

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



научный рецензируемый журнал

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

СИБАДИ •

“Vestnik SibADI”

Том 21, № 4. 2024
Vol.21, No. 4. 2024

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: 10.26518/2071-7296-2024-21-4

ТОМ 21, № 4. 2024

VOL. 21, No. 4. 2024



Учредитель и издатель:

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

644050, г. Омск, проспект Мира, 5
Тел. +7 (3812) 65-03-09;

АДРЕС РЕДАКЦИИ

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

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

Founder and Publisher:

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

644050, Omsk, 5, Mira Ave.
Phone: +7 (3812) 65-03-09

EDITORIAL POSTAL ADDRESS

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

Published since 2004
by 6 issues per year

Subscription index is 66000
in the Ural-Press catalog

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

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», 2024

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

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

2.5.11. – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки),

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

2.9.4. – Управление процессами перевозок (технические науки),

2.9.5. – Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки),

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

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

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

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

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

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

Журнал индексируется и архивируется:

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ);

в международной базе Dimensions;

международной интерактивной справочно-библиографической системе EBSCO;

международной реферативной базе периодических печатных изданий

Ulrichsweb Global Serials Directory;

международной базе открытых публикаций Google Академия;

международной электронно-библиотечной системе The European Library;

научном информационном пространстве «Соционет»;

электронном каталоге научно-технической литературы ВИНТИ РАН;

научной электронной библиотеке «Киберленинка»;

Directory of Open Access Journals (DOAJ SEAL);

CNKI scholar.

Журнал является членом:

Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), CrossRef

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Подписано в печать 14.08.2024. Дата выхода в свет 19.08.2024. Формат 60×84 1/8 Гарнитура Arial. Печать оперативная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 27,25 Тираж 500 экз. Заказ 500 экз. Свободная цена. Отпечатано в типографии Издательско-полиграфического комплекса ФГБОУ ВО «СибАДИ», Россия, г. Омск, проспект Мира, д. 5.

Контент доступен под лицензией CC BY.

Поступившие в редакцию материалы не возвращаются.

Гонорары не выплачиваются.

Все статьи публикуются бесплатно.

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

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», 2024

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

The journal is indexed and archived:

in Russian Index of Scientific Citations;

Dimensions;

EBSCO;

Ulrichsweb Global Serials Directory;

Google scholar

The European Library;

SOCIONET;

VINITI RAS;

Cyberlenika;

The Directory of Open Access Journals (DOAJ SEAL);

CNKI scholar.

The Journal is a member of

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

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



Signed in print on 14.08.2024. Publication date is 19.08.2024. 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)", 2024

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Транспортное, горное и строительное машиностроение

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

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

Транспорт

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

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

Строительство и архитектура

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL TEAM

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

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

Transport, mining and mechanical engineering

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

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

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

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

Transport

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

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

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

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

Construction and architecture

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Scopus Author ID 56487473100

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Sergey V. 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

- М.А. Афанасьев, И.С. Тюремное*
**СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОХОДНЫХ
НЕРЕВЕРСИВНЫХ ВИБРОПЛИТ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ДВИГАТЕЛЕЙ..... 488**
- В.Д. Габидулин*
АКУСТИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ 502
- В.А. Николаев*
**ЭНЕРГИЯ, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ РЕЗАНИЯ ГРУНТА ОКРУЖНЫМИ НОЖАМИ № 4
БОЛЬШОГО РОТОРА ПРЯМОТОЧНОГО РОТОРНОГО РЫХЛИТЕЛЯ 512**
- В.И. Новиков, О.В. Кузьмин*
**ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ
ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ГИДРОСТРУЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 528**
- Р.Ф. Салихов, В.Б. Пермьяков*
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ
ОДНОКОВШОВЫХ ЭКСКАВАТОРОВ 540**

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

- К.Н. Сокирко, Е.А. Павлюченко, Е.А. Лысенко*
**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА
ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОДИОДОВ В ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
С УЧЕТОМ КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ 562**
- Л.С. Трофимова, Д.В. Гаврилин, А.С. Кабжамитова*
**ОРГАНИЗАЦИЯ РЕГУЛЯРНЫХ ПЕРЕВОЗОК ПАССАЖИРОВ
С УЧЕТОМ ОБРАЩЕНИЙ ГРАЖДАН И ДИСПЕТЧЕРСКОГО КОНТРОЛЯ 580**
- А.Г. Шевцова, С.Е. Савотченко, А.А. Юнг*
**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВА ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ
С УЧАСТИЕМ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ МОБИЛЬНОСТИ
НА ПРИМЕРЕ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ 594**

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

- И.С. Кузнецов, В.В. Сиротюк, В.Н. Кузнецова*
МЕТОДЫ РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛЕДОВЫХ ПЕРЕПРАВ 606
- Д.Н. Санников, В.В. Серватинский*
**РАЗРАБОТКА СНЕГОПЕРЕДУВАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ
ДЛЯ ЗАЩИТЫ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ ОТ СНЕЖНЫХ ЗАНОСОВ 618**
- Н.М. Топыпина, Д.Ю. Данилов*
**УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДИАГНОСТИКА ДЕСТРУКЦИИ БЕТОНА
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ АГРЕССИВНЫХ СРЕД 628**

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Mikhail A. Afanasev, Ivan S. Tyuremnov

**STATISTICAL ANALYSIS OF TECHNICAL SPECIFICATIONS
OF FORWARD PLATE COMPACTORS WITH DIFFERENT TYPES OF ENGINES 489**

Vladimir D. Gabidulin

INTERNAL COMBUSTION ENGINE ACOUSTIC DIAGNOSTICS 503

Vladimir A. Nikolaiev

**ENERGY REQUIRED TO CUT THE SOIL WITH NO 4 CIRCUMFERENTIAL KNIVES
OF THE LARGE ROTOR OF THE STRAIGHT-THROUGH ROTARY RIPPER..... 513**

Vitalii I. Novikov, Oleg V. Kuzmin

**DESIGN FEATURES OF HIGH-PRESSURE TRANSMISSION DEVICES
FOR HYDRO-JET TECHNOLOGY 529**

Rinat F. Salikhov, Vladislav B. Permiakov

**STUDY OF THE TECHNICAL PARAMETERS DYNAMICS INFLUENCE
ON OPERATIONAL PERFORMANCE OF HYDRAULIC SINGLE-BUCKET EXCAVATORS.. 541**

PART II. TRANSPORT

Ksenia N. Sokirko, Evgenii A. Pavliuchenko, Evgenii A. Lysenko

**IMPROVING EFFICIENCY OF ROAD TRANSPORT THROUGH THE USE
OF HYDRODIODES IN HYDRAULIC SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT
CAVITATION PHENOMENA..... 563**

Ludmila S. Trofimova, Denis V. Gavrilin, Alima S. Kabzhamitova

**ORGANIZATION OF REGULAR PASSENGER TRANSPORTATION TAKEN INTO
ACCOUNT OF CITIZENS' APPEALS AND DISPATCH CONTROL 581**

Anastasia G. Shevtsova, Sergei E. Savotchenko, Anastasia A. Iung

**PREDICTING THE NUMBER OF ROAD ACCIDENTS INVOLVING PERSONAL MOBILITY
AIDS ON THE EXAMPLE OF KRASNODAR KRAI..... 595**

PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Iliia S. Kuznetsov, Viktor V. Sirotiuk, Viktoria N. Kuznetsova

METHODS FOR ICE CROSSINGS LOAD CAPACITY CALCULATION..... 607

Denis N. Sannikov, Vadim V. Servatinsky

**DEVELOPMENT OF SNOW-BLOWING STRUCTURES
FOR PROTECTION ROADS FROM SNOW DRIFTS..... 619**

Natalia M. Tolypina, Dmitrii Yu. Danilov

**ULTRASONIC DIAGNOSTICS OF CONCRETE DESTRUCTION UNDER INFLUENCE
OF CORROSION ENVIRONMENT 629**



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



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

Научная статья
УДК 625.76.08
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-488-501>
EDN: BRYOWT



СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОХОДНЫХ НЕРЕВЕРСИВНЫХ ВИБРОПЛИТ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ДВИГАТЕЛЕЙ

М.А. Афанасьев ✉, И.С. Тюремнов
Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия
✉ ответственный автор
afanasiev.m.a2016@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Неревверсивные виброплиты – поверхностные грунтоуплотняющие машины с плоским рабочим органом, оснащенные, как правило, одновальным вибровозбудителем круговых колебаний. Привод виброплит может осуществляться от бензиновых, дизельных или электрических двигателей. При проектировании и модернизации неревверсивных виброплит возникают задачи обоснования их технических характеристик: вынуждающей силы и частоты колебаний вибровозбудителя, мощности двигателя, ширины основания и др. Для обобщения многолетнего опыта производителей и выявления взаимосвязей между основными техническими характеристиками неревверсивных виброплит был проведен статистический анализ параметров виброплит с различными типами двигателей.

Материалы и методы. Для выполнения статистического анализа использовались данные о характеристиках неревверсивных виброплит основных отечественных и зарубежных производителей, представленные на официальных сайтах компаний, а также на сайтах их дилеров. Общее количество рассмотренных моделей составило 644. Уравнения регрессии и коэффициенты детерминации получены в программе Microsoft Excel.

Результаты. Установлены диапазоны изменения параметров для неревверсивных виброплит с различными типами двигателей. Получены уравнения регрессии взаимосвязи значений частоты колебаний и вынуждающей силы вибровозбудителя, мощности двигателя, ширины основания и относительной вынуждающей силы от массы неревверсивных виброплит с различными типами двигателей. Определены соответствующие коэффициенты детерминации. Для большинства параметров наблюдаются низкие и очень низкие значения коэффициента детерминации вне зависимости от типа двигателя.

Заключение. Диапазоны изменения технических характеристик дизельных и бензиновых неревверсивных виброплит достаточно близки между собой. Диапазоны изменения технических характеристик электрических виброплит, в большинстве случаев, выходят за диапазоны изменения технических характеристик виброплит с двигателем внутреннего сгорания. Низкий коэффициент детерминации и большой разброс значений параметров свидетельствует об отсутствии у производителей методики обоснования технических характеристик виброплит. Представленные результаты целесообразно использовать для уточнения диапазонов изменения параметров и формулирования требований для математической модели работы самоходных неревверсивных виброплит.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грунт, вибрация, уплотнение, виброплита, виброплита неревверсивная, масса, частота колебаний, вынуждающая сила, относительная вынуждающая сила, мощность двигателя, ширина основания, анализ статистический

Статья поступила в редакцию 29.12.2023; одобрена после рецензирования 28.05.2024; принята к публикации 14.08.2024.

Все 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: Афанасьев М.А., Тюремнов И.С. Статистический анализ технических характеристик самоходных неревверсивных виброплит с различными типами двигателей // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 4. С. 488-501. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-488-501>

© Афанасьев М.А., Тюремнов И.С., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-488-501>

EDN: BRYOWT

STATISTICAL ANALYSIS OF TECHNICAL SPECIFICATIONS OF FORWARD PLATE COMPACTORS WITH DIFFERENT TYPES OF ENGINES

Mikhail A. Afanasev ✉, Ivan S. Tyuremnov

Yaroslavl State Technical University,

Yaroslavl, Russia

✉ corresponding author

afanasiev.m.a2016@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Forward plate compactors are surface soil compaction machines with a flat operating device, which are usually equipped with a single-shaft vibration exciter. Forward plate compactors may be driven by gasoline, diesel or electric engines. When designing and modernizing forward plate compactors, a problem of technical specifications justification may arise, including such parameters as exciting force, vibration exciter oscillation frequency, engine power, base plate width, etc. This statistical analysis of plate compactors with different types of engines was carried out to summarize manufacturers practices and reveal correlations between the technical specifications of forward plate compactors.

Materials and methods. This research is based on the information presented on the official websites of forward plate compactors manufacturers and their dealers. 644 models of forward plate compactors were scrutinized. Regression equations and correlation coefficients were derived using Microsoft Excel software.

Results. Parameters ranges for forward plate compactors with different types of engines were determined. Regression equations of correlations between oscillation frequency, exciting force, engine power, base plate width, relative exciting force and mass of forward plate compactors with different types of engines were derived, as well as the corresponding correlation coefficients. It was revealed, that most parameters have low or very low correlation coefficient, regardless of the engine type.

Conclusion. The ranges of the technical specifications of diesel and gasoline forward plate compactors are quite close to each other. The parameters ranges of electric plate compactors, in most cases, are beyond the ranges of gasoline and diesel plate compactors. Low correlation coefficients and a large scatter of parameters indicate that manufacturers do not have a methodology for justification of the technical specifications of forward plate compactors. Results of the study may be used when clarify ranges of parameters and formulate requirements for a mathematical model of vibration plates behavior.

KEYWORDS: soil, vibration, compaction, plate compactor, forward plate compactor, mass, oscillation frequency, exciting force, relative exciting force, engine power, base plate width, statistical analysis

The article was submitted 29.12.2023; approved after reviewing 28.05.2024; accepted for publication 14.08.2024.

All 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. Afanasev M.A., Tyuremnov I.S. Statistical analysis of technical specifications for non-reversible plate vibrators with different types of engines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (4): 488-501. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-488-501>

© Afanasev M.A., Tyuremnov I.S., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Уплотнение грунта является важной технологической операцией при возведении земляного полотна автомобильных и железных дорог, плотин, оснований фундаментов и т.д. Соблюдение технологии уплотнения обеспечивает формирование структуры грунта, сохраняющей прочность и геометрическую форму грунтового сооружения при воздействии механических нагрузок и погодноклиматических факторов.

Уплотнение грунта может осуществляться с использованием различных видов грунтоуплотняющих машин (ГУМ): грунтовых катков статического и вибрационного действия, траншейных виброкатков, самоходных реверсивных и нереверсивных виброплит, навесных экскаваторных виброплит, вибротрамбовок, трамбующих машин и др.

Самоходные виброплиты (далее – виброплиты) – это грунтоуплотняющие машины с плоским рабочим органом, который вводится в состояние колебательных движений и перемещается по поверхности грунта¹. Промышленно выпускаемые виброплиты оснащаются бензиновым, дизельным или электрическим двигателем. В зависимости от способа передвижения выделяют нереверсивные и реверсивные виброплиты.

Особенностью нереверсивных виброплит является наличие только одного дебалансного вала, в результате чего они могут двигаться только вперед [1]. Это усложняет маневрирование и приводит к тому, что распределение контактных напряжений по площади опорной поверхности виброплиты происходит неравномерно [2]. В то же время, благодаря своей простоте и дешевизне, нереверсивные виброплиты являются наиболее распространенным типом поверхностных ГУМ.

Нереверсивные виброплиты используются для уплотнения дорожных покрытий и несвязных грунтов слоями небольшой толщины. Как правило, такие машины применяются в качестве дополнения к другим видам дорожно-строительной техники и обеспечивают уплотнение тех участков, где невозможно использование более крупного оборудования: в траншеях, у бровок насыпей, в пазухах фундамента и т.д.

К основным параметрам виброплит, определяющим их силовое воздействие на уплотняемый грунт, относятся: масса (M , кг), вынуждающая сила (P , кН) и частота колебаний (f , Гц). Помимо абсолютного значения вынуждающей силы P , для описания характера работы виброплит полезно использовать относительную вынуждающую силу, которая определяется как отношение вынуждающей силы P к весу виброплиты Q , т.е. P/Q . Мощность двигателя (N , кВт) является важной характеристикой виброплит, поскольку этот показатель влияет на текущие затраты на эксплуатацию оборудования, а также на преодолеваемый уклон. Геометрические размеры основания виброплиты влияют на ее производительность сложным образом: увеличение длины опорной поверхности приводит к увеличению циклов приложения нагрузки в одной точке грунта за один проход, но снижает контактные напряжения. Увеличение ширины опорной поверхности (которая, как правило, равна ширине основания) также приводит к уменьшению контактных напряжений, но позволяет увеличить ширину полосы уплотнения. Глубина уплотнения связана с минимальным размером контактной поверхности².

Современные исследования вибрационных ГУМ, и виброплит в частности, сосредоточены на совершенствовании методов контроля качества уплотнения и внедрении так называемых систем «интеллектуального уплотнения» [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14], повышении вибрационной безопасности оборудования [15], снижении его себестоимости и повышении производительности [16, 17]. Ряд работ исследуют условия обеспечения самоходности и динамику нереверсивных виброплит [18, 19, 20].

Вместе с тем влияние основных параметров виброплит на их технологические возможности остается недостаточно изученным. Это создает трудности при обосновании технических характеристик виброплит при их проектировании или модернизации. Также возникают проблемы с обоснованием выбора модели виброплит для работы в различных технологических условиях (определяемых сочетанием влажности грунта, толщины уплотняемого слоя и требуемого коэффициента уплотнения) и необходимого числа проходов. В результате

¹ Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1975. 288 с.

² Там же.

повышается риск снижения качества уплотнения, уменьшается энергоэффективность грунтоуплотняющего оборудования и повышаются текущие затраты на его эксплуатацию.

Существуют исследования, направленные на изучение взаимосвязей между основными параметрами самоходных виброплит [1, 21, 22, 23, 24]. Профессором Н.Я. Хархутой и инженером Ю.Я. Андрейченко были установлены зависимости частоты колебаний вибро-возбудителей и относительной вынуждающей силы виброплит от веса [21]. Однако результаты этой работы не применимы к современным моделям виброплит, поскольку частоты колебаний и относительные вынуждающие силы используемых в настоящее время виброплит значительно (в 2...3 раза) превышают показатели, описанные в исследовании [21]. В более современных работах [1, 22, 23, 24] используется достаточно ограниченная выборка и не учитывается влияние типа двигателя на технические характеристики виброплит.

Цель данного исследования – сбор и систематизация данных о технических характеристиках современных нереверсивных виброплит с различными типами двигателей, а также установление взаимосвязей между их основными параметрами, формулирование требований к математической модели, описывающей взаимодействие основных элементов нереверсивной виброплиты между собой и с грунтом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для выполнения статистического анализа использовались данные о технических характеристиках нереверсивных виброплит, представленные на официальных сайтах компаний-производителей, а также на сайтах их дилеров. Для обработки данных и получения уравнений регрессии использовалась программа Microsoft Excel.

В статистическом анализе рассматривались 644 модели нереверсивных виброплит основных отечественных (Вибромаш, Красный маяк, Сплитстоун, Техком и др.) и зарубежных (ALTECO, AMMANN, Batmatic, Belle, BOMAG, Chicago Pneumatic, Diam, Dynapac, Enar, Euro Shatal, Excalibur, FoxWeld, Helmut, Husqvarna, Huter, Impulse, KOMAN, Lifan, Lumag, MBW, Mikasa, NTC, Vibromax, Wacker Neuson, Weber, Zitrek и др.) производителей. Из 644 рассмотренных моделей 53 произведены на территории СНГ (Россия, Беларусь), 303 – в КНР и 288 – в других странах (Великобритания, Германия, Израиль, Испания, Италия, США, Франция, Чехия, Швейцария, Швеция, Южная Корея, Япония). Из 644 рассмотренных моделей 551 оснащалась бензиновым двигателем, 62 – дизельным и 31 – электрическим.

При анализе технических характеристик самоходных нереверсивных виброплит в качестве основного параметра использовалась их масса.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предварительный анализ технических характеристик нереверсивных виброплит показал, что тип двигателя оказывает существенное влияние на их основные параметры. Поэтому было принято решение разделить все модели нереверсивных виброплит на 3 группы в соответствии с типом применяемого двигателя (бензиновый, дизельный и электрический) и сравнить их между собой.

На рисунках 2, 3, 4, 5 приведены графики, демонстрирующие взаимосвязь массы виброплиты (M , кг) с вынуждающей силой (P , кН) (рисунок 1), частотой колебаний (f , Гц) (рисунок 2), мощностью двигателя (N , кВт) (рисунок 3), шириной основания (B , мм) (рисунок 4) и относительной вынуждающей силой P/Q (рисунок 5). Диапазоны изменений указанных параметров представлены в таблице 1.

Таблица 1
 Диапазоны изменения параметров неререверсивных виброплит
 Источник: составлено авторами.

Table 1
 Range of parameters of forward plate compactors
 Source: compiled by the authors.

Параметр	Тип двигателя		
	Бензиновые	Дизельные	Электрические
Масса плиты М, кг	32...160		
	32...160	69...156	40...143
Вынуждающая сила Р, кН	3,25...30		
	3,25...30	10...30	5...25
Частота колебаний f, Гц	47,5...126		
	60...126	80...117	47,5...112
Мощность двигателя N, кВт	0,25...6,3		
	1,4...6,3	2,5...4,4	0,25...3,1
Ширина основания В, мм	290...610		
	290...610	340...610	300...600
Относительная вынуждающая сила P/Q	5,1...33,24		
	10,35...33,24	12,48...27,8	5,1...24,46

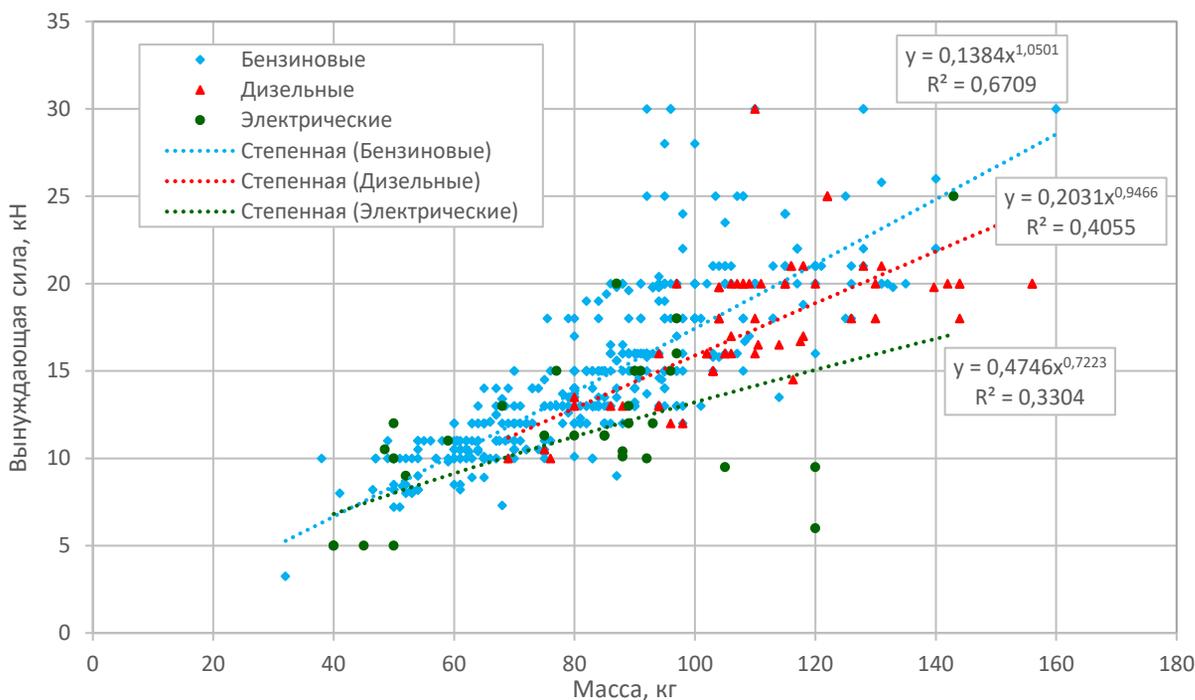


Рисунок 1 – Взаимосвязь массы (М, кг) и вынуждающей силы (Р, кН) неререверсивных виброплит
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Correlation between mass (M, kg) and exciting force (P, kN) of forward plate compactors
 Source: compiled by the authors.

