfaces with an accelerometer established inertial profiling reference

⁴ Щеколдин В. Ю. Развитие методов классификации на основе анализа кумулятивных кривых / В. Ю. Щеколдин, М. Ю. Лысенко // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП - 2018: материалы междунар. научно-техн. конф., Новосибирск 2-6 окт. 2018 г.: в 8 т. / Новосибирский гос.техн. ун-т ; редкол. А.А. Батаев [и др.]. Новосибирск, 2018. С. 97–100.

⁵ Отчет о транспортно-эксплуатационном состоянии и назначении ремонтных мероприятий на 2017 год сети республиканских автомобильных дорог Республики Беларусь



а – измерительная установка
«Профилограф»
а – Profilograph measuring device



б – построение профиля при
измерении установкой «Профилограф»
b – profiling by measuring with the Profilograph

Рисунок 4 – Установка измерения ровности дорожных покрытий
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Installation for measuring the smoothness of road surfaces
Source: compiled by the authors.

Таблица 3

Результаты измерений и расчета ровности покрытия, модуля упругости
Источник: составлено авторами.

Table 3

Results of measurements and calculation of the smoothness, modulus of reliability
Source: compiled by the authors.

Титул дороги	Участок, км	Кол-во измерений	Модуль упругости, МПа	Ровность покрытия, м/км
М-7	57,823-62	58	222	5,8
М-5	21,243-32,2	111	305	3,9
Р-10	3,9-19	219	287	5,3
Р-101	0-25,7	258	154	6,6
Р-105	0-17,8	253	165	7,1
Р-107	0,57-11,7	160	193	5,4
Р-108	4,560-16,5	161	288	4,1
Р-120	55-72,3	173	200	7,0
Р-123	1-15,7	147	195	6,1
Р-34	5,5-33,7	283	173	8,1
Р-35	5-20	430	217	7,4
Р-56	2-10,8	123	184	6,7
Р-77	1,3-8,3	101	221	5,2

Графическое построение корреляционной зависимости методом наименьших квадратов по полученным результатам приведено на рисунке 5 [16, 17].

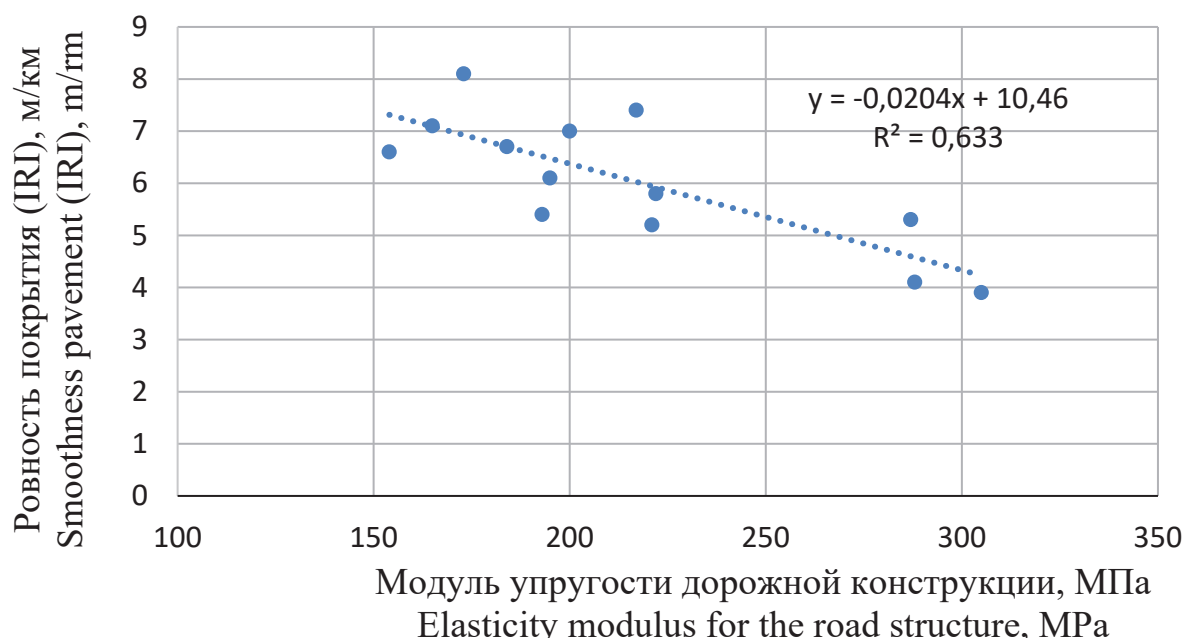


Рисунок 5 – Корреляционная зависимость ровности и модуля упругости дорожной конструкции на опытных участках
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Correlation dependence of the smoothness and elasticity modulus for the road structure in the experimental areas
Source: compiled by the authors.

Для опровержения нулевой гипотезы $H_0: r = 0$, для проверки значимости коэффициента корреляции проверяется условие (14) [18, с. 86]:

$$r > r_{\alpha, n-2}, \quad (15)$$

где r – коэффициент корреляции, полученный по результатам построения модели методом наименьших квадратов;

$r_{\alpha, n-2}$ – табличное значение коэффициента корреляции по таблице Фишера - Иейтса при уровне значимости α и количестве измерений n .

Расчет коэффициента корреляции: $r = \sqrt{R^2} = \sqrt{0,633} = 0,795$. Для уровня значимости $\alpha=0,01$ и количестве измерений 13 значение коэффициента корреляции по таблице Фишера-Иейтса составляет 0,684. Нулевая гипотеза не подтверждается и коэффициент корреляции значим.

Оценка статистической значимости линейной регрессии выполняется при опровержении нулевой гипотезы $H_0: \beta_0=0$, фиксирующей значение наклона линии регрессии с использованием F-критерия Фишера. Линейная связь между ровностью (IRI) и коэффициентом прочности K подтверждается при выполнении неравенства (15) ⁶:

$$F > F_{\alpha, n-2}, \quad (16)$$

где F – фактическое значение F-критерия по (16);

$F_{\alpha, n-2}$ – табличное значение статистики Фишера при уровне значимости α ;

$$F = \frac{r^2 \cdot (n - m - 1)}{(1 - r^2) \cdot m}, \quad (17)$$

где r – коэффициент корреляции;
 n – количество измерений;

⁶ Ивченко Г. И. Введение в математическую статистику: учебник / Г. И. Ивченко, Ю. И. Медведев. М.: Издательство ЛКИ, 2010. 600 с.

m – число степеней свободы, для линейной модели ($m = 1$).

Фактическое значение F-критерия по расчету:

$$F = \frac{0,795^2(13-1-1)}{(1-0,795^2) \times 1} = 18,89$$

Табличное значение статистики Фишера при уровне значимости $\alpha=0,01$ определяется равным 9,650. Условие (15) выполняется, линейная модель значима.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка модели обоснована необходимостью корректировки существующих методик расчетов конструкций дорожных одежд в связи с изменившимися условиями движения и составами транспортных потоков.

Математическая модель зависимости ровности покрытия от прочности дорожных одежд позволит скорректировать затраты для выполнения значительных объемов изысканий при оценке прочности в рамках диагностики. Измерение продольной ровности на дорогах широко выполняется дорожными службами с высокой производительностью применяемых средств измерения. Полученные результаты могут служить основой для оценки прочности дорожных конструкций особенно для дорог невысоких категорий. При выполнении измерений ровности приборами ТЭД-2М, ИПВ и другими, значения ровности допускается приводить к международному индексу ровности по широко рассматриваемым в научном сообществе и в нормативных документах математическим зависимостям. Преимущество представленной модели перед аналогичными заключается в минимизации включенных в модель переменных и получение информации непосредственно по результатам измерений. При применении в расчетах $\sqrt{R^2} = \sqrt{0,633} = 0,795$ начальной и предельно допустимой ровности по выбранному для пользователя интервале модель изменяется, и прогноз выполняется для конкретного участка дороги. Выполненные испытания на опытных участках эксплуатируемых дорог позволяют подтвердить зависимость ухудшения ровности при снижении прочности конструкции с высоким коэффициентом корреляции ($r = 0,795$). На основании полученных расчетов и критериев становится возможным оперативно определить несущую способность дорожной конструкции, обосновать проведение ремонтных мероприятий и сроков их выполнения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Soncim S. P., Oliveira I. C., Santos F. B. Development of probabilistic models for predicting roughness in asphalt pavement // *Road materials and pavement design*. 2017. 19 (6). pp. 1-10.
2. Múčka P. International roughness index specifications around the world / Peter Múčka // *Road materials and pavement design*. 2016. 18(4). pp. 929-965.
3. Тиратурян А. Н. Оценка деградации прочности жестких дорожных конструкций на основе натурных измерений на участке автомобильной дороги М4 "Дон" п.Тарасовский / А. Н. Тиратурян, С. А. Ольховой // *Инженерный вестник Дона*. 2017. № 2. Режим доступа: URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/4160. Дата доступа: 28.05.22.
4. Балабанов В. Б. Определение модуля упругости дорожной одежды по динамическим методам испытаний / В. Б. Балабанов, Фам Ши Куан // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2019. № 1. Т. 9. С. 60-69.
5. Mario De Luca Evaluation of runway bearing capacity using international roughness index // *Transportation Research Procedia*. 2020. № 45. P. 119-126.
6. Буртыль Ю. В. Критерии эксплуатационной надежности автомобильных дорог с жесткими дорожными одеждами / Ю. В. Буртыль // *Автомобильные дороги и мосты*. 2012. № 2. С. 21-31.
7. Степанова Л. В. Параметр поврежденности Ю. Н. Работнова и описание длительного разрушения: результаты, современное состояние, приложение к механике трещин и перспективы / Л. В. Степанова, С. А. Игонин // *Прикладная механика и техническая физика*. 2015. Т.56. № 2. С. 133-145.
8. Стрижиус В. Е. Механизмы накопления усталостного повреждения при сложном программном нагружении слоистых композитов: существующие гипотезы / В. Е. Стрижиус // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2019. № 4. Т. 25. С. 71-82.
9. Углова Е. В. Анализ критериев расчета жестких дорожных одежд в условиях воздействия интенсивного транспортного потока / Е. В. Углова, О. А. Шило // *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»* 2018. № 3. Режим доступа: URL: <https://t-s.today/PDF/14SATS318.pdf>. Дата доступа: 28.05.22.
10. Буртыль Ю. В. Прогнозирование ровности дорожных покрытий / Ю. В. Буртыль, М. Г. Солодкая, Я. Н. Ковалев // *Наука и техника*. 2021. № 3. С. 216-223.
11. Смирнов А. В. Расчет дорожных конструкций автомагистралей на прочность и выносливость: монография / А. В. Смирнов: СибАДИ. Омск: СибАДИ, 2012. 116 с.
12. Герцог В. Н. Расчет дорожных одежд по критериям ровности. Часть 1. Обоснование норм ровности дорожных покрытий / В. Н. Герцог, Г. В. Долгих, Н. В. Кузин // *Инженерно-строительный журнал*. 2015. № 5. С. 45-57.

13. Красиков О. А. Новые математические модели прогнозирования ровности дорожных покрытий / О. А. Красиков // Дороги и мосты. 2016. № 1 (35). С. 12-17.

14. Красиков О. А. Использование показателей дефлектометра для оценки прочности нежестких дорожных одежд / О. А. Красиков, И. Н. Косенко // Дороги и мосты. 2020. № 1 (43). С. 51-64.

15. Ferris J. B. Establishing chassis reliability testing targets based on road roughness / John B. Ferris, Jerry L. Larsen // International Journal of Materials and Product Technology. 2002. Vol. 17. Nos 5/6. pp. 453-461.

16. Рассел, Джесси Обобщенный метод наименьших квадратов / Джесси Рассел. М.: VSD, 2013. 971 с.

17. Корочкин А. В. Прогнозирование требуемой прочности дорожной одежды автомобильных магистралей / А. В. Корочкин // Вестник МАДИ. 2020. № 1 (60). С. 66-71.

18. Теория вероятностей и математическая статистика / Мхитарян В.С. [и др.]; под общ. ред. В.С. Мхитаряна. М.: Московский междун. ин-т эконометрики, информатики, финансов и права. 2003. 130 с.

REFERENCES

1. Soncim S. P., Oliveira I. C., Santos F. B. Development of probabilistic models for predicting roughness in asphalt pavement. *Road materials and pavement design*. 2017; 19 (6): 1-10.

2. Múčka P. International roughness index specifications around the world. *Road materials and pavement design*. 2016; 18 (4): 929-965.

3. Tiraturyan A. N., Tiraturyan S. A. Olhovoi Ocenka degradacii prochnosti nejestkikh dorojnih konstrukcii na osnove naturnih izmerenii na uchastke avtomobilnoi dorogi M4 "Don" p. [Assessment of strength degradation of non-rigid road structures based on full-scale measurements on the road section of the Don M4, Tarasovsky settlement]. *Inženierii vestnik Dona*. 2017; 2. Available at: URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/4160. Accessed at: 28.05.22. (In Russ.)

4. Balabanov V. B., Fam Shi Kuan Opredelenie modulya uprugosti dorojnoi odejdi po dinamicheskim metodam ispitani [Determination of modulus of road pavement elasticity by dynamic test methods/V. B. Balabanov, Pham Shi Quan]. *Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitelstvo. Nedvijimost*. 2019; 1. T. 9: 60-69. (In Russ.)

5. Mario De Luca Evaluation of runway bearing capacity using international roughness index. *Transportation Research Procedia*. 2020; 45: 119-126.

6. Burtul Yu. V. Kriterii ekspluatacionnoi nadezhnosti avtomobilnih dorog s nejestkimi dorojnimi odejdami [Criteria for operational reliability of motor roads with non-rigid road garments]. *Avtomobilnie dorogi i mosti*. 2012; 2: 21-31. (In Russ.)

7. Stepanova L. V., Igonin S. A. Parametr povrejdennosti Yu. N. Rabotnova i opisanie dlitel'nogo razrusheniya_rezultati_sovremennoe sostoyanie_priloge-

nie k mehanike treschin i perspektivi [Y. N. Rabotnov damage parameter and description of long-term failure: results, current state, application to fracture mechanics and perspectives]. *Prikladnaya mehanika i tekhnicheskaya fizika*. 2015; T.56. no 2: 133-145. (In Russ.)

8. Strijus V. E. Mehanizmi nakopleniya ustalostnogo povrejdeniya pri slojnom programmnom nagrujenii sloistih kompozitov: suschestvuyuschie gipotezi [Mechanisms of fatigue damage accumulation under complex program loading of layered composites: existing hypotheses]. *Nauchno_tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennie i inzhenerne nauki*. 2019; 4. T. 25: 71-82. (In Russ.)

9. Uglova E. V., Shilo O. A. Analiz kriteriev rascheta nejestkikh dorojnih odejd v usloviyah vozdeistviya intensivnogo transportnogo potoka [Analysis of criteria for calculation of non-rigid road pavements under conditions of intensive traffic flow]. *Internet-jurnal «Transportnie sooruzheniya»*. 2018; 3. Available at: URL: https://t_s.today/PDF/14SATS318.pdf. 28.05.22. (In Russ.)

10. Burtul Yu. V., Solodkaya M. G., Kovalev Ya. N. Prognozirovaniye rovnosti dorojnih pokritii [Forecasting the evenness of road surfaces]. *Nauka i tekhnika*. 2021; 3: 216-223. (In Russ.)

11. Smirnov A. V. Raschet dorojnih konstrukcii avtomagistralei na prochnost i vinoslivost: monografiya [Calculation of road structures of motorways for strength and endurance: monograph]. SibADI. Omsk: SibADI, 2012. 116 p. (In Russ.)

12. Gercog V. N., Dolgih G. V., Kuzin N. V. Raschet dorojnih odejd po kriteriyam rovnosti. Chast 1. Obosnovanie norm rovnosti dorojnih pokritii [Calculation of road pavements by flatness criteria. Part 1. Justification of Levelness Standards for Road Surfaces]. *Inzhenerno-stroitel'nyy jurnal*. 2015; 5: 45-57. (In Russ.)

13. Krasikov O. A. Novie matematicheskie modeli prognozirovaniya rovnosti dorojnih pokritii [New mathematical models for predicting the evenness of road surfaces]. *Dorogi i mosti*. 2016; 1 (35): 12-17. (In Russ.)

14. Krasikov O. A., Kosenko I. N. Ispolzovanie pokazatelei deflektometra dlya ocenki prochnosti nejestkikh dorojnih odejd [Use of deflector indicators to assess the strength of non-rigid road pavements]. *Dorogi i mosti*. 2020; 1 (43): 51-64. (In Russ.)

15. Ferris J. B., Larsen Jerry L. Establishing chassis reliability testing targets based on road roughness. *International Journal of Materials and Product Technology*. 2002; Vol. 17. Nos 5/6: 453-461. (In Russ.)

16. Рассел, Дзхесси Обобщенный метод наименьших квадратов [Generalized least squares method]. Moscow, VSD, 2013. 971 p.

17. Korochkin A. V. Prognozirovaniye trebuemoi prochnosti dorojnoi odejdi avtomobilnih magistralei [Prediction of the required road pavement strength of highways]. *Vestnik MADI*. 2020; 1 (60): 66-71. (In Russ.)

18. Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika [Probability Theory and Mathematical Statistics]. pod obsch. red. V. S. Mhitaryana. Moscow: Moskovskii mejdun. in-t ekonometriki, informatiki, finansov i prava. 2003: 130. (In Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Буртыль Ю. В. Разработана математическая модель, проведен эксперимент, получены закономерности и обоснованы выводы,

Капский Д. В. Описаны существующие модели, обозначены направления дальнейшего развития, корректировалось заключение

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Yury V. Burtyl. A mathematical model has been developed, an experiment has been carried out, regularities have been obtained and conclusions have been substantiated.

Denis V. Kapski. Current models are described, directions for further development are indicated, the conclusion was corrected.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Буртыль Юрий Валерьевич – старший преподаватель.

Капский Денис Васильевич – д-р техн. наук, проф., декан автотракторного факультета.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yury V. Burtyl – Senior Lecturer.

Denis V. Kapski – Dr. of Sci., Professor, Dean of the Automotive and Tractor Faculty.

УДК 691.545
 DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-584-596>
 EDN: GSLTQR
 Научная статья



ВЯЖУЩИЕ КОМПОЗИЦИИ ИЗ ЦЕМЕНТА И КЕРАМЗИТОВОЙ ПЫЛИ

Д. С. Махортов, Л. Х. Загороднюк, Н. А. Шаповалов, Д. А. Сумской
 Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
 г. Белгород, Россия
denis-mahortov1995@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4850-1173>
LHZ47@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8441-6999>
<https://orcid.org/0000-0003-0484-2574>
pr9nik2011@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0001-6139>

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье приведены результаты получения вяжущих композиций оптимального состава на основе портландцемента и отходов керамзитового производства – керамзитовой пыли. Проведены исследования гранулометрического состава, представлены результаты испытаний вяжущих композиций различных составов: цемент – керамзитовая пыль, прошедших совместную механоактивацию в вибрационной мельнице. Разработаны и установлены составы вяжущих композиций с широким спектром применения.