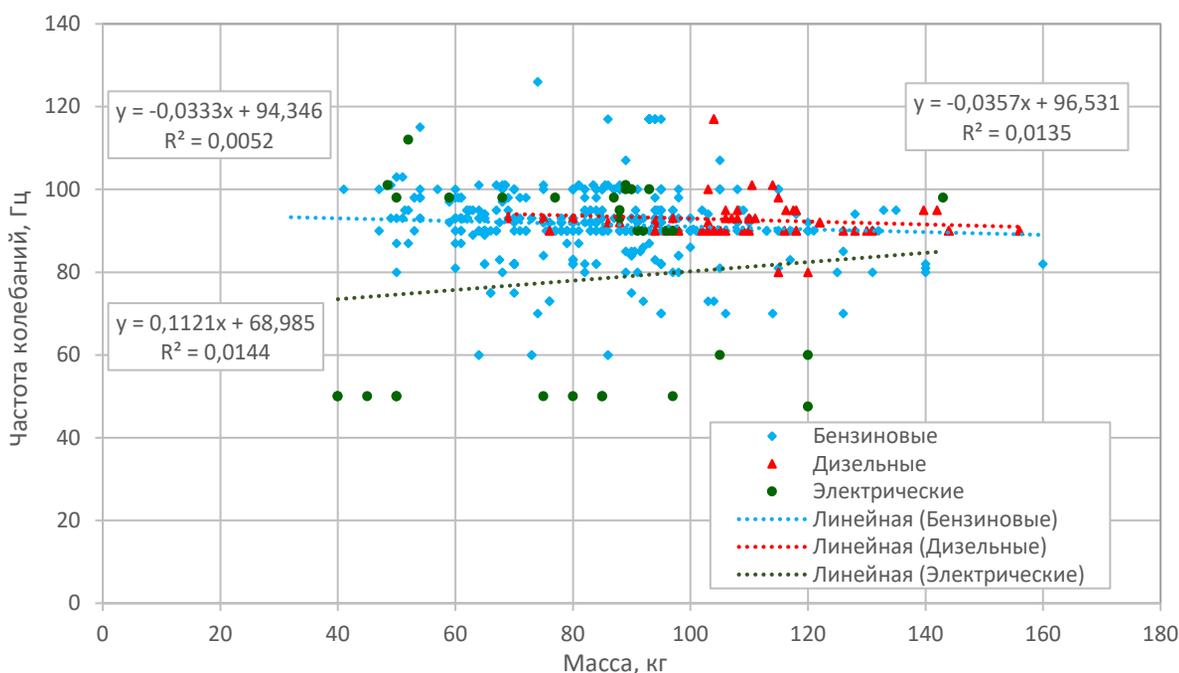


Рисунок 2 – Взаимосвязь массы (M , кг) и частоты колебаний (f , Гц) нереверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Correlation between mass (M , kg) and oscillation frequency (f , Hz) of forward plate compactors
Source: compiled by the authors.

Вынуждающая сила нереверсивных виброплит увеличивается с возрастанием их массы (рисунок 1). При этом нижняя граница диапазона изменения значений вынуждающей силы для бензиновых и дизельных моделей различается (3,25 кН и 10 кН соответственно), а верхняя – совпадает (30 кН). Масса дизельных моделей несколько выше, чем у бензиновых моделей с теми же значениями вынуждающей силы.

Диапазон значений вынуждающей силы для нереверсивных электрических виброплит зарубежного производства составляет 9...25 кН, что в целом совпадает с диапазоном вынуждающих сил виброплит с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Значения вынуждающей силы электрических виброплит, произведенных в России и Белоруссии, находится в пределах 5...11,3 кН, что примерно в 2 раза ниже, чем у зарубежных электрических виброплит.

Низкие значения коэффициентов детерминации свидетельствуют о достаточно большом разбросе значений вынуждающей силы при соответствующих значениях массы виброплит с различными типами двигателей. Характерным является не равномерное распределение

значений вынуждающей силы, а наличие ряда дискретных значений вынуждающей силы (10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 20 кН), реализуемых в виброплитах различной массы с ДВС.

Частота колебаний серийно выпускаемых нереверсивных виброплит почти не зависит от их массы (рисунок 2). Для большинства виброплит характерна частота 90...100 Гц. В этом диапазоне частот находятся 72% всех рассмотренных моделей. Причем бензиновые модели виброплит отечественного и зарубежного производства, а также зарубежные электрические модели расположены в этом диапазоне частот (90...100 Гц) равномерно, а дизельные, вне зависимости от страны производства, находятся у нижней границы диапазона (90...95 Гц). Отдельно следует отметить электрические виброплиты марок Belle, Вибромаш, ЗУБР, Красный маяк и МИСОМ, поскольку они имеют частоту колебаний вибровозбудителя 47,5...60 Гц. Это связано с конструктивными особенностями указанных виброплит, поскольку в них передаточное число трансмиссии близко к единице, либо трансмиссия вообще отсутствует, а дебалансы установлены прямо на валу электродвигателя.

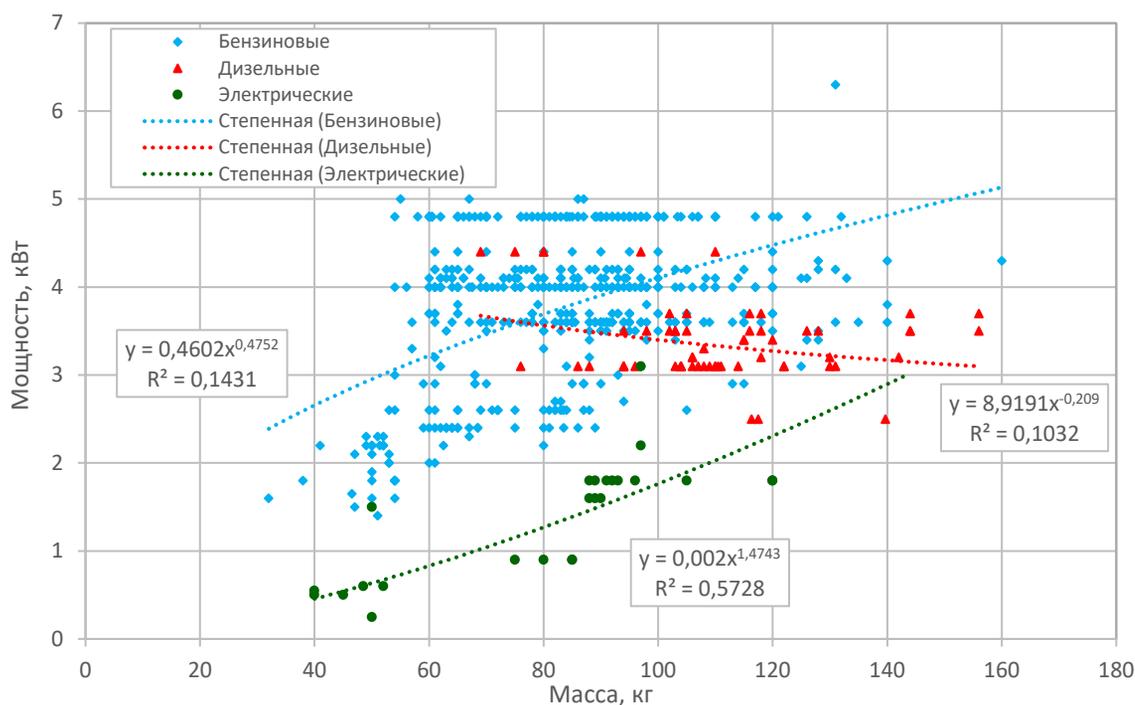


Рисунок 3 – Взаимосвязь массы (M , кг) и мощности (N , кВт) нереверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Correlation between mass (M , kg) and engine power (N , kW) of forward plate compactors
Source: compiled by the authors.

Очень низкие значения коэффициентов детерминации уравнений регрессии для частоты колебаний виброплит с различными типами двигателей не позволяют использовать полученные зависимости в практических целях.

Мощность двигателя нереверсивных электрических виброплит возрастает с увеличением их массы (см. рисунок 3). Для бензиновых и дизельных виброплит точки группируются вдоль горизонталей, что может быть обусловлено применением ограниченного количества моделей ДВС в виброплитах разной массы. Среди бензиновых моделей можно выделить 2 основные группы с мощностью ...3,6; 4,3 и 4,8 кВт, которые соответствуют наиболее популярным моделям двигателей Honda GX160 и GX200, а также их аналогам, производимым в КНР. Дизельные двигатели применяются в нереверсивных виброплитах ограниченно – в основном в моделях массой свыше 75 кг. При одинаковых значениях вынуждающей силы, частоты колебаний и размеров основания модели с дизельным двигателем имеют на 9...14% меньшую мощность и на 5...15% более высокую массу. Разброс точек, соответствующих моделям с дизельным двигателем, несколько меньше, чем у бензиновых. Что

касается электрических виброплит, то их мощность в среднем в 2 раза ниже, чем у аналогов сопоставимой массы с ДВС.

В связи с низкими значениями коэффициентов детерминации зависимостей мощности двигателя от массы нереверсивных виброплит с различными типами двигателей сложно говорить о достоверности полученных уравнений регрессии.

Ширина основания виброплиты возрастает с увеличением её массы (см. рисунок 4). При этом линия регрессии, описывающая характеристики электрических моделей, практически совпадает с линией регрессии для дизельных виброплит в соответствующих диапазонах масс. Для бензиновых моделей зависимость ширины основания от массы имеет более высокий коэффициент детерминации, а линия регрессии, описывающая такие виброплиты, не совпадает с линиями регрессии для электрических и дизельных моделей. Следует также отметить, что наиболее распространенная ширина основания нереверсивных виброплит составляет 500 мм. Такую ширину имеют 59% дизельных моделей и 28% всех виброплит вне зависимости от типа двигателя.

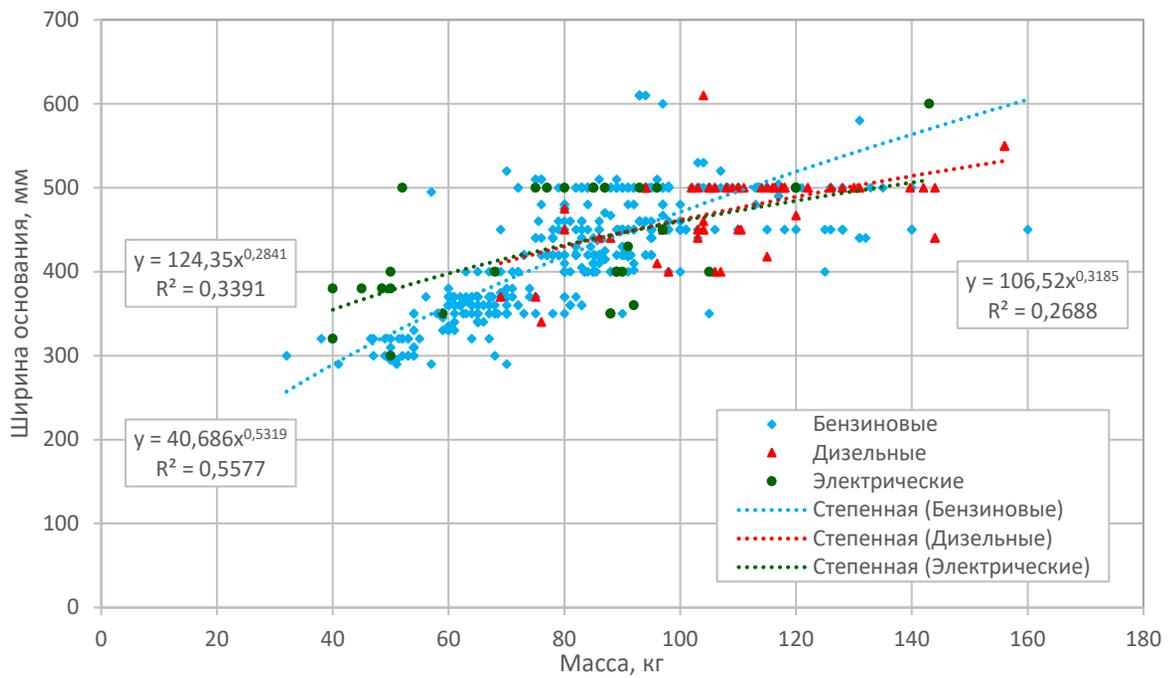


Рисунок 4 – Взаимосвязь массы (M , кг) и ширины основания (B , мм) нереверсивных виброплит
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Correlation between mass (M , kg) and base plate width (B , mm) of forward plate compactors
 Source: compiled by the authors.

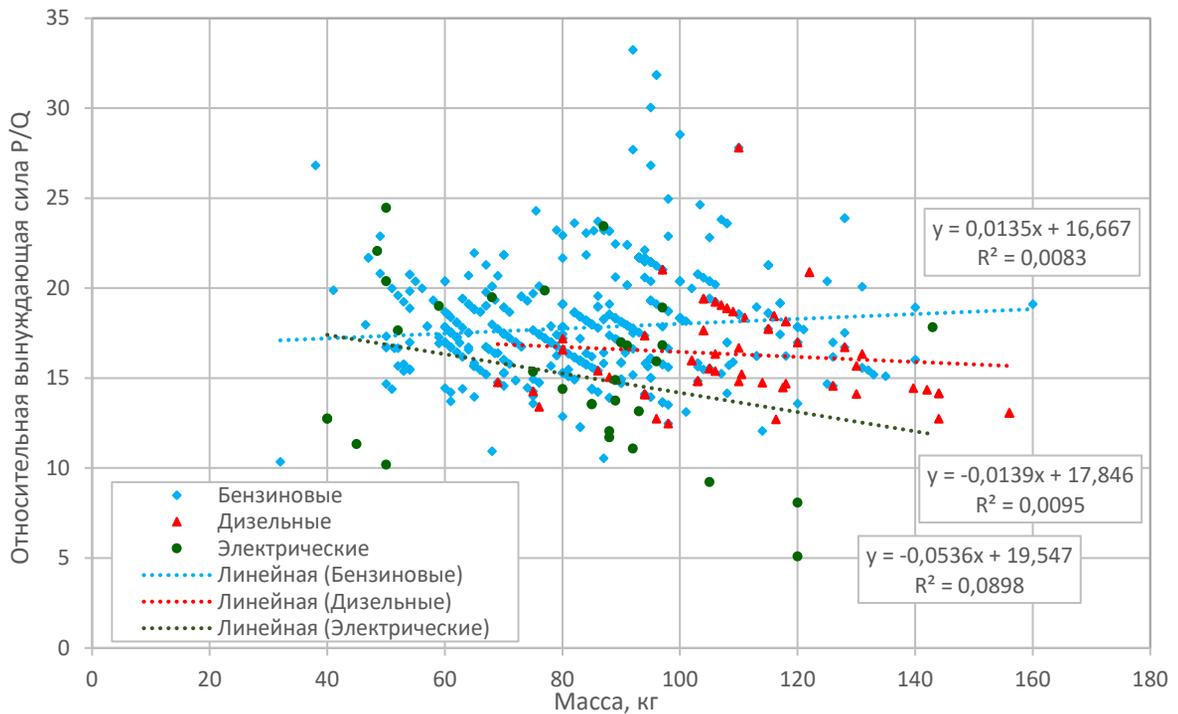


Рисунок 5 – Взаимосвязь массы (M , кг) и относительной вынуждающей силы нереверсивных виброплит
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Correlation between mass (M , kg) and relative exciting force of forward plate compactors
 Source: compiled by the authors.

Диапазоны значений относительной вынуждающей силы бензиновых, дизельных и электрических нереверсивных виброплит практически совпадают (см. рисунок 5). Исключение составляют отдельные модели электрических виброплит Belle, Вибромаш, ЗУБР, Красный маяк и МИСОМ, которые имеют меньшее значение относительной вынуждающей силы, чем их аналоги той же массы.

Полученные уравнения регрессионных зависимостей относительной вынуждающей силы от массы виброплит характеризуются очень низким коэффициентом детерминации. Расположение моделей виброплит на гиперболических кривых обусловлено тем, что большинство производителей выбирают зна-

чения вынуждающей силы из ряда дискретных значений (см. рисунок 1).

Значения относительной вынуждающей силы нереверсивных виброплит существенно превышают критические значения этого параметра, установленные Н.Я. Хархутой³ (таблица 2). Отсюда следует, что все рассматриваемые виброплиты, вне зависимости от типа двигателя, в процессе уплотнения периодически отрываются от грунта. При этом кратность колебаний может превышать 2...4. Этот фактор существенно усложняет исследование динамики виброплит и его обязательно следует учитывать при разработке математической модели, описывающей работу данного типа машин.

Таблица 2
Критические значения относительной вынуждающей силы P/Q для различных частот колебаний вибровозбудителя⁴

Table 2
Critical values of relative exciting force P/Q for different oscillation frequencies of vibration exciter⁴

Параметр	Значение		
Частота колебаний f, Гц	12...25	25...50	50...85
Критическое значение P/Q	0,7...1	1...1,4	1,4...2,3

В таблице 3 представлены уравнения регрессии, связывающие основные характеристики нереверсивных виброплит с массой, а также соответствующие им значения коэффициента детерминации.

Таблица 3
Уравнения регрессии для нереверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Table 3
Regression equations for forward plate compactors
Source: compiled by the authors.

Тип двигателя	Параметр	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации, R ²
Бензиновые	Вынуждающая сила (P, кН)	$P = 0,1384M^{1,0501}$	0,7268
	Частота колебаний (f, Гц)	$f = -0,0333M + 94,346$	0,0052
	Мощность двигателя (N, кВт)	$N = 0,4602M^{0,4752}$	0,2023
	Ширина основания (B, мм)	$B = 40,686M^{0,5319}$	0,6164
	Относительная вынуждающая сила (P/Q)	$P/Q = 0,0135M + 16,667$	0,0083

³ Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1975. 288 с.

⁴ Там же.

Тип двигателя	Параметр	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации, R ²
Дизельные	Вынуждающая сила (P, кН)	$P = 0,2031M^{0,9466}$	0,5291
	Частота колебаний (f, Гц)	$f = -0,0357M+96,531$	0,0135
	Мощность двигателя (N, кВт)	$N = 8,9191M^{-0,209}$	0,0822
	Ширина основания (B, мм)	$B = 106,52M^{0,3185}$	0,2933
	Относительная вынуждающая сила (P/Q)	$P/Q = -0,0139M+17,846$	0,0095
Электрические	Вынуждающая сила (P, кН)	$P = 0,4746M^{0,7223}$	0,3683
	Частота колебаний (f, Гц)	$f = 0,1121M+68,985$	0,0144
	Мощность двигателя (N, кВт)	$N = 0,002M^{1,4743}$	0,6687
	Ширина основания (B, мм)	$B = 124,35M^{0,2841}$	0,3322
	Относительная вынуждающая сила (P/Q)	$P/Q = -0,0536M+19,547$	0,0898

ОБСУЖДЕНИЕ

В каждой из рассмотренных подгрупп нереверсивных виброплит (с бензиновыми, дизельными и электрическими двигателями) наблюдается очень большой (в 2 и более раза) разброс значений параметров. Косвенно это указывает на то, что у производителей отсутствуют методики обоснования технических характеристик нереверсивных виброплит. Причина этого, возможно, кроется в отсутствии методик оценки влияния технических характеристик виброплит на результат уплотнения грунта в различных условиях производства работ (с учетом типа и влажности грунта, толщины уплотняемого слоя и требуемого коэффициента уплотнения).

Диапазоны изменения значений вынуждающей силы, относительной вынуждающей силы и мощности для бензиновых и дизельных виброплит сопоставимой массы совпадают в диапазоне масс до 130 кг. При массе свыше 130 кг диапазоны значений вышеперечисленных параметров для дизельных виброплит располагаются несколько ниже, чем для бензиновых. Диапазоны значений частоты колебаний и ширины оснований совпадают во всем диапазоне масс.

Диапазон изменения значений вынуждающей силы электрических виброплит в целом совпадает с соответствующим диапазоном моделей с ДВС. При этом выделяются электрические модели виброплит, произведенные в РФ и Белоруссии, поскольку они имеют

сравнительно низкие значения вынуждающей силы.

Мощность электрических виброплит значительно ниже, чем у моделей сопоставимой массы с ДВС. При этом значения основных параметров электрических виброплит в значительной мере зависят от их конструкции.

Ряд полученных регрессионных зависимостей, обладающих крайне низким коэффициентом детерминации, имеют характер, не соответствующий известным представлениям о взаимосвязи технических характеристик вибрационных грунтоуплотняющих машин. Это относится к уравнениям регрессии мощности от массы для виброплит с дизельными двигателями, относительной вынуждающей силы от массы для бензиновых моделей, а также частоты колебаний от массы для электрических виброплит.

В ходе исследования не удалось получить регрессионные зависимости длины опорной поверхности от массы виброплиты. Это связано с тем, что большинство производителей приводят информацию только о габаритной длине основания, которая не имеет четкой связи с длиной опорной поверхности. Вместе с тем длина опорной поверхности необходима для определения площади контактной поверхности. Последний параметр большинством производителей также не указывается, однако он необходим для установления амплитудных значений контактных напряжений под виброплитой.