Используя метод электронной микроскопии, были сделаны микрофотографии сколов цементных камней, полученных на основе портландцемента и различного содержания отходов керамзитового производства – керамзитовой пыли, прошедших совместную механоактивацию в вибрационной мельнице. Отмечается активное зарастание открытых пор цементных камней, полученных вяжущих композиций новообразованиями различных размеров.

После использования керамзитовой пыли в качестве сырьевой смеси наблюдается уплотнение структуры композита.

Материалы и методы. В исследованиях применяли портландцемент ЦЕМО 52,5Н (ГОСТ 31108–2020) ЗАО «Белгородский цемент» и керамзитовую пыль – отходы производства керамзита. Механоактивацию выполняли путем помола в вибрационной мельнице. Нормальная густота определялась при помощи прибора Вика согласно ГОСТу. Гранулометрический состав исследовали с помощью прибора AnalyssetteNanoTescplus. Микроструктуру изучали с использованием сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU. С целью построения дифрактограмм был использован прибор ARL X'TRA ThermoFisher Scientific.

Результаты. Вяжущая композиция с оптимальной дозировкой керамзитовой пыли демонстрирует увеличение прочностных характеристик по сравнению с рядовым портландцементом, при этом наблюдается уплотнение структуры цементного камня, о чем свидетельствуют показатели плотности и микрофотографии образцов.

Обсуждение и заключение. Применение отходов производства керамзита – керамзитовой пыли в качестве минерального наполнителя вяжущей композиции позволяет экономить дорогостоящий портландцемент, при этом увеличивая прочностные характеристики вяжущей композиции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вяжущая композиция, отходы производства керамзита – керамзитовая пыль, портландцемент, минеральный наполнитель

БЛАГОДАРНОСТИ. Исследование выполнено при финансовом обеспечении гранта РНФ № 22-19-20115.

Статья поступила в редакцию 26.05.2022; одобрена после рецензирования 27.06.2022; принята к публикации 27.07.2022.

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: Махортов Д. С., Загороднюк Л. Х., Шаповалов Н. А., Сумской Д. А. Вяжущие композиции из цемента и керамзитовой пыли // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 4 (86). С. 584-596. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-584-596>

© Махортов Д. С., Загороднюк Л. Х., Шаповалов Н. А., Сумской Д. А., 2022



Контент доступен под лицензией
 Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-584-596>

EDN: GSLTQR

Original article

CEMENT AND CLAYDITE DUST BINDING COMPOSITIONS

Denis S. Makhortov*, Liliya Kh. Zagorodnyuk, Nikolay A. Shapovalov, Dmitry A. Sumskoy

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,

Belgorod, Russia

denis-mahortov1995@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4850-1173>

LHZ47@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8441-6999>

<https://orcid.org/0000-0003-0484-2574>

pr9nik2011@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0001-6139>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The article presents the production results for binder compositions of the optimal proportion based on Portland cement and claydite waste - claydite dust. The granulometric composition studies have been conducted, test results for binder compositions of different proportions are presented: cement - claydite dust, jointly mechanically activated in a vibrating mill. The binder compositions with a wide range of use have been developed and determined. Using the electron microscopy method, microphotographs of cement stones chips made from Portland cement and different contents of claydite dust, which have been mechanically activated in a vibrating mill, were taken. There is active overgrowth of open pores in cement stones obtained from binder compositions by neoplasms of various sizes.

After the use of claydite dust as a raw mix, the structure of the composite is compacted.

Materials and methods. ЦЕМО 52.5N Portland cement (GOST 31108-2020) produced by ZAO Belgorodskii Cement and claydite dust, the waste of claydite dust production, were used in the work. The mechanical activation was performed by grinding in a vibrating mill. The normal density was determined using the Vic's device according to GOST. The granulometric composition was studied using the AnalyssetteNanoTecplus device. The microstructure was studied using a high-resolution scanning electronic TESCAN MIRA 3 LMU microscope. In order to construct diffractograms, the ARL X'TRA Thermo Fisher Scientific device was used.

Results. The binding composition of the optimal proportion of claydite dust demonstrates an increase in strength characteristics, there is a compaction of the cement stone structure compared to ordinary Portland cement.

Discussion and conclusions. The use of waste from the production of claydite – claydite dust as a mineral filler of the binder composition makes it possible to save expensive Portland cement, while increasing the strength characteristics of the binder composition.

KEYWORDS: binding composition, claydite production waste – claydite dust, Portland cement, mineral filler.

ACKNOWLEDGEMENTS: The study was carried out with the financial support of the RSF grant No. 22-19-20115.

The article was submitted 26.05.2022; approved after reviewing 27.06.2022; accepted for publication 27.07.2022.

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: Makhortov D. S., Zagorodnyuk L.H., Shapovalov N.A., Sumskoy D.A. Cement and claydite binding compositions // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (4): 584-596. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-584-596>

© Makhortov D. S., Zagorodnyuk L. Kh., Shapovalov N. A., Sumskoy D. A., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время происходит постоянная эволюция строительных технологий. Перед учеными стоит задача в разработке новейших строительных материалов, для этого необходимо находить пути использования сырья, которое до этого было признано непригодным в строительстве. Особенно это очень актуально для регионов, где нет местного природного сырья, но есть возможность использовать отходы техногенного происхождения производимых различными предприятиями [1, 2]. В настоящее время успешно осуществляются научно-исследовательские работы по получению целевых композиционных вяжущих с требуемыми физико-механическими, технологическими и эксплуатационными свойствами [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Вяжущие композиции – это совокупность продуктов вяжущего (например, портландцемента) после механохимической активации, с минеральными добавками специального назначения (модификаторами).

Химические добавки, а также активные компоненты, применяются исходя из требуемых показателей конечной продукции. К примеру, добавки-модификаторы, которые влияют на физико-механические, технические, а также реологические свойства вяжущего, подвижность теста и сроки схватывания.

Химические добавки дают возможность наделить необходимыми свойствами композиционные вяжущие. Важную роль играет правильный подбор химических добавок для композиционных вяжущих, используемых в создании наливных полов. Ведь получение высокой подвижности смеси требует использования данного вида модификаторов.

Минеральные наполнители отличаются от химических модификаторов тем, что хуже растворяются в воде, так как они являются порошками и получаются из техногенного и природного сырья. Таким образом, с их помощью образуется тонкодисперсная часть твердой фазы строительных бетонов и растворов.

Минеральные добавки имеют определенную классификацию: неактивные – выполняют роль микронаполнителя и активные, которые характеризуются высокой гидравлической активностью или пуццоланическими свойствами.

Использование наполнителей минерального происхождения [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22], обладающих высокой дисперсностью, дает возможность раскрыть потенциал вяжущих веществ, что позволит увеличить их эксплуатационные и физико-механические характеристики.

Получение такого рода вяжущих композиций подразумевает принцип управления

технологией на всех этапах производства, начиная от подбора сырьевых компонентов до готового продукта.

Подбор исходных материалов, их пропорции, активность и дисперсность определяют свойства вяжущих. Увеличение дисперсности частиц иногда может оказывать негативные последствия, поэтому важно контролировать тонину помола вяжущего. При подборе концентрации минеральных наполнителей важно следить, чтобы их частицы со всех сторон были окружены связующим.

Ряд ученых [23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30] провели обширные исследования по оптимизации составов композиционных вяжущих, используя минеральные наполнители различного происхождения, а также соответствующие добавки.

Резюмируя выше изложенное, необходимо отметить, что механоактивация имеет огромное значение при изготовлении композиционных вяжущих. Ведь получение оптимальной дисперсности за счет механического измельчения будет способствовать получению вяжущих композиций с высокими техническими и физико-механическими характеристиками. При этом не остается сомнений в том, что в перспективе в строительстве лидирующее место будут занимать модифицированные и композиционные вяжущие.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При проведении экспериментальной части работы применяли портландцемент ЦЕМ0 52,5Н (ГОСТ 31108–2020) ЗАО «Белгородский цемент» и керамзитовую пыль – отходы производства керамзита.

Составы № 2 – № 4 и № 6 – № 8 готовили помолом в вибрационной мельнице в течение 10 и 20 мин с различной дозировкой керамзитовой пыли: 10; 20; 30%. Для сравнения был исследован товарный цемент при соответствующей механоактивации № 1 и № 5 (таблица).

На основании ГОСТ 310.3–76 использовался прибор Вика и были определены показатели нормальной густоты и сроков схватывания цементного теста.

С целью определения физико-механических характеристик полученных модифицированных вяжущих были заформованы кубы размером 30×30×30 мм в количестве 4–6 шт. для каждого состава. Испытания на прочность проводились в возрасте 2 и 28 сут.

Определение гранулометрического состава проводилось на приборе Analysette 22 NanoTecplus, который имеет полный диапазон измерений 0,01–2000 мкм и представляет собой универсальный лазерный прибор для надежного и эффективного определения распределения размеров частиц.

Микроскопические исследования были выполнены на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU.