Существующие исследования [1, 21] предлагают использовать для вычисления амплитудных контактных напряжений под виброплитой формулу

$$\sigma_0 = k_{\text{пр}} \frac{P + Q}{F},$$

где P – вынуждающая сила, Н; Q – вес виброплиты, Н; F – площадь опорной поверхности, м²; $k_{\text{пр}}$ – коэффициент превышения.

Формула содержит коэффициент превышения, который получен опытным путем и зависит от относительной вынуждающей силы. Однако значения коэффициента превышения установлены только для значений относительной вынуждающей силы в диапазоне $P/Q = 2 \dots 12$. Как видно из рисунка 5, в современных неререверсивных виброплитах такие низкие показатели относительной вынуждающей силы почти не встречаются. Кроме того, данный коэффициент не учитывает разницу во взаимодействии неререверсивных и реверсивных виброплит с грунтом, обусловленных существенными различиями механизмов их передвижения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для дальнейшего анализа можно не разделять между собой неререверсивные виброплиты с бензиновым и дизельным двигателем. Диапазоны изменения технических характеристик электрических виброплит, в большинстве случаев, выходят за диапазоны изменения технических характеристик виброплит с двигателем внутреннего сгорания.

Низкий коэффициент детерминации и большой разброс значений параметров виброплит различных моделей сопоставимой массы свидетельствует об отсутствии у производителей методики обоснования технических характеристик неререверсивных виброплит. Анализ рекомендаций производителей по оценке технологических возможностей и назначению числа проходов виброплит при уплотнении грунтов в различных условиях производства работ [2, 25] показывает крайнюю ограниченность данных рекомендаций, которые не позволяют применять их для практических целей. Представляется, что оба этих фактора являются следствием отсутствия методики расчета влияния технических характеристик самоходных

неререверсивных виброплит на результат уплотнения грунта в различных условиях производства работ. Одним из факторов, обуславливающих трудность разработки такой методики, является ярко выраженный виброударный характер колебаний виброплит, связанный с тем, что относительная вынуждающая сила неререверсивных виброплит существенно (в 7...13 раз) превышает критические значения при соответствующих частотах колебаний, установленные профессором Н.Я. Хархутой⁵ (см. таблицу 2). Также эта особенность приводит к тому, что в процессе взаимодействия с грунтом виброплита периодически совершает отрыв от грунта, и до восстановления контакта с грунтом вибровозбудитель может совершать несколько оборотов. Это требует обязательного учета при построении математической модели взаимодействия виброплиты с грунтом.

Как показали результаты статистического анализа, невысокие значения коэффициентов детерминации зависимостей основных параметров виброплит от их массы не позволяют сформулировать рекомендации для производителей неререверсивных виброплит только на основании технических характеристик уже существующих моделей. Необходимо более глубокое исследование рабочего процесса взаимодействия неререверсивных виброплит с грунтом для выработки рекомендаций по обновлению технических характеристик виброплит на стадии проектирования.

Тип двигателя влияет на соотношение массы основания и рамы (с двигателем) при релогическом моделировании неререверсивных виброплит с применением многомассных релогических моделей [15].

Продолжается тенденция увеличения частоты колебаний и относительной вынуждающей силы неререверсивных виброплит. Так, ко второй половине 1960-х годов значения частоты колебаний не превышали 65 Гц, а значение относительной вынуждающей силы $P/Q \leq 12 \dots 15$ [21]. К 2011 г. максимальная частота колебаний вибровозбудителя в неререверсивных виброплитах увеличилась до 100 Гц, а значения относительной вынуждающей силы до $P/Q \leq 20$ [1]. В современных моделях неререверсивных виброплит частота колебаний достигает 126 Гц, а относительная вынуждающая сила $P/Q \leq 33$. Это приводит к необходимости корректировки существующей зависимости

⁵ Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1975. 288 с.

Н.Я. Хархуты для расчета значений амплитудных контактных напряжений под реверсивной виброплитой, которая, кроме использования неактуального в настоящее время диапазона значений P/Q , не учитывает частоту колебаний и характеристики уплотняемого грунта.

Полученные регрессионные зависимости позволяют учесть накопленный опыт разработки и эксплуатации виброплит при их проектировании, в частности, для обоснования мощности двигателя и ширины основания не-реверсивных виброплит.

Представленные результаты целесообразно использовать для уточнения диапазонов изменения параметров и формулирования требований для математической модели работы виброплит и определения взаимосвязи их технических характеристик и технологических возможностей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кузьмичев В.А., Кузьмичев В.Д. Исследование рабочих параметров самоходных виброплит, применяемых при уплотнении грунтов // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 3(28). С. 66–71. EDN OPHUNZ.
2. Тюремнов И.С., Новичихин А.А. Уплотнение грунтов вибрационными плитами: монография [Электронный ресурс]. Ярославль. Издат. дом ЯГТУ, 2018. 143 с. – 1 электрон. опт. диск.
3. Anderegg, Roland & Kaufmann, Kuno. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors. GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age. 2006. 10.1061/40803(187)41.
4. Kaufmann, K. & Anderegg, Roland GPS-based Compaction Technology. Proceedings of the 1st International Conference on Machine Control and Guidance. 2008. 287–296.
5. Sivagnanasuntharam, Suthakaran & Sounthararajah, Arooran & Kodikara, Jayantha A New Approach to Maximising the Benefits of Current Intelligent Compaction Technology for Asphalt Materials. Construction and Building Materials. 393. 10.1016/j.conbuildmat.2023.132031.
6. Ranasinghe, Rajitha & Sounthararajah, Arooran & Kodikara, Jayantha An Intelligent Compaction Analyzer: A Versatile Platform for Real-Time Recording, Monitoring, and Analyzing of Road Material Compaction. Sensors.2023. 23. 7507. 10.3390/s23177507.
7. Owusu-Nimo, Frederick & Pephrah-Manu, Daniel & Ayeh, Felix & Charkley, Frederick & Ampadu, Samuel. Compaction Verification of Lateritic Soil Using Electrical Resistivity: A Laboratory Study. Geotechnical and Geological Engineering. 2023. 1–14. 10.1007/s10706-023-02598-z.
8. Hassan, Asem & Nadhum, Gehan. Geotechnical-Electrical Evaluation of Soil Compaction Parameters, South of Baqubah City. Iraqi Geological Journal. 2023. 56. 144–155. 10.46717/igj.56.1D.12ms-2023-4-21.
9. Yao, Yangping & Song, Er Bo. Intelligent compaction methods and quality control. Smart Construction and Sustainable Cities. 2023. 1. 10.1007/s44268-023-00004-4.
10. Aodah, Haider & Chandra, Satish Intelligent Compaction Technology. 2018.
11. Chen, Chengyong & Chang, Fagang & Li, Li & Dou, Wenqiang & Xu, Changjing. Optimization of intelligent compaction based on finite element simulation and nonlinear multiple regression. Electronic Research Archive. 2023. 31. 2775–2792. 10.3934/era.2023140.
12. Xu, Tianyu & Zhou, Zhijun & Yan, Ruipeng & Zhang, Zhipeng & Zhu, Linxuan & Chen, Chaoran & Fu, Xu & Liu, Tong. Real-Time Monitoring Method for Layered Compaction Quality of Loess Subgrade Based on Hydraulic Compactor Reinforcement. Sensors. 2020. 20. 4288. 10.3390/s20154288.
13. Zhang, Zhipeng & Zhou, Zhijun & Guo, Tao & Xu, Tianyu & Zhu, Linxuan & Fu, Xu & Chen, Chaoran & Liu, Tong. A measuring method for layered compactness of loess subgrade based on hydraulic compaction. Measurement Science and Technology. 2021. 32. 10.1088/1361-6501/abd7ab.
14. Hou, Ziyi & Dang, Xiao & Yuan, Yezhen & Tian, Bo & Li, Sili. Research on Intelligent Compaction Technology of Subgrade Based on Regression Analysis. Advances in Materials Science and Engineering. 2021. 1–9. 10.1155/2021/4100896.
15. Кузьмичев В.Д. Математическая модель виброплиты // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 3(35). С. 65–68.
16. Massarsch, K. Rainer & Wersäll, Carl. Vibratory plate resonance compaction. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering. 2019. 173. 1–30. 10.1680/jgeen.19.00169.
17. Sawant, Rohan. Advance Equipment for Compaction on Site. 2021. 10.35291/2454-9150.2021.0099.
18. Рябов Г.К., Леонтьева В.С., Федосеев Ю.В. О механизме передвижения бесколесной виброплиты // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2012. № 3(96). С. 143.
19. Башкарев А.Я., Мусяйко Д.В., Пешков В.С. Вибрационное перемещение поверхностного уплотнителя // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 1(166). С. 175–178.
20. Кузьмичев В.Д. Разработка динамической модели самоходной нереверсивной виброплиты // Механика XXI века. 2012. № 11. С. 39–45.
21. Хархута Н.Я., Андрейченко Ю.Я. Выбор основных параметров виброплит. Строительные и дорожные машины. 1968. № 4. С. 6–8.
22. Мусяйко Д.В., Расулов Р.А. Самоходная вибрационная плита с вальцем // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 4(43). С. 73–80.

23. Anderegg, Roland. Automatische Verdichtungskontrolle: eine Anwendung der nichtlinearen Schwingungstheorie. 2018.

24. Тюремнов И.С., Новичихин А.А. Статистический анализ технических характеристик вибрационных плит // Механизация строительства. 2014. № 11(845). С. 32–35.

25. Тюремнов И.С., Новичихин А.А., Филатов И.С. Обзор рекомендаций производителей по использованию вибрационных плит для уплотнения грунта // Механизация строительства. 2014. № 12(846). С. 28–32.

REFERENCES

1. Kuz'michev V.A., Kuz'michev V.D. Research of working parameters of self-propelled vibroplates used at ground consolidation. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2011; 3(28): 66–71. (in Russ.)

2. Tyuremnov I.S., Novichikhin A.A. *Soil compaction by vibrating plates: monograph* [Electronic resource]. Yaroslavl. Izdat. dom YaSTU, 2018:143. – 1 elektron. opt. disk. (in Russ.)

3. Anderegg, Roland & Kaufmann, Kuno. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors. *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006. 10.1061/40803(187)41.

4. Kaufmann, K. & Anderegg, Roland. GPS-based Compaction Technology. *Proceedings of the 1st International Conference on Machine Control and Guidance*. 2008: 287–296.

5. Sivagnanasuntharam, Suthakaran & Sounthararajah, Arooran & Kodikara, Jayantha. A New Approach to Maximising the Benefits of Current Intelligent Compaction Technology for Asphalt Materials. *Construction and Building Materials*. 2023. 393. 10.1016/j.conbuildmat.2023.132031.

6. Ranasinghe, Rajitha & Sounthararajah, Arooran & Kodikara, Jayantha. An Intelligent Compaction Analyzer: A Versatile Platform for Real-Time Recording, Monitoring, and Analyzing of Road Material Compaction. *Sensors*. 2023. 23. 7507. 10.3390/s23177507.

7. Owusu-Nimo, Frederick & Peprah-Manu, Daniel & Ayeh, Felix & Charkley, Frederick & Ampadu, Samuel. Compaction Verification of Lateritic Soil Using Electrical Resistivity: A Laboratory Study. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2023. 1–14. 10.1007/s10706-023-02598-z.

8. Hassan, Asem & Nadhum, Gehan. Geotechnical-Electrical Evaluation of Soil Compaction Parameters, South of Baqubah City. *Iraqi Geological Journal*. 2023. 56. 144–155. 10.46717/igj.56.1D.12ms-2023-4-21.

9. Yao, Yangping & Song, Er Bo. Intelligent compaction methods and quality control. *Smart Construction and Sustainable Cities*. 2023. 1. 10.1007/s44268-023-00004-4.

10. Aodah, Haider & Chandra, Satish. Intelligent Compaction Technology. 2018.

11. Chen, Chengyong & Chang, Fagang & Li, Li & Dou, Wenqiang & Xu, Changjing. Optimization of intelligent compaction based on finite element simulation and nonlinear multiple regression. *Electronic Research Archive*. 2023. 31. 2775–2792. 10.3934/era.2023140.

12. Xu, Tianyu & Zhou, Zhijun & Yan, Ruipeng & Zhang, Zhipeng & Zhu, Linxuan & Chen, Chaoran & Fu, Xu & Liu, Tong. Real-Time Monitoring Method for Layered Compaction Quality of Loess Subgrade Based on Hydraulic Compactor Reinforcement. *Sensors*. 2020. 20. 4288. 10.3390/s20154288.

13. Zhang, Zhipeng & Zhou, Zhijun & Guo, Tao & Xu, Tianyu & Zhu, Linxuan & Fu, Xu & Chen, Chaoran & Liu, Tong. A measuring method for layered compactness of loess subgrade based on hydraulic compaction. *Measurement Science and Technology*. 2021. 32. 10.1088/1361-6501/abd7ab.

14. Hou, Ziyi & Dang, Xiao & Yuan, Yezhen & Tian, Bo & Li, Sili. Research on Intelligent Compaction Technology of Subgrade Based on Regression Analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021. 1–9. 10.1155/2021/4100896.

15. Kuzmichev V.D. Mathematical model of a vibrating plate. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2012; 3(35): 65–68. (in Russ.)

16. Massarsch, K. Rainer & Wersäll, Carl. Vibratory plate resonance compaction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*. 2019: 173. 1–30. 10.1680/jgeen.19.00169.

17. Sawant, Rohan. Advance Equipment for Compaction on Site. 2021. 10.35291/2454-9150.2021.0099.

18. Ryabov G.K., Leontieva V.S., Fedoseev Yu.V. About the mechanism of wheelless vibratory plate movement. *Transactions of NNSTU N.A. R.E. Alekseev*. 2012; 3(96): 143. (in Russ.)

19. Bashkarev A.Ya., Musiyako D.V., Peshkov V.S. Vibrational movement of the surface compactor. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta*. 2013; 1(166): 175–178. (in Russ.)

20. Kuzmichev, V.D. Development of the dynamic model of the self-propelled non-reversible vibratory plate. *Mehaniki XXI veku*. 2012; 11: 39–45. (in Russ.)

21. Kharkhuta N.Ya., Andreichenko Yu.Ya. Selecting the main parameters of a vibrating plate. *Construction and road machinery*. 1968; 4: 6–8. (in Russ.)

22. Musiyako D.V., Rasulov R.A. Self-propelled vibrating plate with a roller. *Bulletin of PNU*. 2016; 4(43): 73–80. (in Russ.)

23. Anderegg, Roland. *Automatische Verdichtungskontrolle: eine Anwendung der nichtlinearen Schwingungstheorie*. 2018.

24. Tyuremnov I.S., Novichikhin A.A. Statistical analysis of technical characteristics of vibrating plates. *Mehanizacija stroitel'stva*. 2014; 11(845): 32–35. (in Russ.)

25. Tyuremnov, I.S., Novichikhin, A.A., Filatov I.S. Review of manufacturers' recommendations on the use of vibrating plates for soil compaction. *Mehanizacija stroitel'stva*. 2014; 12(846): 28. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Афанасьев М.А. Сбор информации о технических характеристиках виброплит, статистическая обработка данных, подготовка текста статьи.

Тюремнов И.С. Общая организация работы, подготовка текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Afanasev M.A. Data on the technical specifications of plate vibrators collection, data processing, article preparation.

Tyuremnov I.S. General research management, article preparation.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Афанасьев Михаил Александрович – аспирант кафедры «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88), **ORCID:** 0009-0005-5095-2557, **SPIN-код:** 8256-8500, e-mail: afanasiev.m.a2016@yandex.ru

Тюремнов Иван Сергеевич – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2261-4153>, **SPIN-код:** 9976-0728, e-mail: tyuremnovis@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail A. Afanasev. Postgraduate student of the Construction and Road Machines Department, Yaroslavl State Technical University (88, Moskovskii Proezd, Yaroslavl, 150023), **ORCID:** 0009-0005-5095-2557, **SPIN-code:** 8256-8500, e-mail: afanasiev.m.a2016@yandex.ru.

Ivan S. Tyuremnov. Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Construction and Road Machines Department, (88, Moskovsky Prospekt, Yaroslavl, 150023), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2261-4153>, **SPIN-код:** 9976-0728, e-mail: tyuremnovis@yandex.ru

Научная статья
УДК 621.4
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-502-511>
EDN: VOLAZE



АКУСТИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В.Д. Габидулин

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербурга, Россия
toymail_2014@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Для обеспечения стабильной работоспособности транспортно-технологических машин необходимо постоянный контроль их технического состояния. Своевременное диагностирование сложно осуществлять при работе в удаленных регионах, а также при грузоперевозках на большие расстояния из-за отсутствия близкорасположенных центров технического обслуживания.

Материалы и методы. Одним из решений вышеперечисленной проблемы является использование метода диагностирования по звуковым параметрам. В частности, данный метод применим и к силовым установкам. Его преимущество состоит в возможности оперативно оценить состояние механизмов и систем двигателя на месте при помощи портативного прибора (без применения крупногабаритной и маломобильной техники) методом неразрушающего контроля. Таким образом, исследование и внедрение метода акустического диагностирования на сегодняшний день является перспективным и востребованным. Одним из важнейших направлений совершенствования силовых установок сегодня является автоматизация процессов управления их функционированием на основе использования электроники и микропроцессорных систем. При положительном воздействии на эффективность функционирования двигателя эти сложные системы расширяют диапазон его потенциальных неисправностей. Целью данного исследования являлась оценка принципиальной возможности определения и сопоставления акустических параметров двигателя с нарушениями и без нарушений режима функционирования при возникновении отказов в электронных системах управления его работой. В качестве примера объектом исследования выбран легковой автомобиль Ford Focus. В качестве тестовой неисправности использовался сбой в работе электронного модуля зажигания. Полученные спектральные картины звукового излучения ДВС без нарушения и с нарушением режима работы позволяют определить характер неисправности двигателя по звуковым параметрам.

Результаты. Был получен диапазон частот, при котором возможно идентифицировать спектральную картину двигателя с нарушениями режима работы и двигателя без нарушений режима работы. Этот диапазон составил 6 000–6 500 Гц, поскольку на данном отрезке уровень звука достигает более 40 дБ.

Обсуждение и заключение. Проведенный эксперимент является начальной стадией проведения масштабного экспериментального исследования, результат которого послужит отправной точкой для внедрения акустического метода в процесс диагностирования электронных систем управления двигателями внутреннего сгорания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: двигатель внутреннего сгорания, акустическое диагностирование, звуковое излучение, спектральный анализ, метод быстрого преобразования Фурье, электронные системы автомобиля

Статья поступила в редакцию 07.04.2024; одобрена после рецензирования 21.06.2024; принята к публикации 14.08.2024.

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: Габидулин В.Д. Акустическое диагностирование двигателя внутреннего сгорания // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 4. С. 502-511. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-502-511>

© Габидулин В.Д., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-502-511>

EDN: VOLAZE

INTERNAL COMBUSTION ENGINE ACOUSTIC DIAGNOSTICS

Vladimir D. Gabidulin

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint Petersburg, Russia
moymail_2014@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. To ensure stable performance of transport and technological machines, constant monitoring of their technical condition is necessary. Timely diagnosis is difficult to carry out when working in remote regions, as well as when transporting goods over long distances due to the lack of closely located maintenance centers.

Materials and methods. One of the solutions to the above problem is the use of a diagnostic method based on sound parameters. In particular, this method is applicable to power plants. Its advantage is the ability to quickly assess the condition of the engine mechanisms and systems on site using a portable device (without the use of large-sized and low-mobility equipment) by non-destructive testing. Thus, the research and implementation of the acoustic diagnostic method is promising and in demand today. One of the most important areas for improving power plants today is the automation of control processes for their operation based on the use of electronics and microprocessor systems. With a positive effect on the efficiency of the engine, these complex systems expand the range of its potential malfunctions. The purpose of this study was to evaluate the fundamental possibility of determining and comparing the acoustic parameters of an engine with and without violations of the operating mode in the event of failures in electronic control systems of its operation. As an example, the Ford Focus passenger car was chosen as the object of the study. A malfunction in the electronic ignition module was used as a test fault. The obtained spectral patterns of the sound radiation of the internal combustion engine (with and without violations of the operating mode) enable to determine the nature of the engine malfunction by sound parameters.

Results. A frequency range at which it is possible to identify the spectral pattern of an engine with impaired operation and an engine without impaired operation was obtained. This range was 6,000-6,500 Hz, since in this segment the sound level reaches more than 40 dB.

Discussions and conclusions. The conducted experiment is the initial stage of a large-scale experimental study, the result of which will serve as a starting point for the introduction of the acoustic method into the process of diagnosing electronic control systems for internal combustion engines.

KEYWORDS: internal combustion engine, acoustic diagnostics, sound radiation, spectral analysis, fast Fourier transform method, car electronic systems

The article was submitted 07.04.2024; approved after reviewing 21.06.2024; accepted for publication 14.08.2024.