Построение рентгенограмм было выполнено при использовании прибора ARL X'TRA ThermoFisher Scientific. Рентгенофазовый анализ (РФА) дает возможность определить составы изучаемых материалов и оценить качество цементов и клинкеров.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты испытаний вяжущих композиций отражены в таблице.

Гранулометрический состав полученных вяжущих композиций с наилучшими показателями прочности составов № 6 и № 7 (с содержанием керамзитовой пыли 10 и 20% при 20 мин помола) исследовали с помощью прибора AnalyssetteNanoTecplus (рисунок 1), удельная поверхность в среднем составляла 638 м²/кг.

Таблица

Показатели физико-механических исследований вяжущих композиций составов (цементо-керамзитовая пыль), приготовленных в вибрационной мельнице

Источник: составлено авторами.

Table

Indicators of physical mechanical tests of binding compositions contents: cement - claydite dust prepared in a vibrating mill

Source: compiled by the authors.

№ составов п/п	Составы	НГ, %	Сроки схватывания, мин		R _{сж} ¹ МПа		Плотность, кг/м³
			начало	конец	2 сут	28 сут	
Время механоактивации – 10 мин							
1	Ц=100%	28,75	130	170	22,45	59,07	2185
2	Ц/КП=90/10%	34,72	139	178	28,18	74,16	2287
3	Ц/КП=80/20%	35,93	149	187	26,33	69,28	2231
4	Ц/КП=70/30%	41,07	156	199	24,03	63,24	2216
Время механоактивации – 20 мин							
5	Ц=100%	31,66	165	203	28,42	66,90	2222
6	Ц/КП=90/10%	35,27	168	211	30,84	81,15	2314
7	Ц/КП=80/20%	36,88	177	219	29,74	78,28	2296
8	Ц/КП=70/30%	41,80	185	227	26,85	70,65	2277

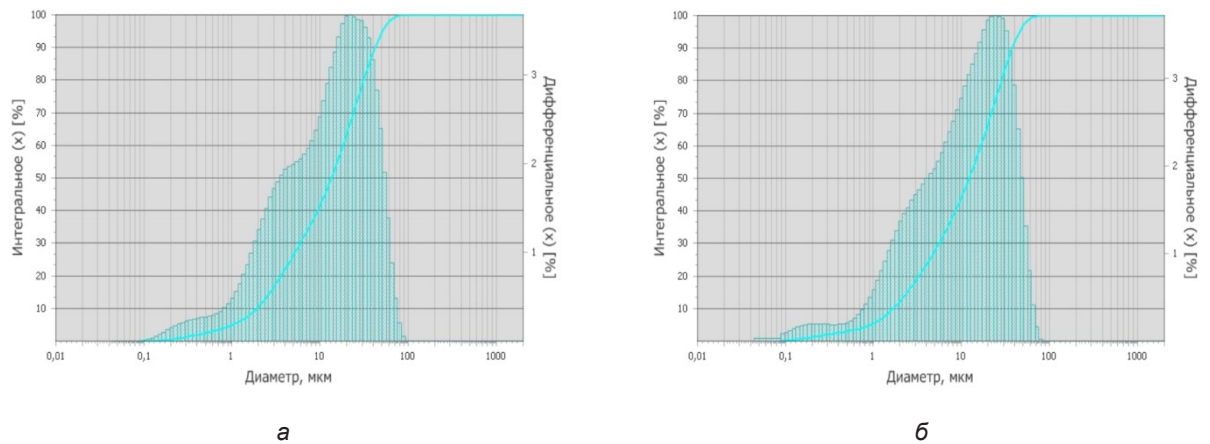


Рисунок 1 – Гранулометрическое распределение частиц вяжущих композиций (цемент/керамзитовая пыль): а – 90/10%; б – 80/20%, активированных в вибрационной мельнице в течение 20 мин

Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Granulometric particle distribution of binding compositions: cement/ claydite dust=a) 90/10%; b)80/20%, activated in a vibrating mill for 20 minutes

Source: compiled by the authors.

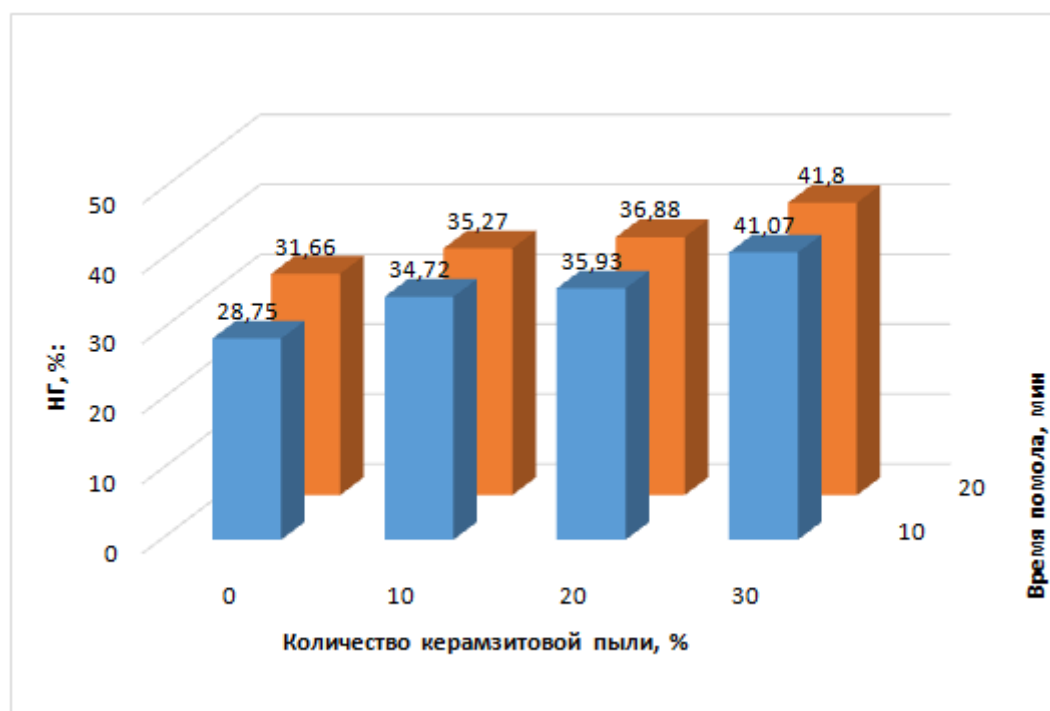


Рисунок 2 – НГ вяжущих композиций (составов № 1 – № 8) с разным количеством керамзитовой пыли, активированных в течение 10 и 20 мин в вибрационной мельнице
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Standard consistency of binding compositions (compositions No. 1 - No. 8) with different amounts of clayite dust activated for 10 and 20 min in a vibrating mill
Source: compiled by the authors.

Показатели нормальной густоты полученных вяжущих композиций возросли после добавления 30% керамзитовой пыли на 42,85% после помола в течение 10 мин и на 32,03% при механоактивации в течение 20 мин соответственно. Такой прирост является следствием высокой дисперсности минерального наполнителя (рисунок 2).

Изучая сроки схватывания вяжущих композиций в сравнении с портландцементом, активированным в течение 10 мин, отмечается, что начало срока схватывания вяжущих композиций в зависимости от содержания керамзитовой пыли увеличивается от 6,92 до 20,00%, а начало схватывания композиций с керамзитовой пылью от 10 до 30% увеличилось в сравнении с активированным цементом в течение 20 мин от 1,82 до 12,12%, а конец схватывания от 3 до 11,82%. Это объясняется значительным количеством минерального наполнителя, который толстым слоем покрывает зерна цемента, тем самым препятствуя проникновению воды для осуществления их гидратации.

Изучая прочностные характеристики, нужно отметить вяжущую композицию (при помоле в 20 мин) с показателем прочности 81,15 МПа, которая имеет в своем составе 10% керамзитовой пыли. Данный показатель выше результатов бездобавочных цементов на 21,30%. Содержание 20% керамзитовой пыли и такое же время механоактивации демонстрирует прочность в 78,28 МПа, что превышает прочность исходного цемента на 17,01%. Аналогичные дозировки, но при 10 мин механоактивации, также показали высокие результаты прочности – 74,16 и 69,28 МПа, это выше результатов портландцемента на 25,55 и 16,87%. Незначительное увеличение прочностных показателей на 7,06 и 5,61% дает дозировка в 30% при 10 и 20 мин помола (рисунок 3).

Анализируя выше изложенные данные, можно рекомендовать применять керамзитовую пыль с ее механоактивацией в количестве до 30% в цементные композиции, что обеспечит повышение прочности до 20% при экономии дорогостоящего энергоемкого портландцемента.