Author 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. Gabidulin V.D. Internal combustion engine acoustic diagnostics. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (4): 502-511. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-502-511>

© Gabidulin V.D., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время транспорт является одной из важнейших отраслей экономики¹. Для обеспечения стабильной работоспособности транспортных и транспортно-технологических машин (ТТМ) в процессе эксплуатации необходимо производить своевременный контроль их технического состояния. При этом предпочтение отдается методам неразрушающего контроля. К такому виду контроля, в частности, относится диагностирование двигателей внутреннего сгорания (ДВС). В процессе эксплуатации ТТМ возникают ситуации, при которых оперативное проведение диагностирования современных ДВС, оснащенных электронными системами управления их функционированием, традиционными методами является проблематичным, например, при работе в удаленных и труднодоступных регионах, при длительных грузоперевозках [1, 2], в условиях подземного строительства [3] и т. п. В связи с этим в России и за рубежом активно ведутся исследования по усовершенствованию существующих и разработке новых способов и средств диагностирования силовых установок. Эти исследования распространяются не только на двигатели наземных машин [4], но и на силовые установки воздушного и водного транспорта [5]. При этом большинство подходов базируется на методе сканирования с использованием показаний встроенных датчиков [6]. Датчики подвержены негативному воздействию окружающей среды (пыль, вода и т. д.), и при выходе их из строя определить неисправность методом сканирования невозможно, что является проблемой. Более того, на транспортно-технологических машинах не все узлы и системы оснащаются датчиками. Кроме того, возникают ситуации, при которых для диагностирования двигателя необходимо подвергнуть частичной разборке, что требует значительных затрат сил и средств. Для решения вышеперечисленных проблем предлагается использование метода акустической оценки качества работы ДВС. Акустический метод диагностирования является методом неразрушающего контроля [7, 8]. Сегодня активно исследуется пассивный акустический

метод, основанный на явлении акустической эмиссии [9]. Среди научных трудов известны исследования по оптимизации способов обработки акустических сигналов при диагностировании двигателей [10], по созданию более эффективных диагностических приборов для их акустической оценки². Ведутся исследования по диагностированию систем питания двигателей с использованием датчиков акустических импульсов [11]. Проведена оценка возможности применения регистрации акустических колебаний для контроля состояния поверхностей трения узлов двигателя внутреннего сгорания [12]. Исследование зарубежного опыта показывает значительный интерес к акустическому методу диагностирования иностранных специалистов [13]. В частности, значительное внимание уделяется акустическому диагностированию системы впрыска топлива [14, 15], оценке состояния топливного насоса высокого давления [16], а также акустическому контролю сгорания дизельного топлива [17]. Поднимается вопрос о контроле выброса загрязняющих веществ, рассматривается возможность восстановления давления в цилиндрах двигателя при помощи акустической эмиссии [18]. Исследователи рассматривают возможность применения метода акустической эмиссии для обнаружения повреждений клапанов в двигателях [19]. Зарубежные специалисты также находят применение акустическому диагностированию в авиационной сфере [20, 21]. Такие работы ведутся и в отечественной авиационной отрасли [22, 23]. В железнодорожной отрасли метод акустического контроля находит свое применение, например, при диагностики силовых трансформаторов электроснабжения железных дорог [24, 25]. Таким образом, исследование по внедрению и усовершенствованию метода акустического контроля технического состояния двигателей внутреннего сгорания является актуальным. В вышеперечисленных источниках исследуется перечень неисправностей, по большей части связанных с оценкой состояния механических систем двигателя – износа трущихся поверхностей кривошипно-шатунного механизма и цилиндрико-поршневой группы, состояния привода и регулировки газораспределительного механизма, систе-

¹ Правительство Российской Федерации от 27 ноября 2021 года №3363-р «О транспортной стратегии Российской Федерации с прогнозом на период до 2035 года».

² Патент 2667826 Российская Федерация, G01M 15/02 G01M 15/05. Устройство для акустической диагностики двигателя: № 2016115114: заявл. 19.04.2016: опубл. 24.09.2018 / Серобабин А.Т., Горбачев А.А., Ворончихин Н.В.; патентообладатель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева».

мы впрыска топлива и т.п. Акустических исследований влияния состояния электронных систем управления работой двигателя на его работоспособность на сегодняшний день не выявлено. Для реализации такого замысла поставлена задача проведения масштабного эксперимента с регистрацией акустических параметров, соответствующих целому комплексу неисправностей электронных компонентов, ограничивающих работоспособность ДВС. Для подготовки к такому исследованию необходимо получить «первичный» опыт решения научных задач подобного рода с целью идентификации необходимых приборов и инструментов, условий и порядка проведения экспериментов, подбора программного обеспечения и аппаратуры. В данной статье изложены результаты подобного «первичного» исследования. Описывается методика и результаты проведения эксперимента по акустическому диагностированию двигателя на примере силовой установки легкового автомобиля.

Цель исследования: оценка принципиальной возможности определения и сопоставления акустических параметров исправного двигателя и двигателя с нарушенными режимами работы из-за возникновения отказов в его электронных системах управления, отработка методики, инструментального и программного обеспечения экспериментов.

Задачи эксперимента:

1. Получение спектральных картин акустического излучения двигателя в исправном состоянии и с нарушенным режимом работы электронной системы управления им.
2. Выявление на основе спектрального анализа зависимости частоты и уровня шума издаваемых звуковых параметров от технического состояния двигателя.
3. Обоснование и апробация инструментального и программного обеспечения эксперимента.

Важность проведенного исследования:

Проведенное исследование является полезным и важным опытом для подготовки к полномасштабному эксперименту, который может стать фундаментом для практического применения метода акустического диагностирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлся бензиновый двигатель внутреннего сгорания автомобиля Ford Focus-2 объемом 1.6 литра с пробегом 214 тыс. км. Для анализа звуковых сигналов, издаваемых двигателем, проводи-

лось преобразование аудиосигнала из временной области в частотную. Для выполнения этой задачи использовался программный комплекс, работа которого основана на методе преобразования Фурье (ПФ) [26]. Теория ПФ применяется к бесконечному гармоническому и непрерывному сигналу. Однако, поскольку в реальных условиях возникает необходимость работать с сигналом в ограниченном временном пространстве, существует метод быстрого преобразования Фурье (БПФ), основанный на ПФ. БПФ – улучшенный алгоритм, созданный с целью уменьшения количества операций, выполняемых во время ПФ. Таким образом, для анализа исходных данных необходимо использовать математический метод обработки звуковых сигналов:

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k)e^{-j\frac{2\pi kn}{N}},$$

где $X(n)$ – измеренные значения сигнала в дискретных временных точках;

N – количество значений сигнала, измеренных за период;

$x(k)$ – комплексные амплитуды синусоидальных сигналов, слагающих исходные сигналы;

k – частота k -й синусоиды, измеренная в колебаниях за период;

$n = 0, \dots, N-1$.

Так как звук представляет собой распространение упругих волн, то измеряемый исходный звуковой сигнал имеет синусоидальный характер с определенным комплексным значением амплитуд $x(k)$, которые разбиваются на количество N значений сигнала за период, в результате чего представляется возможным исходные аудиосигналы рассмотреть в частотной форме, где по оси ординат разложена амплитуда (дБ), а по оси абсцисс – частота сигнала. Таким образом, в ходе эксперимента параметром сравнения будет являться уровень звука (дБ), отложенный по оси ординат на определенных частотах. На сегодняшний день уже существует опыт акустического метода диагностирования при использовании БПФ [27].

Последовательность выполнения исследования

1. Техническое диагностирование двигателя, при необходимости проведение регулировок для вывода его в режим исправного функционирования.

2. Введение неисправности в электронную систему управления двигателем при сохранении возможности его работы, пробеговая оценка функционирования двигателя.

3. Регистрация акустических данных в трех точках работающего неисправного двигателя.

4. Устранение неисправности двигателя.

5. Регистрация акустических данных в тех же точках работающего исправного двигателя и пробеговая оценка его функционирования.

6. Спектральное разложение полученных акустических данных.

7. Обработка и анализ результатов исследования.

8. Формулировка выводов.

Этапы экспериментальных исследований

Первый этап – регистрация акустических сигналов неисправного двигателя.

Перед проведением эксперимента введена неисправность двигателя – сбой в функционировании электронного модуля зажигания, вызывающий перебои в работе второго цилиндра.

При работе двигателя после запуска наблюдаются:

- внешние визуальные отклонения в работе двигателя – высокая интенсивность вибраций;
- хаотичные звуковые излучения – свисты, неравномерность шума и т. п.;
- при движении АТС со скоростью 60 км/ч на III передаче частота вращения двигателя нестабильна, колеблется в диапазоне 2,1 тыс.

– 1,7 тыс. об/мин. Минимальный показатель крутящего момента – 131 Н·м. Минимальный текущий показатель мощности – 23 кВт. Коэффициент полезной мощности двигателя – соотношение максимальной мощности (85 кВт) к текущей, равняется 0,27. Характеристики мощности и моментов определялись в соответствии с графиком, представленном на рисунке 1.

Звуковые сигналы при работающем двигателе регистрировались диктофоном в трех точках. Данные точки указаны на рисунке 2.

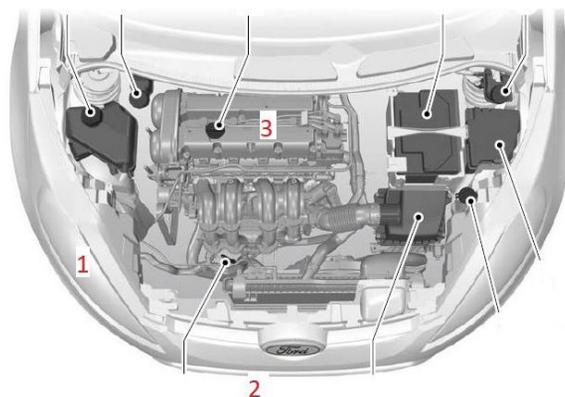


Рисунок 2 – Точки регистрации звуковых сигналов
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Audio signal registration points
Source: compiled by the author.

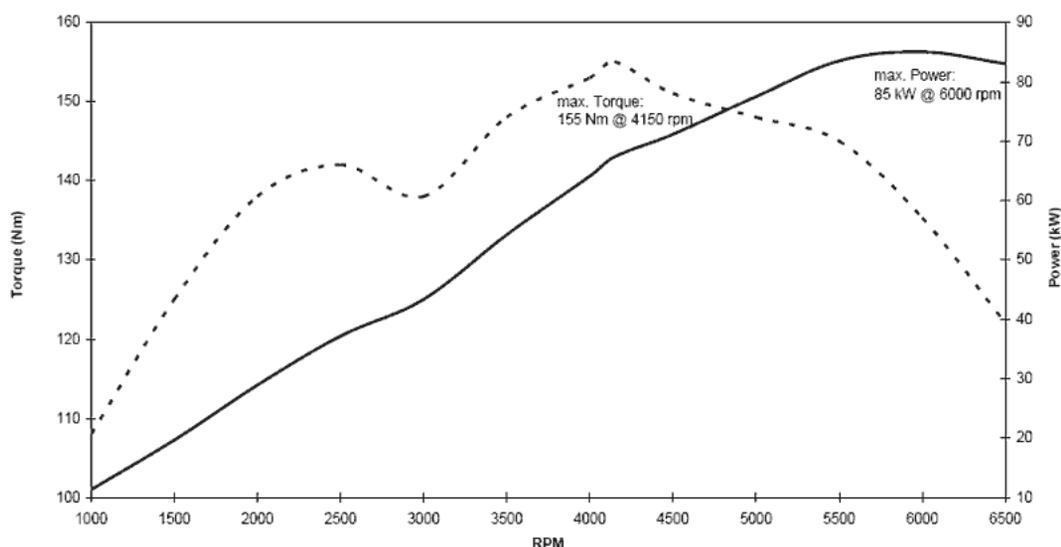


Рисунок 1 – Зависимость момента и мощности от частоты вращения испытуемого двигателя
Источник: открытые электронные ресурсы.

Figure 1 – Dependence of torque and power on the rotation speed of the tested engine.
Source: Open Electronic Resources.

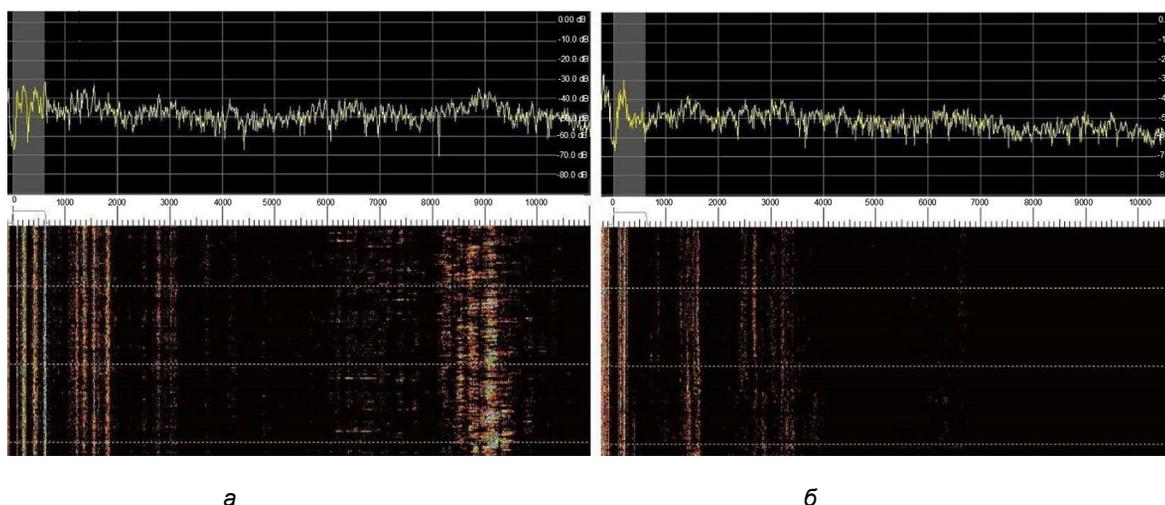


Рисунок 3 – Показания в первой точке:
 а – работа двигателя в режиме ограниченного функционирования;
 б – работа исправного двигателя
 Источник: составлено автором.

Figure 3 – Indications at the first point:
 a) engine operation in limited operation mode
 b) serviceable engine operation
 Source: compiled by the author.

• После регистрации звуковых параметров неисправность двигателя была устранена путем замены модуля зажигания. В результате цилиндры двигателя заработали равномерно, вышеперечисленные внешние отклонения в его работе были устранены. При движении АТС со скоростью 60 км/ч на III передаче частота вращения двигателя стабилизировалась на уровне 2,1 тыс. об/мин. Показатель крутящего момента – 139 Н·м. Показатель мощности – 30 кВт. Коэффициент полезной мощности двигателя – 0,39.

Второй этап – регистрация акустических сигналов двигателя с исправными режимами работы.

Были зарегистрированы сигналы двигателя с исправным режимом работы в аналогичных точках, указанных на рисунке 1.

Таким образом, получен архив из 6 записей. Данный архив разделен на две группы: первая – три записи при неисправно работающем двигателе; вторая – три записи при исправно работающем двигателе.

Третий этап – спектральное разложение полученных данных.

При анализе звуковых сигналов при помощи БПФ представляется возможным рас-

смотрение картины в частотной форме, где по оси ординат разложена амплитуда (дБ), а по оси абсцисс – частота. Для обработки данных использовалось программное обеспечение Spectrum Lab³ (автор – Wolfgang Buesher). Программа является универсальным средством для записи и анализа поступающего на вход звуковой карты сигнала. Однако программа способна анализировать предварительно записанный WAV-файл. Ранее зарегистрированные в ходе эксперимента сигналы записаны в формате MP3. При помощи конвертера файлы были преобразованы в формат WAV. Таким образом, записанные файлы были подготовлены к спектральному разложению полученных данных. На рисунках 3, 4, 5 изображена спектральная картина состояния исправного и неисправного ДВС в разных точках замеров, слева для неисправного двигателя: верхняя картина – амплитуда изменения уровня звука в зависимости от частоты, нижняя картина – визуализация спектра; справа – тоже для исправного двигателя. Условные обозначения визуализации спектра указаны на рисунке 6.

³ Spectrum Lab Users Manual [сайт]. URL: https://qsl.net/dl4yhf/specclab/SpecLab_Manual.pdf. Текст: электронный.

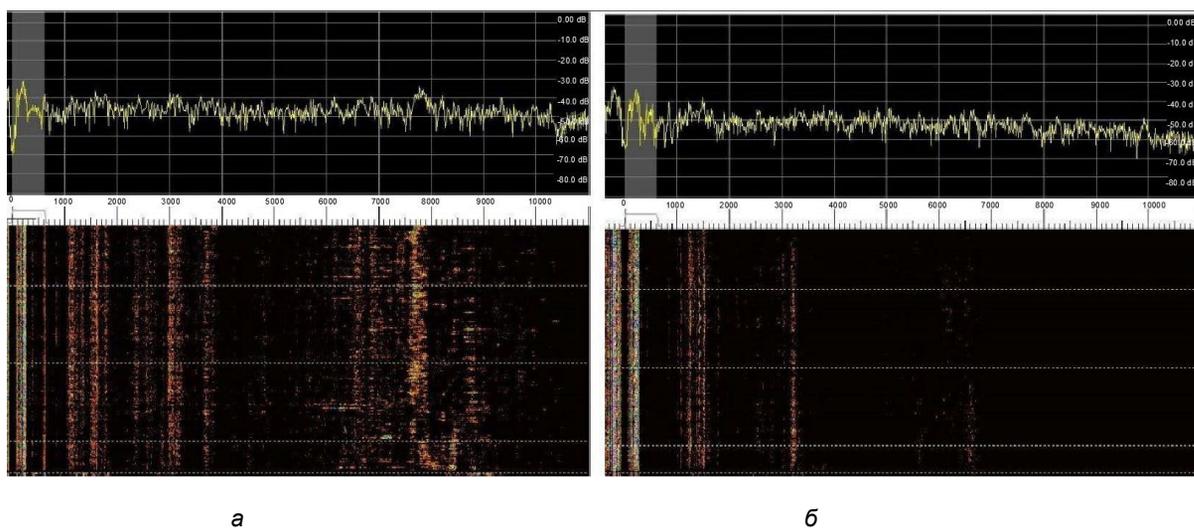


Рисунок 4 – Показания во второй точке:
 а – работа двигателя в режиме ограниченного функционирования; б – работа исправного двигателя
 Источник: составлено автором.

Figure 4 – Readings at the second point:
 a) engine operation in limited operation mode b) serviceable engine operation
 Source: compiled by the author.

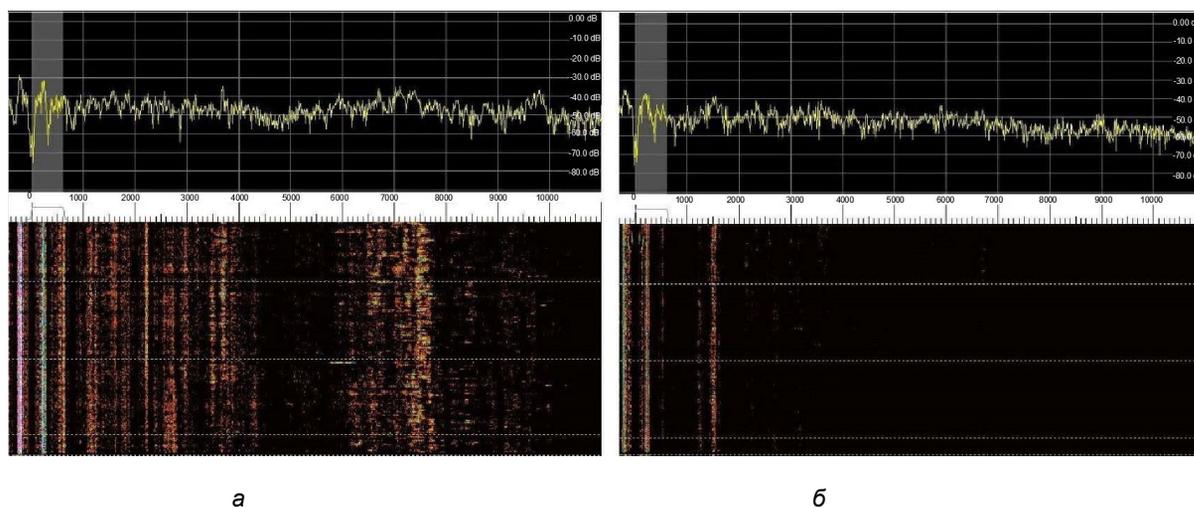


Рисунок 5 – Показания в третьей точке:
 а – работа двигателя в режиме ограниченного функционирования; б – работа исправного двигателя
 Источник: составлено автором.

Figure 5 – Indications at the third point:
 a) engine operation in limited operation mode
 b) serviceable engine operation
 Source: compiled by the author.

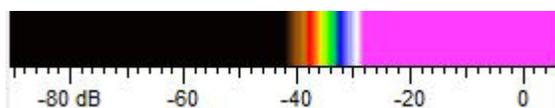


Рисунок 6 – Условные обозначения уровня звука
 Источник: составлено автором.

Figure 6 – Sound level symbols
 Source: compiled by the author.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При обработке и анализе полученных результатов установлено:

– при неисправном двигателе наблюдается большее количество частот, при которых уровень звука достигает более 40 дБ;

– амплитуда звука более 40 дБ на диапазоне частот 4500 ... 5500 Гц в обоих состояниях двигателя отсутствует;

– диапазон частот, при котором можно обнаружить двигатель с нарушениями режима работы - 6000 ... 9500 Гц, в нем стабильно наблюдается повышение амплитуды уровня звука более 40 дБ при работе в режиме ограниченного функционирования; в исправном двигателе в данном диапазоне значения амплитуды уровня звука более 40 дБ отсутствуют.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе эксперимента были успешно зарегистрированы и проанализированы выходные данные акустических параметров как исправного двигателя, так и неисправного. Результатами эксперимента стали спектральные картины, на которых отчетливо прослеживается изменение амплитуды частоты и уровня звука исправного и неисправного двигателя в различных точках.

Был выявлен диапазон частот, при котором можно определить спектральную картину двигателя с нарушенными режимами работы и исправного двигателя. Таким диапазоном целесообразно считать 6000 ... 9500 Гц, так как именно в нем прослеживается повышение уровня звука более 40 дБ в режиме ограниченного функционирования двигателя во всех трех точках. Изменение максимальной плотности уровня звука в различных точках обусловлено удаленностью записывающего устройства и влиянием внешних шумовых факторов. Результаты исследования позволяют определить конкретные акустические параметры, при которых возможно идентифицировать двигатель с нарушенным режимом работы.

Примененный метод акустического диагностирования в сравнении с существующим методом сканирования не требует подключения аппаратуры измерения для контроля показаний встроенных датчиков, что упрощает диагностирование в «полевых» условиях, и исключает зависимость от исправности встроенных датчиков в силовой установке.

Таким образом, подобранные инструментарий, программное обеспечение и метод проведения эксперимента подтвердили возможность

достижения поставленной цели исследования и могут быть использованы для проведения экспериментов на натуральных стендах бензиновой и дизельной силовых установок, имеющих на кафедре наземных транспортно-технологических машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, и обладающих возможностью задавать значительное количество различных режимов ограниченного функционирования электронных систем управления их работой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Острецов Д.А. Проблемы грузоперевозок в России и пути их решения // Наука без границ. 2016. № 1 (1). С. 27–30.

2. Kuruma M., Kulikov A.V. Improving the organization of food transportation by road to shopping centres in Conakry (Guinea) by optimizing supply chains. // Архитектура, строительство, транспорт. 2021. № 2. С. 76–89. DOI 10.31660/2782-232X-2021-2-76-89.

3. Довольнов И.С. Анализ применимости методов подземного строительства гражданских и промышленных зданий // Архитектура, строительство, транспорт. DOI 10.31660/2782-232X-2021-2-50-57. 2021. № 2. С. 50–57.

4. Мусаелянц Г.Г., Павленко Е.А., Сысов Д.К. Способ диагностирования бензиновых двигателей с впрыском топлива с выявлением конкретных неисправностей // Вестник СибАДИ. 2018; 15 (1): 69–76. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-1-69-76>

5. Батялов А.А., Гордеев В.И. Системы технического диагностирования двигателей // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2003. № 5. С. 67–77.

6. Гончаров А.А., Гончаров Н.С. Совершенствование методики диагностирования датчика кислорода автомобильных двигателей // Вестник Оренбургского государственного университета. 2014. № 10(171). С. 236–240.

7. Горбаш В.Г., Делендик М.Н., Павленко П.Н. Неразрушающий контроль в промышленности. Акустический контроль // Неразрушающий контроль и диагностика. 2011. № 4. С. 35–51.

8. Рыбочкин А.Ф., Савельев С.В., Смирнов А.В. Диагностирование состояния работающего автомобильного двигателя на основе анализа издаваемого им акустического шума // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 16 (156). С. 61–77.

9. Лузина Н.П. Анализ результатов контроля технических изделий методом акустической эмиссии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 3 (73). С. 78–83.

10. Дрейзин В.Э., Касем М.М. Возможности диагностики автомобильных двигателей путём анализа шума работающего двигателя // Известия Курского государственного технического университета. 2009.

11. Уваров Г.А. Совершенствование акустического метода диагностирования автомобильных бензиновых двигателей // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2014. № 3. С. 95–98.
12. Деев А.А. Акустические колебания в фрикционном контакте как способ контроля поверхностей трения на этапе приработки двигателей внутреннего сгорания // Вестник Рязанского государственного университета им. С. А. Есенина. 2010. № 29. С. 132–148.
13. Mathew S.K., & Zhang Y. Acoustic-Based engine fault diagnosis using WPT, PCA and Bayesian Optimization. *Applied Sciences*. 2020. 10(19), 6890. DOI: 10.3390/app10196890
14. Albarbar A., Gu F., & Ball A. Diesel engine fuel injection monitoring using acoustic measurements and independent component analysis. *Measurement*. 2010. 43(10), 1376–1386. DOI: 10.1016/j.measurement.2010.08.003
15. Deptuła A., Osiński P., & Radziwanowska U. Decision support system for identifying technical condition of combustion engine. *Archives of Acoustics*. 2016. 41(3). 449–460. DOI: 10.1515/aoa-2016-0046
16. Albarbar A., Gu, F., Ball A., & Starr A. Acoustic monitoring of engine fuel injection based on adaptive filtering techniques. *Applied Acoustics*. 2010. 71(12), 1132–1141. DOI: 10.1016/j.apacoust.2010.07.001
17. Broatch, A., Novella, R., García-Tiscar, J., Gómez-Soriano, J., & Pal, P. Analysis of combustion acoustic phenomena in compression–ignition engines using large eddy simulation. *Physics of Fluids* (1994). 2020. 32(8). DOI: 10.1063/5.0011929
18. Rahman M.S., Verma P., Zare A., Borghesani, P., Bodisco T. A., Ristovski Z., & Brown R.J. In-cylinder pressure reconstruction by engine acoustic emission. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. 152. 107490. DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.107490
19. Jafari S.M., Mehdigholi H., & Behzad M. Valve fault diagnosis in internal combustion engines using acoustic emission and artificial neural network. *Shock and Vibration*. 2014. 1–9. DOI: 10.1155/2014/823514
20. Umair Ahmed U.A. F. A. Acoustic monitoring of an aircraft auxiliary power unit. *ISA Transactions*. 2023. 137. 670–691. DOI: 10.1016/0019-0578(92)90040-p
21. Waligórski M., Batura K., Kucal K., & Merksiz J. Research on airplanes engines dynamic processes with modern acoustic methods for fast and accurate diagnostics and safety improvement. *Measurement*. 2020. 154. 107460. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107460
22. Виноградов В.Ю., Сайфуллин А.А. Контроль технического состояния авиационных ГТД по акустическим параметрам, измеренным на срезе сопла двигателя // Вестник двигателестроения. 2012. № 2. С. 25–29.
23. Никитина Н.Е., Мотова Е.А., Тарасенко Ю.П. Неразрушающий контроль рабочих компрессорных лопаток авиационного двигателя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 3-1 (34). С. 291–295.
24. Волчанина М.А. Статистические исследования сигналов акустического контроля при диагностировании силовых трансформаторов // Известия Транссиба. 2022. № 3. С. 80–89.
25. Черемсин В.Т., Кузнецов А.А., Волчанина М.А., Горлов А.В. Измерение параметров акустических сигналов имитатора дефектов силовых трансформаторов // Инновационные транспортные системы и технологии. 2020. № 4. С. 161–171.
26. Терехов В.И. Автоматизация определения характеристик звукового сигнала // Научно-практический электронный журнал Аллея Науки. 2022. № 7 (70).
27. Mayuraj Ekatpure, Sevlikar, R., & Kamble S. The Condition Monitoring of I.C. Engine using Acoustic Signal Analysis. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2022. 09(06). 1349–1352. Режим доступа: <http://www.irjet.net/archives/V9/i6/IRJET-V9I6238.pdf>

REFERENCES

1. Ostretsov D.A. Problems of a cargo transportation in russia and a way of their decision. *Nauka bez granits*. 2016; 1(1):27-30. (In Russ.)
2. Kuruma M., & Kulikov A.V. Improving the organization of food transportation by road to shopping centres in Conakry (Guinea) by optimizing supply chains. *Arkhitektura, stroitel'stvo, transport [Architecture, construction, transport]*. 2021; (2): 76-89. (In English). DOI: 10.31660/2782-232X2021-2-76-89
3. Dovolnov I.S. Analysis of the applicability of methods of underground construction of civil and industrial buildings. *Arkhitektura, stroitel'stvo, transport [Architecture, construction, transport]*. 2021; (2): 50-57. (In Rus.). DOI: 10.31660/2782-232X-2021-2-50-57
4. Musayelyants G.G., Pavlenko E.A., Sysoyev D.K. Diagnosing method of specific faults' identifying of gasoline engines with fuel injection. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018; 15(1): 69–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-1-69-76>
5. Batjalov A.A., Gordeev V.I. Systems of technical diagnosing of engines. *Bulletin of VSAW*. 2003; (5): 67–77. (In Russ.)
6. Goncharov A.A., Goncharov N.S. Improved methods of diagnosing oxygen sensor automobile engines. *Vestnik of the Orenburg State University*, 2014; (10(171)): 236–240. (In Russ.)
7. Gorbash V.G., Delendick M.N., Pavlenko P.N. Nondestructive testing in Industry. *Acoustic testing. Nondestructive testing and diagnostics*. 2011; (4): 35–51. (In Russ.)
8. Rybochkin A.F., Smirnov A.V., Savelyev S.V. Diagnosing the condition of a running automobile engine based on analysis of the acoustic noise it produces. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*. 2014; 16 (156): 61–77. (In Russ.)
9. Luzina N.P. Analysis of the results of control of technical products by acoustic emission method. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2011; 3 (73): 78–83. (In Russ.)

10. Dreisin V.E., Kasem M.M. Possibilities of diagnostics of automobile engines by analyzing the noise of the running engine. *Proceedings of the Kursk State Technical University*. 2009;2 (27): 32–35. (In Russ.).
11. Uvarov G.A. Improvement of the acoustic method for diagnosing automobile gasoline engines. *Bulletin of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science*. 2016; (3):95–98. (In Russ.).
12. Deev A.A. Acoustic vibrations in frictional contact as a way to control friction surfaces during the running-in stage of internal combustion engines. *Bulletin of the Ryazan State University. S. a. Yesenina*. 2008; (29):132–148. (In Russ.)
13. Mathew S.K., & Zhang Y. Acoustic-Based engine fault diagnosis using WPT, PCA and Bayesian Optimization. *Applied Sciences*. 2020;10(19), 6890. DOI: 10.3390/app10196890
14. Albarbar A., Gu F., & Ball A. Diesel engine fuel injection monitoring using acoustic measurements and independent component analysis. *Measurement*. 2010; 43(10): 1376–1386. DOI: 10.1016/j.measurement.2010.08.003
15. Deptuła A., Osiński P., & Radziwanowska U. Decision support system for identifying technical condition of combustion engine. *Archives of Acoustics*. 2016; 41(3): 449–460. DOI: 10.1515/aoa-2016-0046
16. Albarbar A., Gu, F., Ball A., & Starr A. Acoustic monitoring of engine fuel injection based on adaptive filtering techniques. *Applied Acoustics*. 2010; 71(12): 1132–1141. DOI: 10.1016/j.apacoust.2010.07.001
17. Broatch A., Novella R., García-Tíscar J., Gómez-Soriano J., & Pal P. Analysis of combustion acoustic phenomena in compression–ignition engines using large eddy simulation. *Physics of Fluids (1994)*. 2020; 32(8). DOI: 10.1063/5.0011929
18. Rahman M.S., Verma P., Zare A., Borghesani, P., Bodisco T. A., Ristovski Z., & Brown R.J. In-cylinder pressure reconstruction by engine acoustic emission. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021; 152. 107490. DOI: 10.1016/j.ymsp.2020.107490
19. Jafari S.M., Mehdigholi H., & Behzad M. Valve fault diagnosis in internal combustion engines using acoustic emission and artificial neural network. *Shock and Vibration*. 2014; 1–9. DOI: 10.1155/2014/823514
20. Umair Ahmed U.A. F. A. Acoustic monitoring of an aircraft auxiliary power unit. *ISA Transactions*. 2023; 137: 670–691. DOI: 10.1016/0019-0578(92)90040-p
21. Waligórski M., Batura K., Kucal K., & Merksiz J. Research on airplanes engines dynamic processes with modern acoustic methods for fast and accurate diagnostics and safety improvement. *Measurement*. 2020; 154. 107460. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107460
22. Vinogradov V.U., Sayfullin A.A. Monitoring the technical condition of aviation gas turbine engines using acoustic parameters measured at the engine nozzle exit. *Bulletin of Engine Building*. 2012; (2): 25–29. (In Russ.)
23. Nikitina N.E., Motova E.A., Tarasenko U.P. Non-destructive testing of working compressor blades of an aircraft engine. *VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2012; (3-1 (34): 291–295. (In Russ.)
24. Volchanina M.A. Statistical studies of acoustic control signals when diagnosing power transformers. «Izvestia Transsiba» (Journal of Transsib Railway Studies). 2020; (3): 80–89. (In Russ.).
25. Cheremsin V.T., Kuznetsov A.A., Volchanina M.A. Measurement of parameters of acoustic signals of a power transformer defect simulator. *Innovative Transport Systems and Technologies*. 2020; (4): 161–171. (In Russ.). DOI 10.17816/transsyst202064161-171
26. Terekhov V.I. Automation of determining the characteristics of a sound signal. *Scientific and Practical Electronic Journal Alley of Science*. 2022; 7 (70). (In Russ.)
27. Mayuraj Ekatpure, Sevlikar, R., Kamble, S. The Condition Monitoring of I.C. Engine using Acoustic Signal Analysis. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2022; 09(06): 1349–1352. Available at: //www.irjet.net/archives/V9/I6/IRJET-V9I6238.pdf

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Габидулин Владимир Дмитриевич – аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические машины» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4), **ORCID:** 0009-0008-0565-5440, **SPIN-код:** 1960-0168, e-mail: moy@mail_2014@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir D. Gabidulin – Postgraduate Student of the Ground Transportation and Technological Machines Department, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2 Krasnoarmeiskaia Str., St Petersburg, 190005), **ORCID:** 0009-0008-0565-5440, **SPIN-код:** 1960-0168, e-mail: moy@mail_2014@mail.ru

Научная статья
УДК 625.08
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-512-527>
EDN: QJLXSE



ЭНЕРГИЯ, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ РЕЗАНИЯ ГРУНТА ОКРУЖНЫМИ НОЖАМИ № 4 БОЛЬШОГО РОТОРА ПРЯМОТОЧНОГО РОТОРНОГО РЫХЛИТЕЛЯ

В.А. Николаев

Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия
Nikolaev53@inbox.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема быстрого и качественного строительства дорог, когда объекты хозяйствования и населённые пункты расположены на значительном расстоянии друг от друга, не может быть решена без применения комплекса агрегатов непрерывного действия. Агрегат непрерывного действия, формирующий кювет, и агрегат для проходки туннелей содержат прямоточные роторные рыхлители. Недостаточные теоретические исследования в этой области не позволяют выполнить расчёт взаимодействия с грунтом элементов прямоточного роторного рыхлителя. Поэтому существует необходимость теоретических исследований для определения энергетических параметров большого ротора, в частности, той, которая нужна для резания грунта окружными ножами № 4 большого ротора.

Методика исследования. В предлагаемой статье разработаны методики расчётов необходимых затрат энергии: на отделение пласта от массива грунта; разделение пласта на фрагменты; создание щели в массиве грунта; деформацию части массива грунта; преодоление трения грунта о кромку лезвия; преодоление напора грунта на переднюю поверхность; перемещение грунта передней поверхностью; преодоление трения грунта о переднюю поверхность.

Результаты. На основе данных методик произведены расчёты параметров. Из плоских моделей и пространственной модели сил взаимодействия с грунтом окружных ножей № 4 большого ротора выявлены равнодействующие, их составляющие, нормальные силы. Вычислена сила трения грунта о кромку лезвия и переднюю поверхность окружных ножей № 4. Рассчитана объёмная энергия, необходимая для резания окружными ножами № 4, при разработке прямоточным роторным рыхлителем одного кубического метра грунта.

Заключение. Затраты энергии на привод окружного ножа включают энергию: на отделение пласта от массива грунта; разделение пласта на фрагменты; создание щели в массиве грунта; деформацию части массива грунта; преодоление трения грунта о кромку лезвия; преодоление напора грунта на переднюю поверхность; перемещение грунта передней поверхностью; преодоление трения грунта о переднюю поверхность. В результате расчётов общая энергия, необходимая для резания окружными ножами № 4, при разработке прямоточным роторным рыхлителем одного кубического метра грунта, составила 9110 джоулей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, автодороги, агрегаты непрерывного действия, прямоточный роторный рыхлитель, большой ротор, окружной нож № 4, лезвие

Статья поступила в редакцию 06.12.2023; одобрена после рецензирования 07.06.2024; принята к публикации 14.08.2024.

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. Энергия, необходимая для резания грунта окружными ножами № 4 большого ротора прямоточного роторного рыхлителя // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 4. С. 512-527. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-512-527>

© Николаев В.А., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-512-527>

EDN: QJLXSE

ENERGY REQUIRED TO CUT THE SOIL WITH NO 4 CIRCUMFERENTIAL KNIVES OF THE LARGE ROTOR OF THE STRAIGHT-THROUGH ROTARY RIPPER

Vladimir A. Nikolaiev

Yaroslavl Technical University,

Yaroslavl, Russia

nikolaev53@inbox.ru

ABSTRACT

Introduction. To solve the problem of the fast and high-quality road construction, when economic facilities and settlements are located at a considerable distance from each other, cannot be solved without the use of a complex of continuous units. The continuous ditch forming unit and the tunneling unit contain straight-through rotary rippers. Insufficient theoretical studies in this area do not enable to calculate the interaction of the elements of a direct-flow rotary ripper with the soil. Therefore, there is a need for theoretical studies to determine the energy parameters of the large rotor, in particular, that which is necessary for cutting the soil with the No.4 circumferential knives of the large rotor.

The research method. The methods for calculating the required energy inputs: to separate the reservoir from the soil mass; separation of the reservoir into fragments; creating a gap in the soil mass; deformation of a part of the soil mass; overcoming the friction of the ground on the edge of the blade; overcoming the soil pressure on the front surface; movement of the soil by the front surface; overcoming the friction of the ground on the front surface have been developed.

Results. On the basis of the developed methods, the parameter calculations were made. From the plane models and the spatial model of the forces of interaction with the soil of the circumferential knives No.4 of the large rotor, resultant forces, their components, normal forces were revealed. The force of friction of the soil on the edge of the blade and the front surface of No.4 circumferential knives was calculated. The volumetric energy required for cutting with No.4 circumferential knives when mining one cubic meter of soil with a straight-through rotary ripper is calculated.

Conclusion. The energy required to drive the circumferential knife includes separating the seam from the soil mass; separation of the reservoir into fragments; creating a gap in the soil mass; deformation of a part of the soil mass; overcoming the friction of the ground on the edge of the blade; overcoming the soil pressure on the front surface; movement of the soil by the front surface; overcoming the friction of the ground on the front surface. As a result of the calculations, the total energy required for cutting with No.4 circumferential knives, when mining one cubic meter of soil with a straight-through rotary ripper, was 9110 joules.

KEYWORDS: construction, roads, continuous units, straight-through rotary ripper, large rotor, No. 4 circumferential knife, blade

The article was submitted 06.01.2023; approved after reviewing 07.06.2024; accepted for publication 14.08.2024.

Author 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. Energy required to cut the soil with No.4 circumferential knives of the large rotor of the straight-through rotary ripper. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (4): 512-527. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-512-527>

© Nikolayev V.A., 2024



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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ:

1) разработаны методики расчётов затрат энергии: на отделение пласта от массива грунта; разделение пласта на фрагменты; создание щели в массиве грунта; деформацию части массива грунта; преодоление трения грунта о кромку лезвия; преодоление напора грунта на переднюю поверхность; перемещение грунта передней поверхностью; преодоление трения грунта о переднюю поверхность;

2) разработана методика построения пространственной модели сил взаимодействия с грунтом кромки лезвия окружного ножа № 4;

3) построены схемы действия условных сил на элементы окружного ножа № 4 в плоскостях;

4) рассчитана объёмная энергия, необходимая для резания тремя окружными ножами № 4, при разработке прямоточным роторным рыхлителем одного кубического метра грунта.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема быстрого и качественного строительства дорог, когда объекты хозяйствования и населённые пункты пространственно разобщены, расположены на значительном расстоянии друг от друга, не может быть решена без применения комплекса агрегатов непрерывного действия [1, 2]. Прямоточный роторный рыхлитель, входящий в состав агрегата, формирующего кювет, должен иметь большой ротор и малый ротор, установленный соосно с большим ротором [3]. Рациональный диаметр большого ротора прямоточного роторного рыхлителя 1 м.

К сожалению, существующие теоретические исследования [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21] не позволяют выполнить расчёт взаимодействия с грунтом элементов прямоточного роторного рыхлителя. Поэтому существует необходимость теоретических исследований для выявления геометрических, кинематических, динамических и энергетических параметров элементов конструкции. Ранее в работах [3, 22, 23] были установлены следующие параметры большого ротора: угловая скорость $\omega_p = 5$ рад/с, время одного оборота $\tau_1 = 1,256$ с. На роторе ножи установлены в три ряда, поэтому время 1/3 поворота ротора $\tau_{1/3} = 0,419$ с, подача на нож $s_{нб} = 0,035$ м. Угол β отклонения лезвия каждого окружного ножа в плоскости резания по отношению к направлению резания 30° . Время одного оборота малого ротора $\tau_{1мп} = 0,486$ с.

Из всех унифицированных ножей большого ротора окружной нож № 4 является ближай-

шим к оси ротора. Так как расстояние от оси вращения большого ротора до лезвия окружного ножа № 4 изменяется от 209,5 до 217 мм, среднее расстояние примем $r_{№4} = 0,213$ м. Радиус малого ротора $r_{г.3} = 180$ мм, поэтому толщина слоя грунта между большим ротором и малым ротором варьируется от 29,5 до 37 мм. Этот грунт от воздействия окружных ножей № 4 обрушивается внутрь большого ротора. Для унификации расчётов примем толщину пласта, отделяемого от массива грунта окружным ножом № 4 и всеми торцевыми ножами большого ротора равной подаче на нож, $s_{нб} = 35$ мм. Длина лезвия окружного ножа $l_{л.о№4} = 115,5$ мм. Угол заострения лезвия ножа с учётом его трансформации и перемещения агрегата: $i_{мп} = 16,43^\circ$. Средняя окружная скорость лезвия окружного ножа № 4:

$$\begin{aligned} v_{окр\ №4} &= \omega_p r_{№4} \cdot v_{окр\ №4} = \\ &= 5 \cdot 0,213 \approx 1,07 \text{ м/с.} \end{aligned}$$

Целью предлагаемого теоретического исследования является определение энергии, необходимой для резания грунта окружными ножами № 4 большого ротора прямоточного роторного рыхлителя.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим резание грунта окружным ножом № 4 без учёта грунта, поступающего с малого ротора. Когда окружной нож № 4 перемещается в верхней части траектории (рисунок 1, а), сила $G_{сн}$ тяжести отрезанного слоя грунта не препятствует, а даже способствует первоначальной деформации отрезаемого пласта грунта. Поэтому окружной нож № 4 в верхней части траектории осуществляет свободное резание и когда приближается к уровню оси ротора лезвием вниз (рисунок 1, б), сила $G_{сн}$ тяжести отрезанного слоя грунта также не препятствует первоначальной деформации отрезаемого грунта. Однако по мере удаления лезвия от уровня оси ротора вниз резание переходит в полузажатое. Когда окружной нож № 4 приближается к уровню оси ротора лезвием вверх (рисунок 1, в), сила $G_{сн}$ тяжести прижимает отрезанный слой грунта к окружному ножу, затрудняя первоначальную его деформацию. Окружной нож № 4 осуществляет полузажатое резание. По мере удаления лезвия от уровня оси ротора вверх резание переходит из полузажатого в свободное. Когда окружной нож № 4 перемещается в нижней части траектории (рисунок 1, г), сила $G_{сн}$ тяжести прижимает отрезанный слой грунта к передней поверхности окружного ножа, препятствуя первоначальной деформации отрезанного пласта.