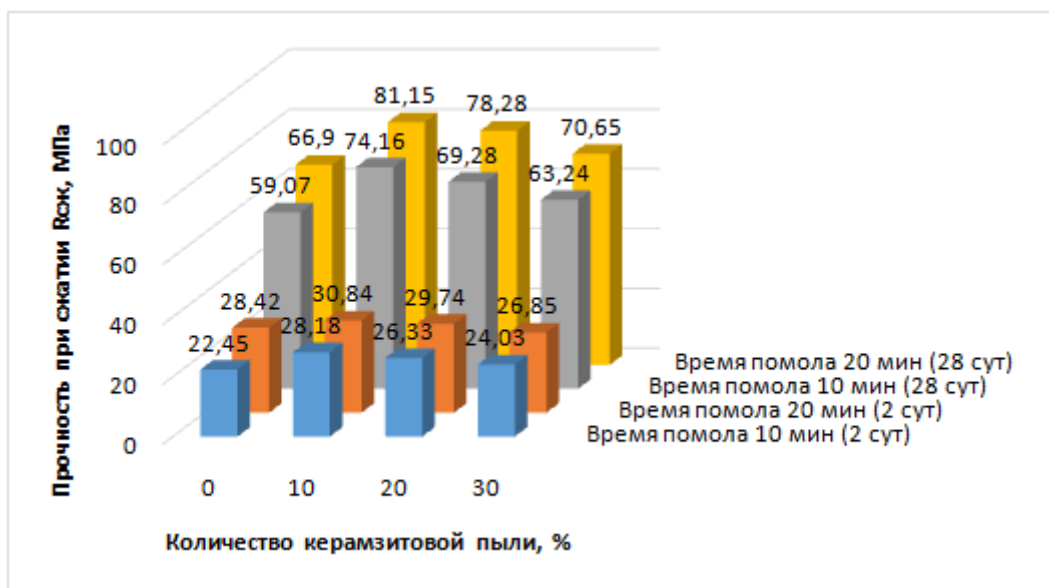


Рисунок 3 – Прочностные характеристики вяжущих композиций с разным количеством керамзитовой пыли, активированных в течение 10 и 20 мин в вибрационной мельнице
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Strength characteristics of binding compositions with different amounts of clayite dust activated for 10 and 20 minutes in a vibrating mill
Source: compiled by the authors.

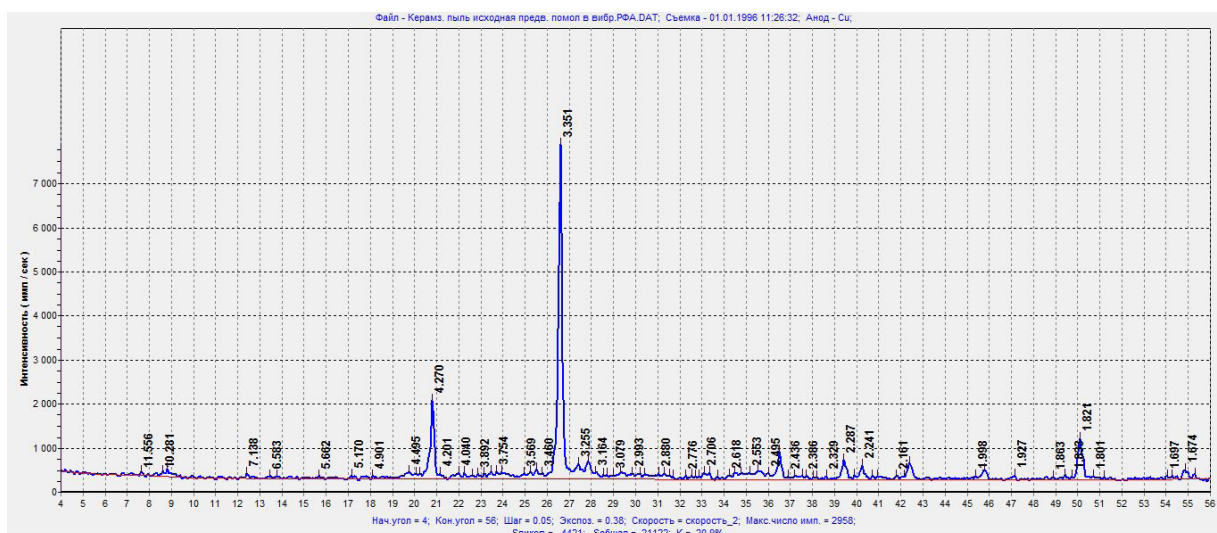


Рисунок 4 – Диффрактограмма исследуемой керамзитовой пыли
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Diffractogram of the clayite dust under the study
Source: compiled by the authors.

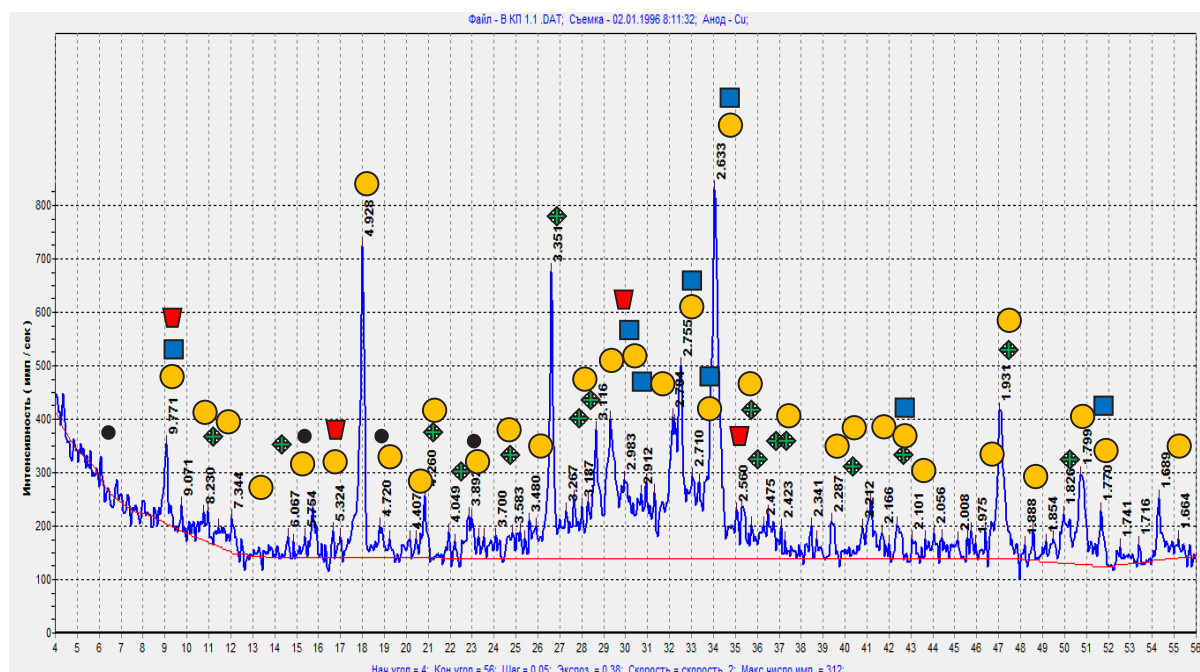


Рисунок 5 – Дифрактограмма гидратированного портландцемента с содержанием 10% керамзитовой пыли, 20 мин помола в вибрационной мельнице

◆ – SiO_2 ; ● – Ca(OH)_2 ; ■ – CSH(II) ▼ – C_2AH_8 ● – этtringит

Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Diffractogram of hydrated Portland cement containing 10% claydite dust, 20 min grinding in a vibrating mill
Source: compiled by the authors.

Рентгенофазовый анализ пробы исследуемой керамзитовой пыли представлен на рисунке 4, данные РФА показали, что проба представлена: кварцем ($d = 4,24; 3,35; 2,45; 2,28; 2,23; 1,81 \text{ \AA}$); гидрослюдами ($d = 10,01; 4,56; 3,34 \text{ \AA}$); полевыми шпатами ($d = 3,31; 3,22; 4,21 \text{ \AA}$); каолинитом ($d = 7,11; 4,44; 2,56 \text{ \AA}$); монтмориллонитом ($d = 14,3; 4,47; 3,06; 2,6 \text{ \AA}$).

Анализ дифрактограмм гидратированной вяжущей композиции с содержанием 10% керамзитовой пыли, активизированной в течение 20 мин в вибрационной мельнице (рисунок 5), показал, что продукты гидратации представлены гидросиликатами кальция CSH(II) ; гидроалюминатами кальция C_2AH_8 , Ca(OH)_2 , в незначительном количестве отмечаются сле-

ды этtringита, а также присутствует SiO_2 внесенной керамзитовой пыли.

Полученные результаты физико-механических испытаний наглядно подтвердили исследования микроструктуры сколов образцов прогидратированных в течение 28 сут. Для проведения сравнительного анализа полученных композитов на первом этапе изучали микроструктуру исходного минерального наполнителя (рисунок 6), отмечается, что минеральный наполнитель – керамзитовая пыль представлена зернами менее 1 мкм , а также встречаются зерна размером до 20 мкм , они имеют слоистое строение с высокой пористостью, при этом хаотически расположены в общем объеме.