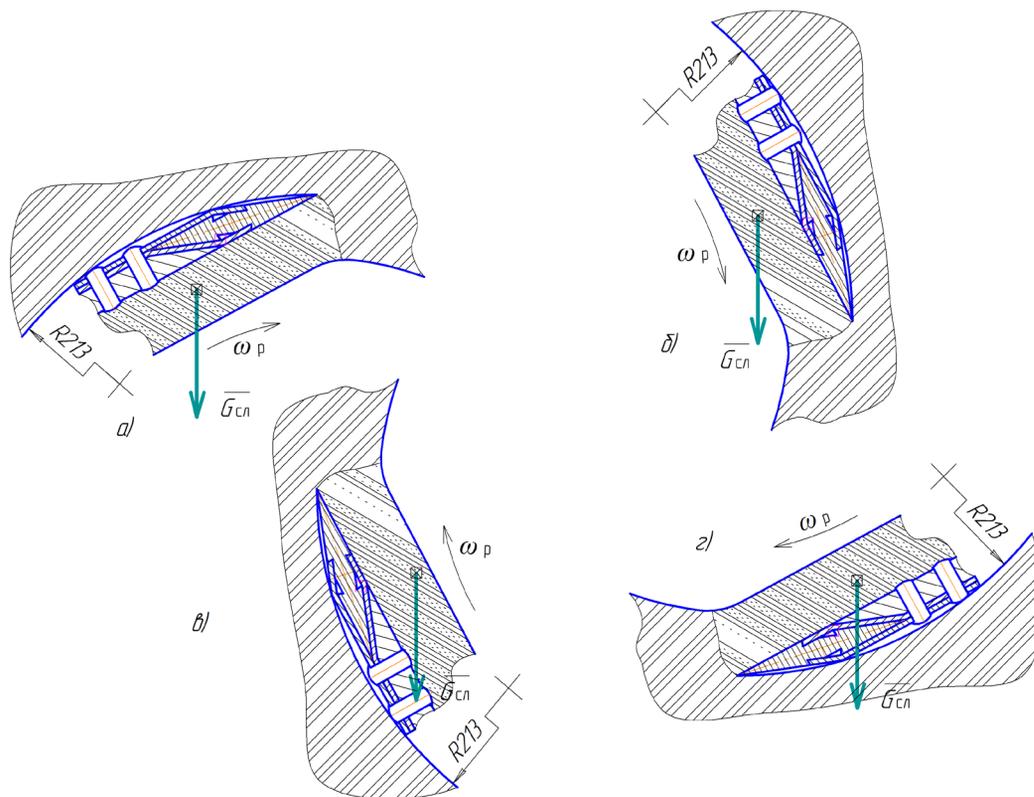


Рисунок 1 – Положения окружного ножа прямооточного роторного рыхлителя при резании грунта:
 а – в верхней части траектории; б, в – на уровне оси большого ротора;
 г – в нижней части траектории
 Источник: составлено автором.

Figure 1 – Positions of the circumferential blade of a straight-through rotary ripper when cutting soil:
 а – in the upper part of the trajectory; б, в – at the level of the axis of the large rotor;
 д – at the bottom of the trajectory
 Source: compiled by the author.

Окружной нож осуществляет резание, близкое к зажатоуму. Итак, если бы не поступал грунт с малого ротора, процесс резания грунта окружным ножом № 4 зависел бы от его положения в пространстве.

Однако на резание грунта окружным ножом № 4 оказывает влияние грунт, поступающий с малого ротора массой $m_{мр}$ [23]. Обозначим объёмную массу грунта, разрыхлённого малым ротором, ρ_p . Тогда объём грунта, поступающий с малого ротора,

$$V_{Мр} = \frac{m_{Мр}}{\rho_p}. \tag{1}$$

Время одного оборота малого ротора $\tau_{1мр}$. Поэтому объём грунта, поступающий с малого ротора во внутреннее пространство между окружными ножами № 4 за один оборот малого ротора,

$$V_{Мр-№4} = V_{Мр}\tau_{1мр}. \tag{2}$$

Длины проекций лезвий торцевых ножей и лезвий окружных ножей на продольно-радиальную плоскость $l_{пр}$. Расстояние от оси вращения большого ротора до слоя грунта, срезаемого малым ротором $r_{эз}$. Радиус вала привода большого ротора $r_{вбп}$. Объём внутреннего пространства между окружными ножами № 4, без учёта объёма, занимаемого окружными лопастями,

$$V_{обл№4} = l_{пр}\pi(r_{эз}^2 - r_{вбп}^2). \tag{3}$$

Определим составляющие затрат энергии на привод окружного ножа при разработке грунта объёмом **один кубический метр**.

Затраты энергии на отделение пласта от массива грунта

Передний угол лезвия окружного ножа, с учётом трансформации заточки лезвия, $\alpha_{о4} = 24,63^\circ < \varphi_{с-э}$ [3]. Так как передний угол не превышает угол трения грунта по стали $\varphi_{с-э} \approx 25^\circ$, то при резании произойдёт отрыв

пласта от массива перед лезвием. Образование щели в массиве грунта щели перед лезвием является дискретным явлением, происходит микроотрывами. Примем путь, на котором происходит микроотрыв, $l_{omp} \approx 18$ мм [23].

Заменим дискретный отрыв элементов пласта от массива грунта единовременным явлением так, как будто сразу оторван пласт площадью, равной площади отрыва при разработке одного кубического метра грунта. Допустим, перемещение агрегата при разработке грунта объёмом один кубический метр s , подача на нож $s_{нб}$. Окружные и торцевые ножи установлены в три ряда [3]. Следовательно, количество оборотов большого ротора, необходимое для разработки грунта,

$$n_{бр} = \frac{s}{3s_{нб}}. \quad (4)$$

Длина щели отрыва грунта от массива

$$l_{щ\ №4} = 2\pi r_{№4} n_{бр} / \cos \delta, \quad (5)$$

где δ – угол наклона спирали, по которой движется точка на лезвии окружного ножа № 4 к плоскости, перпендикулярной оси вращения большого ротора.

Площадь отрыва, то есть щели в массиве грунта от воздействия лезвия окружного ножа № 4,

$$S_{отр\ о№4} = s_{нб} l_{щ\ №4}. \quad (6)$$

Примем для полузажатого резания со скольжением предел прочности грунта на растяжение σ_p^s . **Силы, действующие при разработке грунта объёмом один кубический метр, назовём условными силами.** Условная сила, необходимая для преодоления сцепления грунта при отрыве пласта от массива,

$$F_{отр\ о№4} = \sigma_p^s S_{отр\ о№4}. \quad (7)$$

Примем величину перемещения пласта в процессе его отделения от массива грунта h_{omp} . Тогда энергия на создание щелей в массиве при разработке грунта тремя окружными ножами № 4:

$$u_{отр\ о№4} = 3F_{отр\ о№4} h_{omp}. \quad (8)$$

Затраты энергии на разделение пласта на фрагменты

Коэффициент k_{yn} , учитывающий увеличение площади поликриволинейной поверхности в сравнении с площадью плоскости и наличие трещин-ответвлений [23] при увеличении толщины пласта свыше 10 мм на 5 мм увеличивается на 0,1. Поэтому для пласта грунта тол-

щиной 35 мм $k_{yn} = 1,5$. Площадь поверхности отделения одного фрагмента от другого:

$$S_{р\ о№4} = k_{yn} s_{нб} \cdot s_{нб}. \quad (9)$$

Расстояние, на котором происходит разделение пласта на фрагменты, является случайной величиной. Допустим среднее расстояние равно пути одного микроотрыва, l_{omp} . Тогда количество разрывов пласта

$$n_{пл\ №4} = \frac{l_{щ\ №4}}{l_{omp}}. \quad (10)$$

Суммарная площадь разрывов пласта грунта

$$S_{\Sigma р\ о№4} = S_{р\ о№4} n_{пл\ №4}. \quad (11)$$

Условная сила, необходимая для разделения пласта грунта на фрагменты,

$$F_{р\ о№4} = \sigma_p^s S_{\Sigma р\ о№4}. \quad (12)$$

Так как приняты три окружных ножа, энергия на разделение пласта на фрагменты

$$u_{р\ о№4} = 3F_{р\ о№4} h_{omp}. \quad (13)$$

Условные силы $F_{отр\ о№4}$ и $F_{р\ о№4}$ представляют распределённую по кромке лезвия нагрузку, действующую в одном направлении, перпендикулярно передней поверхности окружного ножа № 4. Заменим распределённую нагрузку сосредоточенными **условными** силами, приложенными в некоторой точке к кромке лезвия. Пространственная схема **условных** сил, действующих на кромку лезвия окружного ножа № 4 в этой точке, показана на рисунке 2.

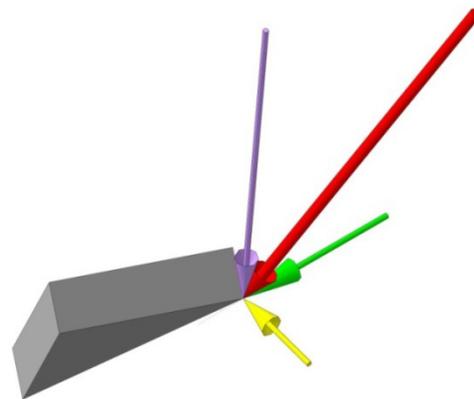


Рисунок 2 – Схема условных сил, действующих на кромку лезвия окружного ножа № 4
Источник: составлено автором.

Figure 2 – Diagram of conditional forces acting on the edge of the blade of No. 4 circumferential knife
Source: compiled by the author.

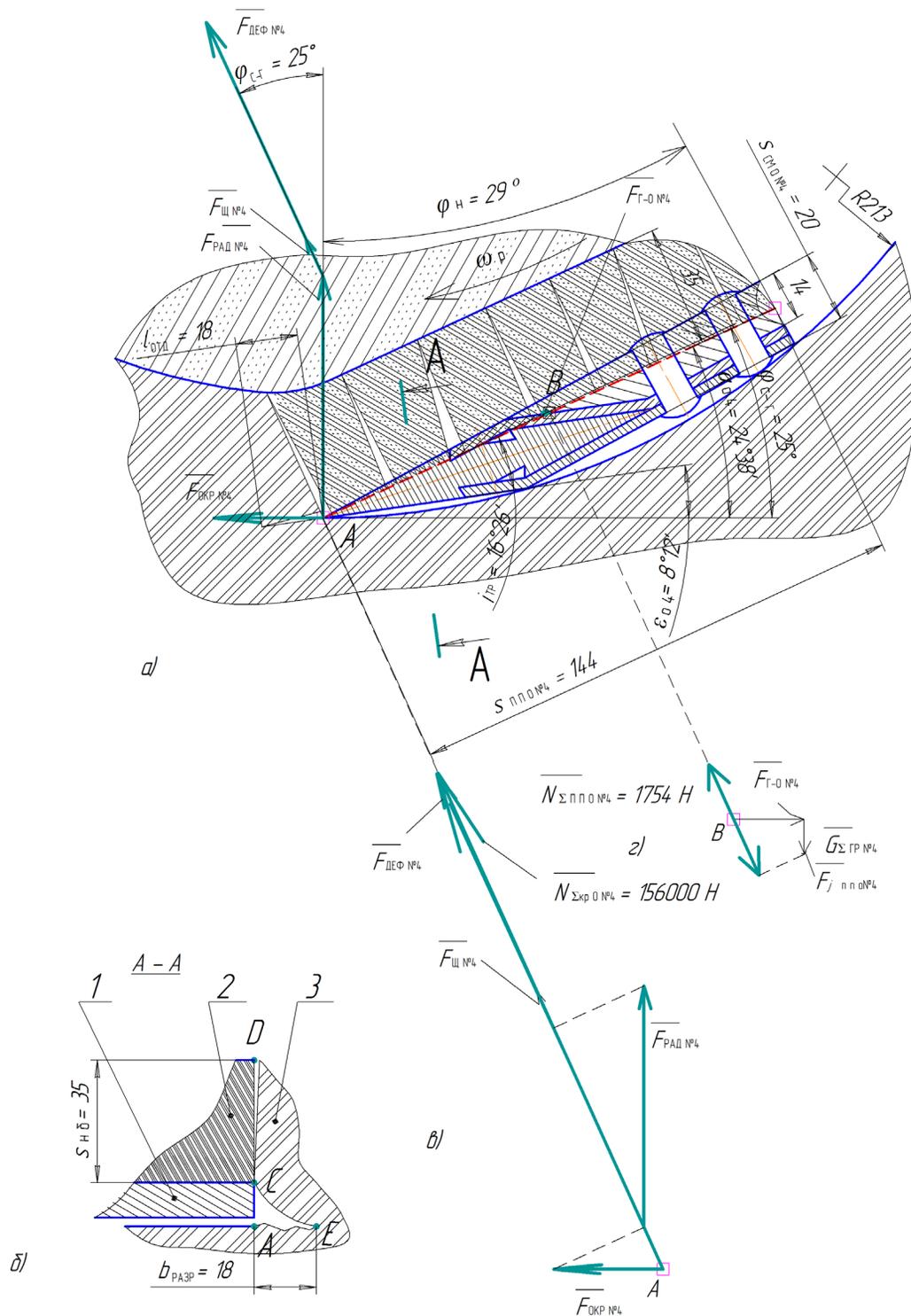


Рисунок 3 – Схемы: а – сечения окружного ножа № 4 поперечно-вертикальной плоскостью; б – сечения А – А; 1 – окружной нож № 4; 2 – отделившийся пласт; 3 – массив грунта; в, г – схемы условных сил для определения условных нормальных реакций кромки и передней поверхности окружного ножа № 4
 Источник: составлено автором.

Figure 3 – Diagrams: а – sections of No. 4 circumferential knife with a transverse-vertical plane; б – cross-sections А – А; 1 – No. 4 circumferential knife; 2 – separated seam; 3 – soil mass; в, г – schemes of conditional forces for determining the conditional normal reactions of the edge and front surface of No. 4 circumferential knife
 Source: compiled by the author.

Сумму условных сил $F_{\text{опр о№ 4}} + F_{\text{р п о№ 4}}$ (красный вектор) разложим на:

– радиальную составляющую, направленную от центра вращения большого ротора (сириневый вектор);

– окружную составляющую, направленную по касательной к траектории точки лезвия окружного ножа № 4, преодолеваемую вращающим моментом привода большого ротора (зелёный вектор);

– продольную составляющую, направленную параллельно оси вращения большого ротора, создающую силу тяги ножа (жёлтый вектор).

На рисунок 3, а нанесём **условную** окружную составляющую $F_{\text{окр о№ 4}}$ и **условную** радиальную составляющую воздействия кромки лезвия на грунт, равные соответствующим силам воздействия грунта на кромку лезвия окружного ножа № 4, но противоположно направленные.

Энергия на создание щели в массиве грунта

Часть массива грунта, расположенная вблизи обреза окружного ножа № 4 со стороны направления движения агрегата, находится в сложном напряжённом состоянии, сочетающем напряжения смятия, растяжения, среза и сдвига в разных плоскостях. На рисунке 3, б показано сечение А – А окружного ножа № 4.

При внедрении в массив грунта лезвия окружного ножа № 4, одновременно с отделением пласта от массива, происходит образование щели АЕ в массиве грунта. Ширина щели в массиве грунта зависит от свойств грунта и других факторов. Можно предположить, что затраты энергии на создание щели в массиве грунта оправданы, так как в этой щели будет перемещаться лезвие следующего ножа № 4. Однако это маловероятно по двум причинам. Во-первых, форма и глубина щели в массиве произвольная, зависящая от свойств грунта. Во-вторых, если грунт сыпучий, щель до прохода следующего ножа будет погребена. Поэтому на сопротивление грунта перемещению следующего ножа № 4 наличие щели незначительно повлияет.

Для расчёта ширины щели разрыва грунта в массиве примем равной расстоянию микроотрыва: $b_{\text{щ}} = l_{\text{опр}} = 18$ мм. Площадь щели в массиве грунта от воздействия лезвия окружного ножа № 4:

$$S_{\text{щ о№ 4}} = b_{\text{щ}} l_{\text{щ № 4}} \quad (14)$$

Условная сила воздействия кромки лезвия одного окружного ножа № 4, необходимая для преодоления сцепления грунта,

$$F_{\text{щ № 4}} = \sigma_{\text{р}}^{\text{с}} S_{\text{щ о№ 4}} \quad (15)$$

Энергия на создание щелей в массиве

$$u_{\text{щ № 4}} = 3F_{\text{щ № 4}} h_{\text{разр}} \quad (16)$$

Направление силы воздействия кромки лезвия окружного ножа № 4, при создании щели в массиве грунта, изменяется. Если подойти строго, можно судить лишь о мгновенном значении этой силы как по величине, так и по направлению. На рисунке 3, а придадим направление **условной** силе под углом трения стали о грунт к **условной** радиальной силе.

Затраты энергии на деформацию части массива грунта

При дальнейшем внедрении в грунт окружного ножа № 4 происходит деформация части массива грунта (см. рисунок 3, б). Если бы отделённый пласт не был связан какое-то время с остальным массивом, затраты энергии на деформирование части массива грунта можно было бы не учитывать. Но поскольку отделённый пласт связан с остальным массивом, затраты энергии на деформирование его нельзя не учитывать. Сложность определения затрат энергии на деформирование заключается в том, что часть массива грунта, расположенная вблизи обреза окружного ножа № 4 со стороны направления движения агрегата, находится в сложном напряжённом состоянии. Допустим, отделение сбоку пласта от массива грунта произойдёт, когда касательные напряжения по линии CD превысят предел прочности грунта на сдвиг.

Допустим, длина линии CD равна подаче на нож $s_{\text{н б}}$. Длина одной щели при отделении пласта от массива в период разработки 1 грунта $l_{\text{щ}}$. Поверхность сдвига пласта грунта относительно массива, проходящая через линию CD, представляет пространственную спиральную ленту, перпендикулярную оси вращения большого ротора. Протяжённость этой поверхности, проходящей через линию CD параллельно движению обреза окружного ножа № 4, не равна длине щели.

При вычислении площади сдвига длину линии CD следовало бы умножить не на длину щели, а на некую среднюю линию поверхности сдвига, то есть спиральной ленты. Однако, учитывая замену сдвига по множеству поверхностей деформацией сдвига по одной поверхности и возможный подпор разрыхлён-

ного грунта, поступающего от малого ротора, при определении общей площади сдвига длину средней линии спиральной ленты примем равной длине щели $l_{щ}$. Тогда площадь сдвига

$$S_{сд о № 4 общ} = S_{HБ} l_{щ}. \quad (17)$$

Условная сила воздействия кромки лезвия окружного ножа № 4, приводящая к деформации части массива грунта,

$$F_{деф о № 4} = \tau_{сд}^e S_{сд о № 4 общ}. \quad (18)$$

Примем величину перемещения грунта при деформации части массива равной толщине окружного ножа со щёками (см. рисунок 3, а) $s_{см о № 4}$. Энергия на деформирование части массива

$$u_{деф о № 4} = 3F_{деф о № 4} s_{см о № 4}. \quad (19)$$

На рисунке 3, а придадим направление силе $F_{деф № 4}$ под углом трения стали о грунт $\varphi_{с-г} = 25^\circ$ к радиальной силе.

Затраты энергии для преодоления трения грунта о кромки лезвий

С рисунка 3, а перенесём на рисунок 3, в и сложим: условную окружную составляющую $F_{окр № 4}$, условную радиальную составляющую $F_{рад № 4}$, условную силу воздействия передней кромки лезвия, направленную на создание щели в массиве грунта $F_{щ № 4}$, условную силу, направленную на сдвиг грунта $F_{деф № 4}$, приведя их к точке А лезвия окружного ножа № 4 и спроецировав на направление, перпендикулярное передней поверхности окружного ножа № 4. Из рисунка выявим условную нормальную реакцию кромки лезвия окружного ножа № 4 $N_{скр о № 4}$. Приведенную нормальную реакцию кромки лезвия окружного ножа № 4 к расстоянию $l_{отр}$ определим из пропорции

$$N_{скр о № 4} = N_{скр о № 4} \frac{l_{отр}}{l_{щ № 4}}. \quad (20)$$

Сила трения грунта о кромку окружного ножа № 4

$$F_{т кр о № 4} = f_{с-г} N_{скр о № 4}. \quad (21)$$

Путь грунта по окружному ножу № 4 равен длине $l_{щ № 4}$ щели отрыва пласта от массива грунта при разработке грунта объёмом один кубический метр. Энергия на преодоление трения грунта объёмом один кубический метр о кромки лезвий трёх окружных ножей № 4

$$u_{т кр о № 4} = 3F_{т кр о № 4} l_{щ № 4}. \quad (22)$$

Затраты энергии на преодоление напора грунта на передние поверхности окружных ножей № 4

Предположим, что не окружной нож № 4 перемещается в неподвижном грунте, а грунт набегает на неподвижный окружной нож, воздействуя на его переднюю поверхность силой $F_{е № 4}$. Грунт ударяется о неподвижный нож и тормозится им. Разделим переднюю поверхность пополам и обозначим точку В приложения силы $F_{е № 4}$ (см. рисунок 3, а). Средняя окружная скорость грунта, поступающего на окружной нож № 4 большого ротора, равна средней окружной скорости $v_{окр № 4}$ лезвия окружного ножа № 4. Подача на нож $S_{HБ}$. Объём грунта, воздействующего на окружной нож № 4 в секунду, без учёта грунта, поступающего от малого ротора,

$$\frac{V_{е о № 4}}{\tau_{з е № 4}} = S_{HБ} \cdot S_{HБ} v_{окр № 4}. \quad (23)$$

Плотность грунта ρ . Масса грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4 большого ротора в секунду,

$$m_{о № 4} = \rho \frac{V_{е о № 4}}{\tau_{з е № 4}}. \quad (24)$$

Заменим постепенное воздействие грунта на нож одномоментным воздействием всей массы, сосредоточенной в пласте при разработке одного кубического метра грунта. Общий объём грунта, воздействующего на окружной нож № 4,

$$V_{е-о № 4-1} = S_{HБ} \cdot S_{HБ} \cdot l_{щ № 4}. \quad (25)$$

Уточним расчёт. Перемещение агрегата для разработки грунта объёмом один кубический метр, s . Среднее расстояние от оси вращения большого ротора до лезвия окружного ножа № 4 $r_{№ 4}$. Наружный радиус диска малого ротора $r_{г3}$. Отсюда общий объём грунта, воздействующего на три окружных ножа № 4,

$$V_{е-о № 4} = \pi(r_{№ 4}^2 - r_{г3}^2)s. \quad (26)$$

Уточнённый объём грунта, воздействующего на один окружной нож № 4,

$$V_{е-о № 4-1} = V_{е-о № 4} / 3. \quad (27)$$

Масса грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4 большого ротора,

$$m_{общ о № 4} = \rho V_{е-о № 4}. \quad (28)$$

Так как пласт грунта распадается на фрагменты, с достаточной степенью точности можно принять время замедления фрагмента грунта равным времени микроотрыва:

$$\tau_{z-o\text{№}4} = \frac{l_{omp}}{v_{окр\text{№}4}}. \quad (29)$$

Примем конечную скорость грунта после его замедления $v_{кон\text{о№}4} = 0$. Замедление грунта

$$a_{z-o\text{№}4} = \frac{v_{окр\text{№}4} - v_{кон\text{о№}4}}{\tau_{z-o\text{№}4}}. \quad (30)$$

Условная сила воздействия поступающего грунта на один окружной нож № 4

$$F_{z-o\text{№}4} = a_{z-o\text{№}4} m_{общ\text{о№}4}. \quad (31)$$

Энергия на преодоление напора грунта на переднюю поверхность трёх окружных ножей № 4

$$u_{z-o\text{№}4} = 3F_{z-o\text{№}4} l_{omp}. \quad (32)$$

Затраты энергии на перемещение грунта передними поверхностями

При перемещении по передней поверхности окружного ножа № 4 (см. рисунок 3, а) отрезанный слой грунта сместится перпендикулярно касательной к окружной скорости на расстояние $s_{см\text{о№}4} = 20$ мм. В зависимости от положения окружного ножа № 4 (см. рисунок 1) на неё будет действовать бо́льшая или меньшая доля силы тяжести отрезанного слоя грунта. Доля этой силы тяжести будет равна нулю только в момент, когда окружной нож № 4 перемещается в верхней части траектории (см. рисунок 1, а), когда вектор силы тяжести перпендикулярен передней поверхности. В этот момент слой грунта от воздействия силы тяжести будет падать вниз с ускорением g или с ускорением, создаваемым передней поверхностью окружного ножа № 4. Если разность этих ускорений положительная, грунт будет осыпаться вниз без воздействия передней поверхности окружного ножа. Если разность этих ускорений отрицательная, грунт будет осыпаться вниз от воздействия передней поверхности окружного ножа. Допустим, ускорение грунта, создаваемое передней поверхностью окружного ножа № 4, равно отношению скорости $v_{п\text{п}\text{о№}4}$ грунта к времени $\tau_{п\text{п}\text{о№}4}$ перемещения грунта по передней поверхности:

$$a_{п\text{п}\text{о№}4} = \frac{v_{п\text{п}\text{о№}4}}{\tau_{п\text{п}\text{о№}4}}.$$

Однако скорость отрезанного слоя грунта зависит от окружной скорости лезвия окружного ножа № 4:

$$v_{п\text{п}\text{о№}4} = v_{окр\text{№}4} \frac{s_{см\text{о№}4}}{s_{п\text{п}\text{о№}4}},$$

$$\text{а время } \tau_{п\text{п}\text{о№}4} = \frac{s_{п\text{п}\text{о№}4}}{v_{окр\text{№}4}}.$$

Поэтому ускорение грунта, создаваемое передней поверхностью окружного ножа,

$$a_{п\text{п}\text{о№}4} = \frac{v_{окр\text{№}4}^2 s_{см\text{о№}4}}{s_{п\text{п}\text{о№}4}^2}. \quad (33)$$

Из дальнейших расчётов видно, что ускорение свободного падения существенно превышает ускорение, создаваемое передней поверхностью окружного ножа № 4. В этом положении (см. рисунок 1, а) грунт будет осыпаться вниз без воздействия передней поверхности окружного ножа.