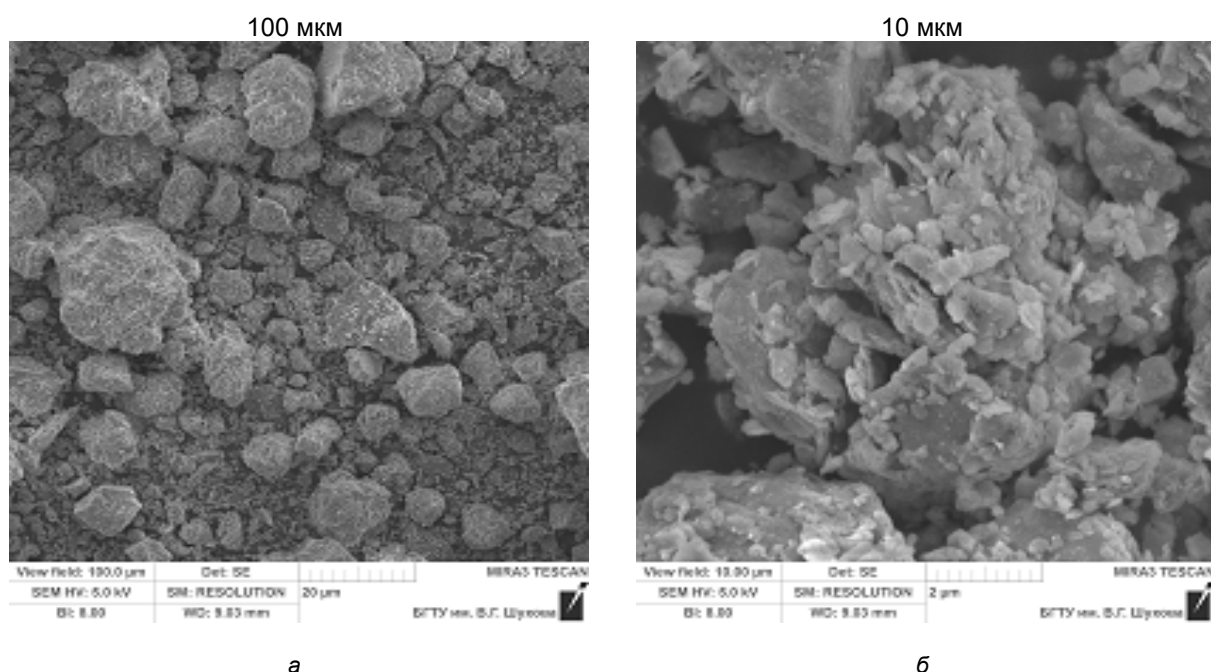


Рисунок 6 – Микроструктура керамзитовой пыли (измельченной в вибрационной мельнице):
а – увеличение 100 мкм; б – увеличение 10 мкм
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Microstructure of claydite dust (crushed in a vibrating mill):
a) increase of 100 microns; b) increase of 10 microns
Source: compiled by the authors.

Рассматривая микроструктуру вяжущей композиции с содержанием портландцемента и керамзитовой пыли в количестве 10%, прошедшей активацию в вибрационной мельнице, установлено формирование плотной сросшейся структуры композита (рисунок 7). На фото отчетливо видны частички керамзитовой пыли, обросшие гидросиликатами кальция и алюминия, кристаллические новообразования проникли в межслоевое пространство керамзитовой пыли и сформировали густую заросшую структуру. В сколах микрофотографии хорошо просматриваются зерна минерального наполнителя, плотно обросшие кристаллогидратами кальция и алюминия. Сформированная плотная микроструктура композита подтверждается результатами физико-меха-

нических испытаний, показывающая высокую прочность 81,15 МПа в возрасте 28 сут (см. таблицу и рисунок 3).

Высокие результаты по прочности 78,28 МПа показала вяжущая композиция состава портландцемента и 20% керамзитовой пыли, активированная в вибрационной мельнице, в связи с этим представляет интерес рассмотрение микроструктуры этой композиции (рисунок 8). Структура данного композита достаточно плотная, все зерна минерального наполнителя покрыты новообразованиями гидросиликатов кальция и алюминия. На фото отчетливо видно зарастание пор, что свидетельствует о дальнейшей гидратации и нарастании прочности композита.

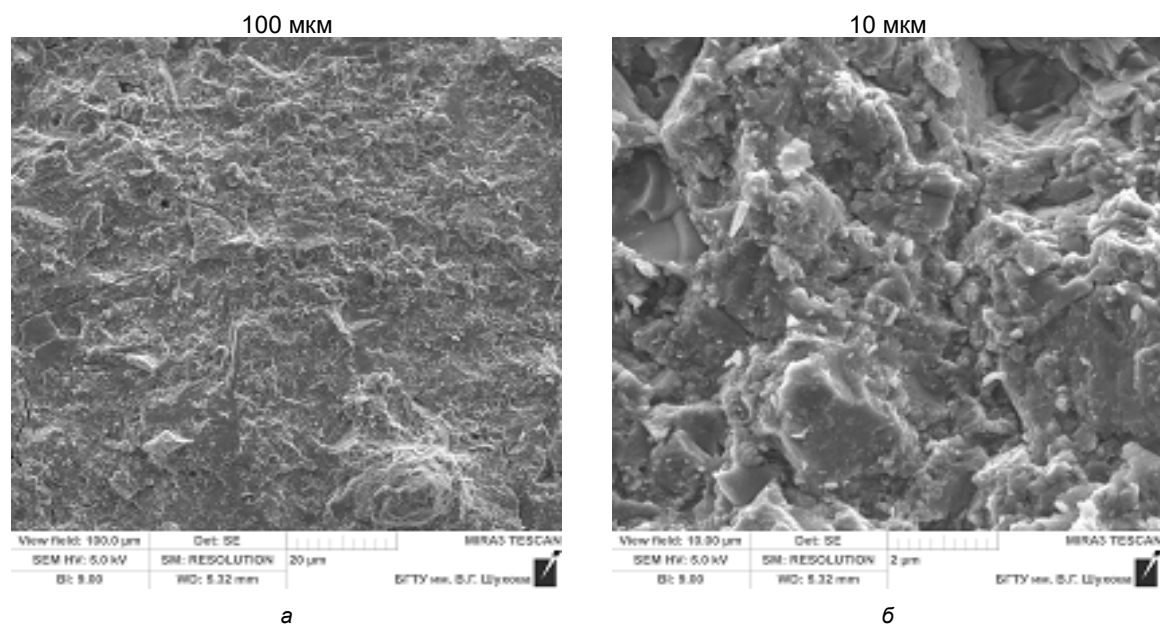


Рисунок 7 – Микроструктура образцов вяжущей композиции № 6 (цемент /керамзитовая пыль=90/10% при 20 мин активации в вибрационной мельнице): а – увеличение 100 мкм; б – увеличение 10 мкм
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Microstructure of samples for binding composition No. 6: cement /claydite dust = 90/10% at 20 minutes of activation in a vibrating mill: a) increase of 100 microns; b) increase of 10 microns
Source: compiled by the authors.

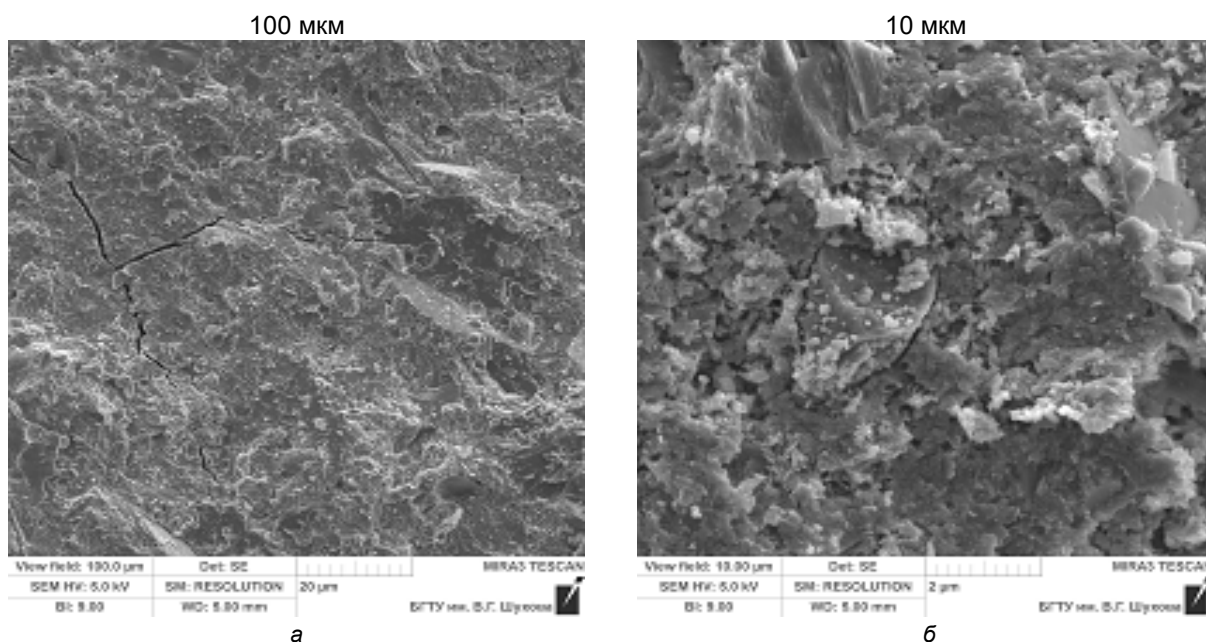


Рисунок 8 – Микроструктура образцов вяжущей композиции № 7 (цемент /керамзитовая пыль = 80/20% при 20 мин активации в вибрационной мельнице): а – увеличение 100 мкм; б – увеличение 10 мкм
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Microstructure of samples for binding composition No. 7: cement /claydite dust = 80/20% at 20 minutes of activation in a vibrating mill
Source: compiled by the authors.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя полученные технологические и физико-механические показатели вяжущих композиций, следует отметить, что при увеличении продолжительности механоактивации и содержании минерального наполнителя в составе вяжущей композиции показатели НГ и сроков схватывания возрастают, что объясняется увеличением удельной поверхности минерального наполнителя, который толстым слоем покрывает зерна цемента, тем самым препятствуя проникновению воды для осуществления их гидратации.