В положении, показанном на рисунке (см. рисунок 1, б), грунт будет также осыпаться вниз без воздействия передней поверхности окружного ножа № 4 до момента, когда синус угла между вертикалью и передней поверхностью окружного ножа будет меньше отношения ускорения, создаваемого окружным ножом № 4 к ускорению силы тяжести:

$$\sin \delta \leq \frac{a_{п\text{п}\text{о№}4}}{g}; \quad \sin \delta \leq \frac{1,145}{9,8} = 0,1168; \quad \delta \leq 6,7^\circ.$$

Следовательно, воздействие передней поверхности окружного ножа № 4 на отрезанный пласт грунта начнётся в момент движения вниз окружного ножа (см. рисунок 1, б), когда его передняя поверхность будет отклонена от вертикали на угол $\delta = 6,7^\circ$, не доходя до вертикали. Закончится воздействие передней поверхности окружного ножа на отрезанный пласт грунта в момент движения вверх окружного ножа № 4 (см. рисунок 1, в), когда его передняя поверхность будет отклонена от вертикали на угол $\delta = 6,7^\circ$ после перехода через вертикаль. То есть это воздействие будет длиться в течение периода времени оборота окружного ножа № 4, когда нож преодолевает нижнюю половину траектории, соответствующем углу поворота

$$\varphi_{п\text{п}} = 180^\circ + 2\delta = 193,4^\circ.$$

Доля угла поворота $\varphi_{п\text{п}}$ в полном обороте окружного ножа № 4:

$$n_{п\text{п}} = 193,4^\circ : 360^\circ \approx 0,537.$$

Общий объём грунта, воздействующего на окружной нож № 4, $V_{э-о№4}$. Масса грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4 большого ротора, $m_{общ о№4}$. Масса грунта, поступающего с малого ротора в секунду, $m_{мр}$. Если обозначить период τ_a , то в течение этого времени на один окружной нож № 4 поступит с малого ротора грунт массой

$$m_{\Sigma мр №4} = m_{мр} \cdot \tau_a : 3. \quad (34)$$

Суммарная масса грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4 большого ротора, и поступающего с малого ротора на один окружной нож № 4:

$$m_{\Sigma о№4} = m_{общ о№4} + m_{\Sigma мр №4}. \quad (35)$$

Если бы окружной нож № 4 перемещался в грунте строго горизонтально, то затраты энергии на перемещение грунта его передней поверхностью можно оценить потенциальной энергией подъёма грунта данной суммарной массой на высоту $h_{пп} = S_{см о№4}$ (см. рисунок 3, а). Чтобы свести движение окружного ножа № 4 по спирали к строго горизонтальному движению, следует скорректировать суммарную массу грунта. При этом, во-первых, суммарную массу грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4, нужно умножить на долю $n_{пп}$ угла поворота в полном обороте окружного ножа № 4. Во-вторых, нужно учитывать лишь часть суммарной массы грунта при движении по нижнему участку траектории ввиду изменения степени воздействия передней поверхности окружного ножа № 4 на грунт в течение оборота ножа. В процессе перемещения ножа по нижней половине траектории масса грунта, на которую воздействует передняя поверхность окружного ножа № 4, увеличивается плавно от нуля до максимума и уменьшается от максимума до нуля. Поэтому допустим, что средняя масса грунта $m_{ср п п о№4}$, на которую воздействует передняя поверхность окружного ножа № 4, составляет половину от суммарной массы грунта. Приведём суммарную массу грунта, воздействующую на переднюю поверхность окружного ножа № 4, к средней его массе с учётом указанных факторов:

$$m_{ср п п о№4} = 0,5 n_{пп} m_{\Sigma о№4}. \quad (36)$$

Ускорение грунта, создаваемое передней поверхностью окружного ножа $a_{п п о№4}$. Условная сила инерции грунта, препятствующая его перемещению передней поверхностью в направлении, перпендикулярном передней поверхности,

$$F_{j п п о№4} = a_{п п о№4} m_{ср п п о№4}. \quad (37)$$

Затраты энергии на перемещение грунта передними поверхностями трёх окружных ножей № 4 в направлении, перпендикулярном каждой передней поверхности, при условно строгом их горизонтальном перемещении, рассчитаем, как увеличение потенциальной энергии грунта:

$$u_{п п о№4} = 3 m_{ср п п о№4} g h_{пп}. \quad (38)$$

Затраты энергии на преодоление трения грунта о передние поверхности окружных ножей № 4 и общие затраты энергии

Затратами энергии на преодоление силы трения грунта о задние поверхности окружных ножей пренебрегаем. Чтобы определить условную нормальную реакцию передней поверхности окружного ножа № 4, нужно сложить условные силы, действующие на переднюю поверхность. Кроме условной силы тяжести грунта остальные условные силы определены. Если бы грунт, поступающий от малого ротора, производил статическое воздействие на переднюю поверхность окружного ножа № 4, для расчёта условной силы тяжести грунта следовало бы взять среднюю массу грунта, воздействующую на переднюю поверхность окружного ножа $m_{ср п п о№4}$. Однако грунт, поступающий от малого ротора, производит периодическое и аperiodическое динамическое воздействие, падая на передние поверхности окружных ножей № 4. Степень влияния динамического воздействия падающего грунта учесть сложно, поэтому для расчёта условной силы тяжести грунта примем суммарную массу грунта $m_{\Sigma о№4}$. Тогда **условная** сила тяжести грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4 большого ротора и поступающего от малого ротора,

$$G_{\Sigma гр №4} = g m_{\Sigma о№4}. \quad (39)$$

На рисунке 3, з сложим в принятом масштабе: условную силу тяжести грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4, условную силу воздействия поступающего грунта $F_{э-о№4}$ и условную силу инерции грунта, препятствующую его перемещению передней поверхностью окружного ножа № 4 в направлении, перпендикулярном передней поверхности $F_{j п п о№4}$, приведя их к точке В и спроецировав на направление, перпендикулярное передней поверхности окружного ножа № 4. Определим суммарную **условную** силу и противоположно ей направленную **условную** нормальную реакцию передней поверхности данного ножа.

Приведенную нормальную реакцию передней поверхности окружного ножа № 4 к длине передней поверхности окружного ножа № 4 определим из пропорции:

$$N_{ппо№4} = N_{\Sigma ппо№4} \frac{S_{ппо№4}}{l_{що№4}}. \quad (40)$$

Сила трения грунта о переднюю поверхность окружного ножа № 4:

$$F_{мппо№4} = f_{с-г} N_{ппо№4}. \quad (41)$$

Средний путь грунта по передней поверхности окружного ножа № 4 до момента его перемещения на окружную лопасть № 4 равен длине щели отрыва пласта от массива грунта при разработке грунта объемом один кубический метр $l_{щ, №4}$. Энергия на преодоление трения грунта о переднюю поверхность трёх окружных ножей № 4:

$$u_{мппо№4} = 3F_{мппо№4} l_{щ, №4}. \quad (42)$$

Энергия, необходимая для резания окружными ножами № 4, при разработке прямоточным роторным рыхлителем одного кубического метра грунта,

$$u_{о№4} = u_{омпо№4} + u_{рпо№4} + u_{щ, №4} + u_{деф, №4} + u_{ткр, №4} + u_{г-о№4} + u_{ппо№4} + u_{мппо№4}. \quad (43)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Масса грунта, поступающая с малого ротора, $m_{мр} = 13,3$ кг/с [22]. Если принять объёмную массу грунта, разрыхлённого малым ротором, $\rho_p = 1000$ кг/м³, объём грунта, поступающий с малого ротора (1),

$$V_{мр} = \frac{13,3}{1000} = 0,0133 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Время $\tau_{1, мр} = 0,486$ с. Объём грунта, поступающего с малого ротора, во внутреннее пространство между окружными ножами № 4, без учёта объёма, занимаемого окружными лопастями, за один оборот малого ротора (2):

$$V_{мр-№4} = 0,0133 \cdot 0,486 = 0,00646 \text{ м}^3/\text{об}.$$

Длины проекций лезвий торцевых ножей и лезвий окружных ножей на продольно-радиальную плоскость $l_{пр} = 0,1$ м [3]. Расстояние от оси вращения большого ротора до слоя грунта, срезаемого окружными ножами № 4, $r_{гз} = 0,180$ м. Наружный диаметр вала большого ротора из конструктивной компоновки 105 мм,

то есть его радиус $r_{гбп} = 52,5$ мм = 0,0525 м. Объём внутреннего пространства между окружными ножами № 4, без учёта объёма, занимаемого окружными лопастями (3),

$$V_{о№4} = 0,1 \cdot 3,14(0,18^2 - 0,0525^2) = 0,0093 \text{ м}^3.$$

Следовательно, с учётом объёма, занимаемого окружными лопастями, и разрыхления грунта, объём грунта, отрезаемого окружными ножами № 4 и малым ротором, при работе прямоточного роторного рыхлителя сопоставим с объёмом внутреннего пространства, поэтому внутреннее пространство между окружными ножами № 4 заполнено грунтом. Этот грунт затрудняет резание. Поэтому примем допущение: окружные ножи № 4 осуществляют полужатое резание вне зависимости от их положения в пространстве.

Затраты энергии на отделение пласта от массива грунта

Перемещение агрегата $s = 1,274$ м [3], подача на нож $s_{нб} = 0,035$ м. Окружные и торцевые ножи установлены в три ряда. Следовательно, количество оборотов большого ротора (4),

$$n_{бр} = \frac{1,274}{3 \cdot 0,035} \approx 12,13 \text{ об/м}^3.$$

Среднее расстояние от оси вращения большого ротора до окружного ножа № 4

$$r_{№4} = 0,213 \text{ м}.$$

Косинус угла наклона спирали, по которой движется точка на лезвии окружного ножа № 4 к плоскости, перпендикулярной оси вращения большого ротора:

$$\sin \delta = \frac{3s_{нб}}{2\pi r_{№4}} = \frac{3 \cdot 0,035}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,213} = 0,0785;$$

$$\cos \delta = \sqrt{1 - \sin^2 \delta} = 0,997.$$

Длина щели отрыва грунта от массива (5):

$$l_{щ, №4} = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,213 \cdot 12,13 / 0,997 = 16,28 \text{ м/м}^3.$$

Площадь отрыва, то есть щели в массиве грунта от воздействия лезвия окружного ножа № 4 (6),

$$S_{омпо№4} = 0,035 \cdot 16,28 = 0,57 \text{ м}^2/\text{м}^3 = 570000 \text{ мм}^2/\text{м}^3.$$

Условная сила, преодолеваемая воздействием кромки лезвия ножа, необходимая для

преодоления сцепления грунта при отрыве пласта от массива (7),

$$F_{отр\ o\ №\ 4} = 0,04 \cdot 570000 = 22800 \text{ Н/м}^3.$$

Примем $h_{отр}=1$ мм. Энергия на создание щелей в массиве тремя окружными ножами № 4 (8):

$$u_{отр\ o\ №\ 4} = 3 \cdot 22800 \cdot 0,001 \approx 68 \text{ Дж/м}^3.$$

Затраты энергии на разделение пласта на фрагменты

Площадь поверхности отделения одного фрагмента от другого (9):

$$S_{р\ л\ o\ №\ 4} = 1,5 \cdot 35 \cdot 35 = 1838 \text{ мм}^2.$$

На расстоянии $l_{щ\ №\ 4}=16,28$ м произойдёт разделений пласта грунта на фрагменты (10):

$$n_{пл\ №\ 4} = \frac{16,28}{0,018} \approx 904.$$

Суммарная площадь разрывов пласта грунта (11):

$$S_{\Sigma\ р\ л\ o\ №\ 4} = 1838 \cdot 904 = 1657936 \text{ мм}^2/\text{м}^3.$$

Условная сила воздействия кромки лезвия окружного ножа № 4, необходимая для разделения пласта грунта на фрагменты (12), $F_{р\ л\ o\ №\ 4}=0,04 \cdot 1657936=66317 \text{ Н/м}^3$.

Примем $h_{отр}=1$ мм. Энергия на разделение пласта на фрагменты тремя окружными ножами № 4 (13):

$$u_{р\ л\ o\ №\ 4} = 3 \cdot 66317 \cdot 0,001 = 199 \text{ Дж/м}^3.$$

Составим пространственную схему условных сил, действующих на кромку лезвия окружного ножа № 4 в этой точке (см. рисунок 2). Сумма **условных** сил $F_{отр\ o\ №\ 4}+F_{р\ л\ o\ №\ 4}=22800+66317=79117 \text{ Н/м}^3$ (красный вектор). Из пространственной схемы сил выявим составляющие.

Условная радиальная составляющая одного ножа (сиреневый вектор) $F_{рад\ o\ №\ 4}=68990 \text{ Н/м}^3$, соотношение условной радиальной составляющей и суммы условных сил $F_{отр}+F_{р\ л} - 0,884$. **Условная** продольная составляющая (жёлтый вектор) $F_{прод\ o\ №\ 4}=18157 \text{ Н/м}^3$, соотношение условной продольной составляющей и суммы условных сил $F_{отр}+F_{р\ л} - 0,23267$. **Условная** окружная составляющая (зелёный вектор) $F_{окр\ o\ №\ 4}=31630 \text{ Н/м}^3$, соотношение условной

окружной составляющей и суммы условных сил $F_{отр}+F_{р\ л} - 0,40532$.

Энергия на создание щели в массиве грунта

Для расчёта ширину щели разрыва грунта в массиве примем равной расстоянию микроотрыва: $b_{щ}=l_{отр}=18$ мм. Длина щели отрыва грунта от массива $l_{щ\ №\ 4}=16,28 \text{ м/м}^3$. Площадь щели в массиве грунта от воздействия лезвия окружного ножа № 4 (14):

$$S_{щ\ o\ №\ 4} = 0,018 \cdot 16,28 = 0,293 \text{ м}^2/\text{м}^3 = 293000 \text{ мм}^2/\text{м}^3.$$

Условная сила воздействия кромки лезвия одного окружного ножа № 4, необходимая для преодоления сцепления грунта, (15):

$$F_{щ\ №\ 4} = 0,04 \cdot 293000 = 11720 \text{ Н/м}^3.$$

Примем $h_{разр}=1$ мм. Энергия на создание щелей в массиве тремя окружными ножами № 4 (16):

$$u_{щ\ №\ 4} = 3 \cdot 11720 \cdot 0,001 = 35 \text{ Дж/м}^3.$$

Затраты энергии на деформацию части массива грунта

Допустим, длина линии CD (см. рисунок 3, б) равна подаче на нож $s_{н\ б}=0,035$ м. Длина одной щели при отделении пласта от массива в период разработки 1 м³ грунта $l_{щ}=16,28 \text{ м/м}^3$. Площадь сдвига грунта (17):

$$S_{сд\ o\ №\ 4\ общ} = 0,035 \cdot 16,28 = 0,57 \text{ м}^2/\text{м}^3 = 570000 \text{ мм}^2/\text{м}^3.$$

Условная сила воздействия кромки лезвия окружного ножа № 4, приводящая к деформации части массива грунта (18):

$$F_{деф\ o\ №\ 4} = 0,12 \cdot 570000 = 68400 \text{ Н/м}^3.$$

Примем величину перемещения грунта при деформации части массива равной толщине окружного ножа со щёками, (см. рисунок 3, а) $S_{см\ o\ №\ 4}=20$ мм. Энергия на деформирование части массива тремя окружными ножами № 4 (19):

$$u_{деф\ o\ №\ 4} = 3 \cdot 68400 \cdot 0,02 = 4104 \text{ Дж/м}^3.$$

Затраты энергии для преодоления трения грунта о кромки лезвий

На рисунке 3, в сложим: **условную** окружную составляющую $F_{окр\ №\ 4}=31630 \text{ Н/м}^3$, **условную** радиальную составляющую

$F_{\text{рад № 4}}=68990 \text{ Н/м}^3$, **условную** силу воздействия передней кромки лезвия, направленную на создание щели в массиве грунта $F_{\text{щ № 4}}=11720 \text{ Н/м}^3$, **условную** силу, направленную на сдвиг грунта $F_{\text{деф № 4}}=68400 \text{ Н/м}^3$, приведя их к точке А лезвия окружного ножа № 4 и спроецировав на направление, перпендикулярное передней поверхности окружного ножа № 4. Из рисунка условная нормальная реакция кромки лезвия окружного ножа № 4 $N_{\Sigma \text{кр о № 4}}=156000 \text{ Н/м}^3$. Приведенную нормальную реакцию кромки лезвия окружного ножа № 4 к расстоянию $l_{\text{отр}}=0,018 \text{ м}$ определим из пропорции (20): $N_{\text{кр о № 4}} = 156000 \frac{0,018}{16,28} = 172,5 \text{ Н}$. Сила трения грунта о кромку окружного ножа № 4 (21):

$$F_{\text{т кр о № 4}} = 0,5 \cdot 172,5 = 86,25 \text{ Н.}$$

Путь грунта по окружному ножу № 4 равен длине щели отрыва пласта от массива грунта $l_{\text{щ № 4}}=16,28 \text{ м}$. Энергия на преодоление трения грунта о кромки лезвий трёх окружных ножей № 4 (22):

$$u_{\text{т кр о № 4}} = 3 \cdot 86,25 \cdot 16,28 = 4212 \text{ Дж/м}^3.$$

Затраты энергии на преодоление напора грунта на передние поверхности окружных ножей № 4

Средняя окружная скорость грунта, поступающего на окружной нож № 4 большого ротора, $v_{\text{окр № 4}}=1,07 \text{ м/с}$. Подача на нож $s_{\text{нб}}=0,035 \text{ м}$. Объем грунта, воздействующего на окружной нож № 4 в секунду, без учёта грунта, поступающего с малого ротора (23),

$$\frac{V_{\text{э о № 4}}}{\tau_{\text{з э № 4}}} = 0,035 \cdot 0,035 \cdot 1,07 \approx 0,00131 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Масса грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4 большого ротора в секунду (24),

$$m_{\text{о № 4}} = 1600 \cdot 0,00131 \approx 2,1 \text{ кг/с.}$$

Общий объем грунта, воздействующего на окружной нож № 4 (25),

$$V_{\text{э-о № 4-1}} = 0,035 \cdot 0,035 \cdot 16,28 = 0,019943 \text{ м}^3.$$

Уточним расчёт. Перемещение агрегата для разработки грунта объемом один кубический метр, $s=1,274 \text{ м}$ [23]. Среднее расстояние от оси вращения большого ротора до лезвия окружного ножа № 4 $r_{\text{№ 4}}=0,213 \text{ м}$. Наружный радиус диска малого ротора $r_{\text{э.з}}=0,18 \text{ м}$. Отсюда общий объем грунта, воздействующего на окружные ножи № 4, (26):

$$V_{\text{э-о № 4}} = 3,14(0,213^2 - 0,18^2)1,274 \approx \approx 0,0516 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Уточнённый объем грунта, воздействующего на один окружной нож № 4 (27),

$$V_{\text{э-о № 4-1}} = 0,0516/3 = 0,0172 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Масса грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4 большого ротора (28),

$$m_{\text{общ о № 4}} = 1600 \cdot 0,0172 \approx 27,5 \text{ кг/м}^3.$$

Время замедления фрагмента грунта (29):

$$\tau_{\text{э-о № 4}} = \frac{0,018}{1,07} \approx 0,0168 \text{ с.}$$

Примем конечную скорость грунта после его замедления $v_{\text{кон о № 4}}=0$. Замедление грунта (30):

$$\tau_{\text{э-о № 4}} = \frac{0,018}{1,07} \approx 0,0168 \text{ с.}$$

Условная сила воздействия поступающего грунта на один окружной нож № 4 (31):

$$F_{\text{Г-о № 4}} = 63,7 \cdot 27,5 = 1752 \text{ Н/м}^3.$$

Энергия на преодоление напора грунта на переднюю поверхность трёх окружных ножей № 4 (32):

$$u_{\text{Г-о № 4}} = 3 \cdot 1752 \cdot 0,018 = 95 \text{ Дж/м}^3.$$

Энергия, необходимая для преодоления напора грунта на переднюю поверхность окружных ножей № 4 большого ротора, относительно невелика в связи с малой угловой скоростью большого ротора.