Анализ микрофотографий вяжущих композиций портландцемент и керамзитовая пыль показывает, что к возрасту 28 сут в создаваемых композитах формируется надежная плотная структура гидросиликатов и гидроалюминатов кальция, что подтверждается высокими физико-механическими показателями испытанных образцов. Образец с керамзитовой пылью в количестве 10% (за 20 мин помола) имеет прочность в 81,15 МПа, что лучше результата бездобавочных цементов на 21,30%. Это подтверждает целесообразность использования отходов производства керамзита – керамзитовой пыли – в качестве минерального наполнителя и экономить дорогостоящий портландцемент, при этом увеличивая прочностные характеристики вяжущей композиции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рахимов Р. З., Магдеев Р. З., Ярмаковский В. Н. Экология, научные достижения и инновации в производстве строительных материалов на основе и с применением техногенного сырья // Строительные материалы. 2009. № 12. С. 8–11.
2. Османов Н. Н. Смешанные вяжущие на основе дисперсных минеральных добавок // Цемент и его применение. 2005. С. 56–57.
3. Загороднюк Л. Х. Композиционные вяжущие на основе органо-минерального модификатора для сухих ремонтных смесей / Л. Х. Загороднюк, В. С. Лесовик, А. В. Шамшуров, Д. А. Беликов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 5. С. 25–31.
4. Лесовик В. С. К проблеме повышения эффективности композиционных вяжущих / В. С. Лесовик, Н. И. Алфимова, Е. А. Яковлев, М. С. Шейченко // Вестник БГТУ им. Шухова. 2009. № 1. С. 30–33.
5. Рахимов Р. З., Рахимова Н. Р. Научные, экспериментальные, технико-экономические предпосылки управления структурой и свойствами наполненных искусственных строительных композиционных материалов // Градостроительство. 2011. № 3. С. 73–79.
6. Лесовик В. С., Алфимова Н. И., Вишневская Я. Ю. Высокоэффективные композиционные

вяжущие с использованием наномодификатора // Вестник центрального регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2010. 90 с.

7. Гридчин А. М., Лесовик Р. В. Особенности производства ВНВ и бетона на его основе с использованием техногенного полиминерального песка // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2002. № 1. С. 36–37.

8. Zagorodnuk L. H., Lesovik V. S., Shkarin A. V., Belikov D. A., Kuprina A. A. Creating Effective Insulation Solutions, Taking into Account the Law of Affinity Structures in Construction Materials // World Applied Sciences Journal. 2013. T. 24. No. 11. pp. 1496–1502.

9. Загороднюк Л. Х., Лесовик В. С., Беликов Д. А. К проблеме проектирования сухих ремонтных смесей с учетом сродства структур // Вестник Центрального регионального отделения РААСН. Москва. 2014. № 18. С. 112–119.

10. Загороднюк Л. Х., Лесовик В. С., Гайнутдинов Р. Специфика твердения строительных растворов на основе сухих смесей // Вестник Центрального регионального отделения РААСН. Москва. 2014. № 17. С. 93–98.

11. Lesovik V. S., Zagorodnuk L. H., Tolmacheva M. M., Smolikov A. A., Shekina A. Y., Shakarna M. H. I. Structure-formation of contact layers of composite materials // Life Science Journal. 2014. T. 11. No. 12. pp. 948–953.

12. Kuprina A. A., Lesovik V. S., Zagorodnyk L. H., Elistratkin M. Y. Anisotropy of Materials Properties of Natural and Man-Triggered Origin // Research Journal of Applied Sciences. 2014. No. 9. pp. 816 – 819.

13. Рахимов Р. З. Керамзитовая пыль как активная добавка в минеральные вяжущие – состав и пуццолановые свойства / Р. З. Рахимов, М. И. Халиуллин, А. Р. Гайфуллин, О. В. Стоянов // Вестник Казанского технологического университета. 2013. № 19. С. 57–61.

14. Рахимова Н. Р. Влияние добавок молотого боя керамического кирпича на состав и микроструктуру камня композиционного шлакощелочного вяжущего // Башкирский химический журнал. 2007. № 14. С. 83–86.

15. Locher F.W., Richartz W., Sprung S. Erstarren von Zement. Teil 1: Reaktion und Gefügeentwicklung // ZKG. 1976. No. 10. pp. 435–442.

16. Лесовик В. С., Загороднюк Л. Х., Шахова Л. Д. Техногенные продукты в производстве сухих строительных смесей: монография. Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2010. 169 с.

17. Котенко Е. А., Морозов В. Н., Анисимов В. Н. Освоение недр и экологические проблемы – взгляд в XXI век // Геоэкологические проблемы безопасной эксплуатации горно-металлургического комплекса КМА. 2000. № 2. С. 22–24.

18. Лесовик В. С. Использование промышленных отходов КМА в производстве строительных материалов // Использование отходов, попутных продуктов в производстве строительных материалов и изделий. 1987. № 3. С. 57–58.

19. Козубская Т. Г. Использование техногенных отходов в производстве строительных материалов // Строительные материалы. 2002. № 2. С. 10–12.

20. Строкова В. В. Новые технологии производства строительных материалов на основе нетрадиционного сырья КМА // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. 2004. № 5. С. 60–61.

21. Kouji O., A. Thomas, Bier Cement and Concrete Research. [Электронный ресурс]. 2010. No. 40. P. 1034 – 1040. Available at: <https://www.journals.elsevier.com/cement-and-concrete-research>

22. Глуховский В. Д. Шлакощелочные цементы // Цемент. 1985. № 3. С. 11–12.

23. Рахимов Р. З., Гайфуллин А. Р., Халиуллин Р. З. Плотность упаковки зерен композиционного гипсового вяжущего в зависимости от дисперсности и гранулометрического состава // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, № 7. С. 129–131.

24. Бердов Г. И. Повышение свойств композиционных строительных материалов введением минеральных добавок / Г. И. Бердов, Л. В. Ильина, В. Н. Зырянова, Н. И. Никоненко, А. В. Мельников // Стройпрофи [Электронный ресурс]. 2012. № 2. С. 26 – 29. Режим доступа: <http://stroy-profi.info/archive/10994>.

25. Баженов Ю. М., Алимов Л. А., Воронин В. В. Развитие теории формирования структуры и свойств бетонов с техногенными отходами // Известия вузов. Строительство. 1996. № 7. С. 55–58.

26. Скобло Л. И. Использование промышленных отходов в цементной промышленности США // Цемент и его применение. 2005. № 4. С. 75–77.

27. Рахимова Н. Р., Рахимов Р. З., Хамитова Р. Ф. Композиционные шлакощелочные вяжущие с добавками молотого отсева дробления бетонного лома // Техника и технология силикатов. 2013. Т. 20. № 3. С. 9–15.

28. Рахимбаев Ш. М. К вопросу о фазовом составе и рациональном применении саморассыпающихся сталеплавильных шлаков / Ш. М. Рахимбаев, А. С. Погромский, Г. С. Духованый, Т. В. Анканова // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2008. № 1. С. 49–52.

29. Горин В. М. Расширение областей применения керамзитового гравия / Горин В. М., С. А. Токарева, В. Ю. Сухов, П. Ф. Нехаев, В. Д. Авакова, Н. М. Романов // Строительные материалы. 2003. № 11. С. 19–21.

30. Самченко С. В., Макаров Е. М. Модифицирование макро- и микроструктуры композиционных материалов гидросиликатами кальция // Техника и технология силикатов. 2013. Т. 20, № 4. С. 20–24.

REFERENCES

1. Rahimov R. Z., Magdeev R. Z., Jarmakovskij V. N. Jekologija, nauchnye dostizhenija i innovacii v proizvodstve stroitel'nyh materialov na osnove i s primeneniem tehnogennogo syr'ja [Ecology, scientific achievements and innovations in the production of building materials based on and using technogenic

raw materials]. *Stroitel'nye materialy*. 2009; 12: 8 – 11. (in Russ.)

2. Osmanov N. N. Smeshannye vjazhushhie na osnove dispersnyh mineral'nyh dobavok [Mixed binders based on dispersed mineral additives]. *Cement i ego primenenie*. 2005: 56 – 57. (in Russ.)

3. Zagorodnjuk L. H., Lesovik V. S., Shamshurov A. V., Belikov D. A. Kompozicionnye vjazhushhie na osnove organo-mineral'nogo modifikatora dlja suhih remontnyh smesej [Composite binders based on organo-mineral modifier for dry repair mixtures]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shuhova*. 2014; 5: 25-31. (in Russ.)

4. Lesovik V. S., Alfimova N. I., Jakovlev E. A., Shejchenko M. S. K problem povyshenij ajeffektivnosti kompozicionnyh vjazhushhih [On the problem of increasing the efficiency of composite binders]. *Vestnik BGTU im. Shuhova*. 2009; 1: 30 – 33. (in Russ.)

5. Rahimov R. Z., Rahimova N. R. Nauchnye, jeksperimental'nye, tehniko-jekonomicheskie predposylki upravlenija strukturoj i svojstvami napolnennyh iskusstvennyh stroitel'nyh kompozicionnyh materialov [Scientific, experimental, technical and economic prerequisites for managing the structure and properties of filled artificial building composite materials]. *Gradostroitel'stvo*. 2011; 3: 73-79. (in Russ.)

6. Lesovik V. S., Alfimova N. I., Vishnevskaja Ja. Ju. Vysokojeffektivnye kompozicionnye vjazhushhie s ispol'zovaniem nanomodifikatora [Highly effective composite binders using a nanomodifier]. *Vestnik central'nogo regional'nogo otdelenija Rossijskoj akademii arhitektury i stroitel'nyh nauk*. 2010: 90. (in Russ.)

7. Gridchin A. M., Lesovik R. V. Osobennosti proizvodstva VNV i betona na ego osnove s ispol'zovaniem tehnogennogo polimineral'nogo peska [Features of the production of VNV and concrete based on it using technogenic polymineral sand]. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tehnologii XXI veka*. 2002; 1: 36-37. (in Russ.)

8. Zagorodnjuk L. H., Lesovik V. S., Shkarin A. V., Belikov D. A., Kuprina A. A. Creating Effective Insulation Solutions, Taking into Account the Law of Affinity Structures in Construction Materials. *World Applied Sciences Journal*. 2013; 24. No. 11: 1496-1502.

9. Zagorodnjuk L. H., Lesovik V. S., Belikov D. A. K probleme proektirovanija suhih remontnyh smesej s uchetoj rodstva struktur [To the problem of designing dry repair mixtures taking into account the affinity of structures]. *Vestnik Central'nogo regional'nogo otdelenija RAASN*. Moscow. 2014; 18: 112-119. (in Russ.)

10. Zagorodnjuk L. H., Lesovik V. S., Gajnutdinov R. Specifika tverdenija stroitel'nyh rastvorov na osnove suhih smesej [Specifics of hardening of building mortars based on dry mixtures]. *Vestnik Central'nogo regional'nogo otdelenija RAASN*. Moscow. 2014; 17: 93-98. (in Russ.)

11. Lesovik V. S., Zagorodnjuk L. H., Tolmacheva M. M., Smolikov A. A., Shekina A. Y., Shakarna M. H. I. Structure-formation of contact layers of composite materials. *Life Science Journal*. 2014; 11. No. 12: 948-953.

12. Kuprina A. A., Lesovik V. S., Zagorodnyk L. H., Elistratkin M. Y. Anisotropy of Materials Properties of Natural and Man-Triggered Origin. *Research Journal of Applied Sciences*. 2014; 9: 816 - 819.

13. Rahimov R. Z., Haliullin M. I., Gajfullin A. R., Stojanov O. V. Keramzitovaya pyl' kak aktivnaya dobavka v mineral'nye vjazhushhie – sostav i puccolanovye svojstva [Expanded clay dust as an active additive in mineral binders – composition and pozzolan properties]. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*. 2013; 19: 57-61. (in Russ.)

14. Rahimova N. R. Vliyanie dobavok molotogo boja keramicheskogo kirpicha na sostav i mikrostrukturu kamnja kompozicionnogo shlakoshhelochnogo vjazhushhego [The effect of additives of ground ceramic brick on the composition and microstructure of a composite slag-alkaline binder stone]. *Bashkirskij himicheskij zhurnal*. 2007; 14: 83-86. (in Russ.)

15. Locher F. W., Richartz W., Sprung S. Erstarren von Zement. Teil 1: Reaktion und Gefügeentwicklung. *ZKG*. 1976; 10: 435-442.

16. Lesovik V. S., Zagorodnjuk L. H., Shahova L. D. *Ehnogennye produkty v proizvodstve suhih stroitel'nyh smesey: monografija*. [Technogenic products in the production of dry building mixes: monograph]. Belgorod: Izd-vo BGTU im. V. G. Shuhova, 2010. 169 p. (in Russ.)

17. Kotenko E. A., Morozov V. N., Anisimov V. N. Osvoenie nedr i jekologicheskie problemy – vzgljad v XXI vek [Subsoil development and environmental problems – a look into the XXI century]. *Geojekologicheskie problemy bezopasnoj jekspluatacii gorno-metallurgicheskogo kompleksa KMA*. 2000; 2: 22 – 24. (in Russ.)

18. Lesovik B. S. Ispol'zovanie promyshlennyh othodov KMA v proizvodstve stroitel'nyh materialov [The use of KMA industrial waste in the production of building materials]. *Ispol'zovanie othodov, poputnyh produktov v proizvodstve stroitel'nyh materialov i izdelij*. 1987; 3: 57 – 58. (in Russ.)

19. Kozubskaja T. G. Ispol'zovanie tehnogennyh othodov v proizvodstve stroitel'nyh materialov [The use of technogenic waste in the production of building materials]. *Stroitel'nye materialy*. 2002; 2: 10 – 12. (in Russ.)

20. Strokova V. V. Novye tehnologii proizvodstva stroitel'nyh materialov na osnove netradicionnogo syr'ja KMA [New technologies for the production of building materials based on non-traditional raw materials KMA]. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie i tehnologii XXI veka*. 2004; 5: 60 – 61. (in Russ.)

21. Kouji O., A. Thomas, *BierCement and Concrete Research*. 2010; 40: 1034 – 1040. Available at: <https://www.journals.elsevier.com/cement-and-concrete-research>

22. Gluhovskij V. D. Shlakoshhelochnye cementy [Slag-alkaline cements]. *Cement*. 1985; 3: 11 – 12. (in Russ.)

23. Rahimov R. Z., Gajfullin A. R., Haliullin R. Z. Plotnost' upakovki zeren kompozicionnogo gipsovogo vjazhushhego v zavisimosti ot dispersnosti i granulometricheskogo sostava [Packing density of composite gypsum binder grains depending on dispersion and

granulometric composition]. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*. 2013. T. 16; 7: 129-131. (in Russ.)

24. Berdov G. I., Il'ina L. V., Zyrjanova V. N., Nikonenko N. I., Mel'nikov A. V. Povyshenie svojstv kompozicionnyh stroitel'nyh materialov vvedeniem mineral'nyh dobavok [Improving the properties of composite building materials by introducing mineral additives]. *Strojprofi*. 2012; 2: 26 – 29. Available at: <http://stroy-profi.info/archive/10994>. (in Russ.)

25. Bazhenov Ju. M., Alimov L. A., Voronin V. V. Razvitie teorii formirovaniya struktury i svojstv betonov s tehnogennymi othodami [Development of the theory of the formation of the structure and properties of concretes with technogenic waste]. *Izvestijavuzov. Stroitel'stvo*. 1996; 7: 55 – 58. (in Russ.)

26. Skoblo L. I. Ispol'zovanie promyshlennyh othodov v cementnoj promyshlennosti SShA [The use of industrial waste in the cement industry of the USA]. *Cement i ego primenenie*. 2005; 4: 75-77. (in Russ.)

27. Rahimova N. R., Rahimov R. Z., Hamitova R. F. Kompozicionnye shlakoshhelochnye vjazhushhie s dobavkami molotogo otseva droblenija betonogo loma [Composite slag-alkaline binders with additives of ground screening of crushed concrete scrap]. *Tehnika i tehnologija silikatov*. 2013. T. 20; 3: 9-15. (in Russ.)

28. Rahimbaev Sh. M., Pogromskij A. S., Duhovanyj G. S., Anikanova T. V. K voprosu o fazovom sostave i racional'nom primenenii samorassypajushhihsja staleplavil'nyh shlakov [On the question of the phase composition and rational use of self-disintegrating steel-making slags]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shuhova*. 2008; 1: 49 – 52. (in Russ.)

29. Gorin V. M., Suhov V. Ju., Nehaev P. F., Avakova V. D., Romanov N. M. Rasshirenie oblastej primeneniya keramzitovogo gravija [Expansion of the fields of application of expanded clay gravel]. *Stroitel'nye materialy*. 2003; 11:19-21. (in Russ.)

30. Samchenko S. V., Makarov E. M. Modificirovanie makro- i mikrostruktury kompozicionnyh materialov gidrosilikatami kal'cija [Modification of macro- and microstructure of composite materials with calcium hydrosilicates]. *Tehnika i tehnologija silikatov*. 2013. T 20; 4:20-24. (in Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Махортов Д. С. Обзор предшествующих исследований, подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных, подготовка материала для статьи.

Загороднюк Л. Х. Организация работы авторского коллектива, формирование направления и формулирование проблемы исследования, постановка задачи и методики проведения исследования, корректирование материала статьи.

Шаповалов Н. А. Обзор предшествующих исследований, обработка полученных данных, подготовка материала для статьи.

Сумской Д. А. Подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных, подготовка материала для статьи.

COAUTHOR'S CONTRIBUTION

Denis S. Makhortov Previous studies review, experimental studies preparation and conduct, data obtained processing, material for the article preparation.

Liliya Kh. Zagorodnyuk Author's teamwork arrangement, direction formation and problem statement, the the purpose and methodology of the study statement, article material correction.

Nikolay A. Shapovalov Previous studies review, data obtained processing, material for the article preparation.

Dmitry A. Sumskoy Experimental studies preparation and conduct, data obtained processing, material for the article preparation.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Махортов Денис Сергеевич – аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций.

Загороднюк Лилия Хасановна – д-р техн. наук, проф. кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций.

Шаповалов Николай Афанасьевич – д-р техн. наук, проф. кафедры теоретической и прикладной химии.

Сумской Дмитрий Алексеевич – ассистент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Denis S. Makhortov – Postgraduate student, the Building Materials Science, Products and Structures Department.

Liliya Kh. Zagorodnyuk – Dr. of Sci., Professor, the Building Materials Science, Products and Structures Department.

Nikolay A. Shapovalov – Dr. of Sci., Professor, the Theoretical and Applied Chemistry Department.

Dmitry A. Sumskoy – Assistant, the Building Materials Science, Products and Structures Department.

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 подрисункной подписью, и отдельными файлами с расширением (JPEG, GIF, BMP). Должны быть пронумерованы (Таблица 1 – Заголовок, Рисунок 1 – Наименование), озаглавлены (таблицы должны иметь заглавие, выравнивание по левому краю, а иллюстрации – подрисункные подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы предоставляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

Общий порядок опубликования

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятыми редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

- с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;
- 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.