Затраты энергии на перемещение грунта передними поверхностями

Ускорение грунта, создаваемое передней поверхностью окружного ножа (33),

$$a_{\text{п п о № 4}} = \frac{1,07^2 \cdot 0,02}{0,144^2} = 1,145 \text{ м/с}^2.$$

Масса грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4 большого ротора, $m_{\text{общ о № 4}}=27,5 \text{ кг/м}^3$. $m_{\text{общ о № 4}}=27,5 \text{ кг/м}^3$. Масса грунта, поступающего с малого ротора в секунду, $m_{\text{м.р}}=13,3 \text{ кг/с}$. $m_{\text{м.р}}=13,3 \text{ кг/с}$. Так как разработка одного кубического метра грунта агрегатом происходит за период $\tau_{\text{а}}=15 \text{ с}$, $\tau_{\text{а}}=15 \text{ с}$ [2], то в течение этого времени на один окружной нож № 4 поступит с малого ротора грунт массой (34):

$$m_{\Sigma \text{ м р №4}} = 13,3 \cdot \frac{15}{3} = 66,5 \text{ кг/м}^3.$$

Суммарная масса грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4 большого ротора, и поступающего с малого ротора на один окружной нож № 4 (35):

$$m_{\Sigma \text{ о№4}} = 27,5 + 66,5 = 94 \text{ кг/м}^3.$$

Доля $n_{\text{п п}} = 0,537$. Допустим, что средняя масса грунта $m_{\text{ср п п о№4}}$, на которую воздействует передняя поверхность окружного ножа № 4, составляет половину от суммарной массы грунта. Приведём суммарную массу грунта, воздействующую на переднюю поверхность окружного ножа, к средней его массе (36):

$$m_{\text{ср п п о№4}} = 0,5 \cdot 0,537 \cdot 94 = 25,24 \text{ кг/м}^3.$$

Условная сила инерции грунта, препятствующая его перемещению передней поверхностью окружного ножа № 4 в направлении, перпендикулярном передней поверхности (37),

$$F_{j \text{ п п о№4}} = 1,145 \cdot 25,24 = 29 \text{ Н/м}^3.$$

Если бы окружной нож № 4 перемещался в грунте строго горизонтально, то затраты энергии на перемещение грунта его передней поверхностью можно оценить потенциальной энергией подъёма грунта данной суммарной массой на высоту $h_{\text{п п}} = s_{\text{см о№4}} = 20$ мм (см. рисунок 3, а). Затраты энергии на перемещение грунта передними поверхностями трёх окружных ножей № 4 в направлении, перпендикулярном каждой передней поверхности, при условно строгом их горизонтальном перемещении, рассчитаем как увеличение потенциальной энергии грунта (38):

$$u_{\text{п п о№4}} = 3 \cdot 25,24 \cdot 9,8 \cdot 0,02 \approx 15 \text{ Дж/м}^3.$$

Затраты энергии на преодоление трения грунта о передние поверхности окружных ножей № 4 и общие затраты энергии

Условная сила тяжести грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4 большого ротора и поступающего с малого ротора (39), $G_{\Sigma \text{ гр №4}} = 9,8 \cdot 94 = 921 \text{ Н/м}^3$.

На рисунке 3, г сложим в принятом масштабе: **условную** силу тяжести грунта, разрыхляемого одним окружным ножом № 4, **условную** силу воздействия поступающего грунта $F_{\text{г-о№4}} = 1753 \text{ Н/м}^3$, и условную силу инерции грунта, препятствующую его перемещению

передней поверхностью окружного ножа № 4 в направлении, перпендикулярном передней поверхности $F_{j \text{ п п о№4}} = 29 \text{ Н/м}^3$, приведя их к точке В и спроецировав на направление, перпендикулярное передней поверхности окружного ножа № 4. Определим суммарную **условную** силу и противоположно ей направленную **условную** нормальную реакцию передней поверхности окружного ножа № 4. Из рисунка 3, г $N_{\Sigma \text{ п п о№4}} = 1754 \text{ Н/м}^3$.

Приведенную нормальную реакцию передней поверхности окружного ножа № 4 к длине передней поверхности окружного ножа № 4 определим из пропорции (40):

$$N_{\text{п п о№4}} = 1754 \frac{0,144}{16,28} = 15,5 \text{ Н.}$$

Сила трения грунта о переднюю поверхность окружного ножа № 4 (41):

$$F_{\text{т п п о№4}} = 0,5 \cdot 15,5 = 7,8 \text{ Н.}$$

Средний путь грунта по передней поверхности окружного ножа № 4 до момента его перемещения на окружную лопасть № 4 равен длине щели отрыва пласта от массива грунта $l_{\text{щ №4}} = 16,28$ м. Энергия на преодоление трения грунта о переднюю поверхность трёх окружных ножей № 4 (42):

$$u_{\text{т п п о№4}} = 3 \cdot 7,8 \cdot 16,28 = 381 \text{ Дж/м}^3.$$

Энергия, необходимая для резания окружными ножами №4 (43),

$$u_{\text{о №4}} = 68 + 199 + 35 + 4104 + 4212 + 95 + 15 + 381 \approx 9110 \text{ Дж/м}^3.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Затраты энергии на привод окружного ножа включают энергию: на отделение пласта от массива грунта; разделение пласта на фрагменты; создание щели в массиве грунта; деформацию части массива грунта; преодоление трения грунта о кромку лезвия; преодоление напора грунта на переднюю поверхность; перемещение грунта передней поверхностью; преодоление трения грунта о переднюю поверхность. В результате расчётов энергия, необходимая для резания окружными ножами № 4, при разработке прямоточным роторным рыхлителем одного кубического метра грунта, $u_{\text{о №4}} = 9110 \text{ Дж/м}^3$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Николаев В.А. Определение затрат энергии, необходимой для воздействия поверхности ножа и нижней части отвала бульдозера на грунт в начале прохода // Вестник СибАДИ. 2022; 19(4): 484–499. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-484-499>
2. Николаев В.А. Расчёт скорости прямооточного роторного рыхлителя // Дороги и мосты. Сборник, выпуск 41/1, М., 2019 г. С. 35–39.
3. Николаев В.А. Конструктивная компоновка и режимные параметры большого ротора прямооточного роторного рыхлителя // Вестник СибАДИ. 2022; 19(6): 800–813. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-800-813>
4. Карасёв Г.Н. Определение силы резания грунта с учётом упругих деформаций при разрушении // Строительные и дорожные машины. 2008. № 4. С. 36–42.
5. 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. Баловнев В.И., Нгуен З.Ш. Определение сопротивлений при разработке грунтов рыхлителем по интегральному показателю прочности // Строительные и дорожные машины. 2005. № 3. С. 38–40.
10. Ryabets N., Kurzchner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy // Cold Regions Science and Technology. 2003. Vol. 36. P. 115–128.
11. Liu X., Liu P. Experimental research on the compressive fracture toughness of wing fracture of frozen soil // Cold Regions Science and Technology. 2011. Vol. 65. P. 421–428.
12. Talalay P.G. Subglacial till and Bedrock drilling // Cold Regions Science and Technology. 2013. Vol. 86. P. 142–166.
13. Li Q. Development of Frozen Soil Model // Advances in Earth Science. 2006. №12. P. 96–103.
14. Atkinson J. The Mechanics of Soils and Foundations. CRC. Press. 2007. 448 p.
15. Баловнев В.И., Данилов Р.Г., Улитич О.Ю. Исследование управляемых ножевых систем землеройно-транспортных машин // Строительные и дорожные машины. 2017. № 2. С. 12–15.
16. Нилов В.А., Фёдоров Е.В. Разработка грунта скрепером в условиях свободного резания // Строительные и дорожные машины. 2016. № 2. С. 7–10.

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

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

19. Семкин Д.С. О Влиянии скорости рабочих органов землеройных машин на силу сопротивления грунта резанию // Вестник СибАДИ. 2017; (1(53)): 37–43. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1\(53\)-37-43](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-1(53)-37-43)

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

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

22. Николаев В.А. Конструктивная компоновка малого ротора прямооточного роторного рыхлителя // Вестник СибАДИ. 2023; 20(2): 194–203. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-194-203>. EDN: LQBTMV

23. Николаев В.А. Резание грунта активными рабочими органами. Теория и расчёт. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2023. 560 с.

REFERENCES

1. Nikolayev V.A. Determination of the energy required to expose the surface of the knife and the bottom of the bulldozer blade to the ground at the beginning of the pass. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19(4): 484–499. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-484-499>
2. Nikolaev V.A. Calculation of the speed of a direct-flow rotary ripper. *Dorogi i mosty*. Collection, issue 41/1. Moscow. 2019: 35–39. (In Russ.)
3. Nikolayev V.A. Structural layout and operating parameters for a large rotor of a direct-flow bucket wheel type aggregator. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19(6): 800–813. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-800-813>
4. Karasjov G.N. Definition of the cutting force of soil considering elastic deformation at fracture. Construction and road building machinery. 2008; 4: 36–42. (In Russ)
5. Karnauhov A.I., Orlovskij S. N. Costing of specific energy on the cutting process of forest soils end mills. Construction and road building machinery. 2010; 1: 20–22. (In Russ)
6. Kravec I. M. Determine critical cutting depth when combined cutting soils gidrofrezoj. Construction and road building machinery. 2010; 5: 47–49. (In Russ)
7. Kirillov F.F. Deterministic mathematical model of the temporal distribution of traction for mnogorezcovyh working bodies of earthmoving

machine]. Construction and road building machinery. 2010; 11: 44–48. (In Russ)

8. Berestov E.I. Influence of friction of soil on the surface of the knife cutting resistance. *Construction and road building machinery*. 2010; 11: 34–38. (In Russ)

9. Balovnev V.I., Nguen Z. Sh. Identification of resistances when designing primers Ripper by a combined indicator of strength. *Construction and road building machinery*. 2005; 3: 38–40. (In Russ)

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

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

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

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

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

15. Balovnev V.I., Danilov R. G., Ulitich O. Ju. Study of guided knife systems of ground-moving vehicles. *Construction and road building machinery*. 2017; 2: 12–15. (In Russ.)

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

17. Chmil V.P. Nasosno-accumulative drive of a ripper with an automatic choice of cutting angles. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2016; 11: 18–20. (In Russ.)

18. Kabashev R. A., Turgumbaev S.D. Experimental studies of the process of digging soils by rotary-disk working organs under hydrostatic pressure. *Vestnik SibADI*. 2016; 4: 23–28. (In Russ.)

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

20. Konstantinov Ju.V. Methods of calculating the resistance and the moment of resistance to cutting the soil with a straight blade knife cutters. *Tractors and agricultural machinery*. 2019; 5: 31–39. (In Russ.)

21. Parhomenko G.G., Parhomenko S.G. Force analysis of the mechanisms of tillage machines working elements following a specified path. *Tractors and agricultural machinery*. 2018; 1: 47–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66395>

22. Nikolaev V.A. Constructive layout for small rotor of straight-flow rotary ripper. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(2): 194–203. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-194-203>. EDN: LQBTMV

23. Nikolaev V.A. Cutting soil by active working bodies. Theory and calculation. Yaroslavl: YSTU Publishing House, 2023: 560. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Николаев Владимир Анатольевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский просп., 88.), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-7503-6612>, **SPIN-код:** 8865-0397, e-mail: nikolaev53@inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir A. Nikolayev – Dr. of Sci., Professor of the Construction and Road Machinery Department, Yaroslavl Technical University (Moskovsky Prospekt, 88, Yaroslavl, 150023), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-7503-6612>, **SPIN-код:** 8865-0397, e-mail: nikolaev53@inbox.ru

Научная статья
УДК 69.002.5
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-528-539>
EDN: BBTCMX



ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ГИДРОСТРУЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В.И. Новиков ✉, **О.В. Кузьмин**

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия

✉ ответственный автор
vitalynewage@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Гидроструйные технологии представляют собой инновационный подход к использованию воды под высоким давлением для различных целей. Эта технология нашла широкое применение в различных отраслях, включая строительство, промышленность, сельское хозяйство и очистку поверхностей. Основная идея гидроструйных систем заключается в использовании воды как мощного инструмента для разрушения, очистки и резки различных материалов. Статья посвящена особенностям и основным моментам, присущим процессу разработки передающих устройств высокого давления для гидроструйных технологий.

Материалы и методы. Проанализирована структура и классификация методов, реализующих гидроструйные технологии, включая общую структуру, и рассмотрены составляющие элементы выбранной классификационной схемы. Выделены обобщающие элементы и описана характерная компоновочная схема, реализуемая во всех технологических способах, относящихся к гидроструйным методам, рассмотрены конструктивные элементы, являющиеся основными составными частями и агрегатами, применяемыми в данных технологиях.

Результаты. Разработана схема движения энергетического потока по основным узлам традиционной компоновочной схемы агрегатов для гидроструйных технологий. Оценены формирующиеся в процессе эксплуатации энергетические потери, определен элемент гидроструйной установки с наибольшей величиной потерь, проанализированы особенности его функционирования и эксплуатации. Приводятся методики конструирования с учетом выявленных проблем и особенностей для передающих устройств высокого давления.

Заключение. Наиболее эффективная эксплуатация передающих устройств сверхвысокого давления для гидроструйных технологий возможна только с учетом их теплового состояния, характеризуемого описанием в них теплового баланса, который может быть обеспечен только за счет разработки ряда методик, предлагаемых к применению для проектирования устройств подобного типа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидроструйные технологии, компоновочная схема, насос высокого давления, гидроинструмент, передающее устройство, гидромагистраль, уплотнительный элемент, тепловой баланс, конструирование, производительность, температура

БЛАГОДАРНОСТИ. Статья публикуется по результатам исполнения гранта СПбГАСУ 2024 год.

Статья поступила в редакцию 14.04.2024; одобрена после рецензирования 21.06.2024; принята к публикации 14.08.2024.

Все 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: Новиков В.И., Кузьмин О.В. Особенности проектирования передающих устройств высокого давления для гидроструйных технологий // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 4. С. 528-539. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-528-539>

© Новиков В.И., Кузьмин О.В., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-528-539>
EDN: BBTCMX

DESIGN FEATURES OF HIGH-PRESSURE TRANSMISSION DEVICES FOR HYDRO-JET TECHNOLOGY

Vitalii I. Novikov ✉, Oleg V. Kuzmin
St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint Petersburg, Russia
✉ corresponding author
vitalynewage@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. Hydro-jet technology is an innovative approach to using high pressure water for a variety of purposes. The technology has found a wide application in various industries, including construction, industry, agriculture and surface cleaning. The basic idea of water jetting systems is to use water as a powerful tool to destroy, clean and cut various materials. The paper discusses the constructing of the high-pressure hydro-puller device for hydro-jet technologies.

Materials and methods. An analysis of the methods by hydro-jet technologies classification was made. The general structure and the constituent elements of this scheme is shown. Generalizing elements are identified and a characteristic layout diagram for use in all technological methods of hydro-jet methods is described, and the structural elements that are the main components and units of these technologies are described.

Results. The scheme of energy flow on the main nodes of the traditional layout scheme of units for hydro-jet technologies is developed. The energy losses formed in the process of operation are estimated, the element of the hydrojet plant with the largest losses is determined, the peculiarities of its functioning and operation are analysed. The design methodologies, taking into account the identified problems and features, for high-pressure transmitting devices are given.

Discussion and conclusions. The most efficient operation of ultra-high pressure transmitting devices for hydro-jet technologies is possible only taking into account their thermal state, characterized by a description of their thermal balance, which can only be ensured through the development of a number of techniques proposed for use in the design of such devices.

KEYWORDS: hydro-jet technologies, layout diagram, high-pressure pump, hydraulic tools, hydro-jet device, hydraulic main, sealing, heat balance, design, productivity, temperature.

ACKNOWLEDGEMENTS. The article is published based on the results by the implementation of the St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering grant in 2024.

The article was submitted 14.04.2024; approved after reviewing 21.06.2024; accepted for publication 14.08.2024.

All 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. Novikov V.I., Kuzmin O.V. Design features of a high-pressure transmission devices for hydro-jet technologies. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (4): 528-539. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-528-539>

© Novikov V.I., Kuzmin O.V., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во многих отраслях промышленности: машиностроении, горнодобывающей, горнообработывающей, строительстве и т.д. реализуются технологии гидроструйной обработки материалов с использованием высоконапорного оборудования, принцип действия которых основан на использовании энергии струй рабочей жидкости, подающихся под давлением с различным наполнением (добавками). В качестве обобщающего обозначения для подобных технологий принято использовать понятие «гидроструйные технологии» (ГСТ)^{1,2}. Существующие гидроструйные технологии благодаря проведенным теоретическим и экспериментальным исследованиям имеют в своей основе отработанную методику их практической реализации, что позволяет непрерывно расширять область применения, а также повысить эффективность технологического процесса. Это достигается благодаря научно-техническому прогрессу, а также увеличению числа задач, которые возможно решить с помощью гидроструйных технологий вследствие их особенностей и преимуществ относительно других возможных методов решения рассматриваемой технической проблемы. Главным достоинством является минимально возможное термическое воздействие (а зачастую и отсутствие такового) при контакте с обрабатываемым материалом, что обуславливает отсутствие термических напряжений в горючих или взрывоопасных материалах, параллельно отмечается минимальное количество микрочастиц (или опять же их отсутствие, т.е. технологии отличаются высокой степенью экологичности) при работе технологического гидроструйного оборудования, которое характеризуется простотой и надежностью, а также довольно небольшой массой применяемых оснастки и приспособлений. Очевидно, что каждой отрасли присущи свои конкретные схемы ГСТ, например, для строительной, машиностроения или горнодобывающей отраслей применяют водяную струю в сочетании с добавками – абразивных или цементных частиц, а для воздействия на металлы и сплавы, особенно тугоплавкие, высокопрочные и т.п. или композиционные и керамические материалы возможно применение

ГСТ с криогенными, струями с частицами льда или струями сжиженных газов.

В целом область технологий ГСТ значительно исследована, включая не только отдельные виды, но и многообразные сочетания, что дает возможность определять эффективность использования, таких узлов гидроструйной установки как гидроинструмент, по имеющимся зависимостям^{1,2}. В основе любой ГСТ лежит энергия высоконапорной струи рабочей жидкости, т.е. работа, создаваемая мультипликатором или плунжером, как первичными исполнительными органами технологического оборудования, трансформирующаяся в кинетическую энергию путем прохождения через струеформирующее устройство малого диаметра за счет приложения давления (причем для каждого ГСТ применяется разная величина давления рабочей жидкости). Таким образом, осуществляется сжатие воды (или иного рабочего тела) до 400 МПа с перемещением через сопло $\varnothing 0,10\text{--}0,25$ мм, обеспечивая высокую скорость компактной струи порядка 800–900 м/с с величиной удельной кинетической энергии >100 МДж/кг. Взаимодействие материала с энергией такого порядка приводит к появлению в нем напряжений, которые являются недопустимыми с точки зрения значения уровня прочности, приводя к его разрушению. Достичь такого эффекта можно используя непосредственно работу самих струй либо сочетая с иным воздействием (как правило, механическим), тем самым превращая в зоне обработки кинетическую энергию высокоскоростной струи в механическую работу. Такое свойство ГСТ как универсальность позволяет формировать научно-техническую базу для новых направлений реализации: активация гидротехнологических сред, гидроструйная диагностика изделий, гидроструйная технология получения микро- и наносuspensions и на сегодняшний день более 1500 систем ГСТ применяются в около 30 стран мира [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Целью данного исследования является обеспечение эффективной эксплуатации устройств для гидроструйных технологий за счет оценки формирующихся в процессе работы энергетических потерь и выявления ряда методик конструирования с учетом выявленных проблем и особенностей передающих устройств высокого давления.

¹ Бреннер В.А., Жабин А.Б., Щеголевский М.М. Совершенствование гидроструйных технологий в горном производстве. М.: Горная книга, 2010. 337 с.

² Бреннер В.А., Жабин А.Б., Пушкарев А.Е. Гидроабразивное резание горных пород. М.: МГУ, 2003. 279 с.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматривая всё многообразие схем и сочетаний методов ГСТ, в первую очередь можно выделить ряд обобщающих направлений, объединенных общим функциональным назначением, так укрупненно по цели применения выделяются методы разрушения, очистки и закрепления неустойчивых грунтов. Каждую из приведенных групп можно разбить на подгруппы по способу реализации гидроструйной технологии.

Методы очистки различаются применяемым давлением воды, которой производится непосредственно удаление загрязняющих веществ с разных поверхностей (корпуса судов, фасады зданий, различного рода оборудование и т.д.). Очистка обеспечивается за счет высокой скорости выпускаемой струи, обладающей соответствующим уровнем кинетической энергии.

К основным достоинствам относятся высокая степень очистки, высокая производительность, универсальность в части очищаемых типов материалов, применение в труднодоступных местах, пожаро- и взрывобезопасность, экологичность. По международной классификации, гидроструйная очистка подразделяется на очистку низкого и высокого давления, гидроструйную обработку и ультразвукового давления >200 МПа³.

В результате воздействия струйной цементации (СЦГ) на грунт, что является основным назначением данной технологии, в нем образуются колонны цилиндрической формы диаметром 600–2000 мм [7, 8, 9]. Главным достоинством технологии является возможность работы в ограниченном пространстве с высотой от 2000 мм и шириной от 1500 мм, отсутствие силового влияния на фундаменты близлежащих зданий, проработанность технологического процесса, что позволяет на ранних этапах проектирования рассчитывать прочностные и геометрические характеристики проектируемого сооружения.

Наиболее многочисленной является группа методов ГСТ, используемых как инструмент формообразования материалов, включая и их непосредственное разрушение. В основе методов, объединяемых в группу «разрушения»,

лежит физический процесс эрозии, при котором происходит разрушение, носящее хрупкий характер, т.к. подавляющая часть материалов, подвергаемая такой обработке, является хрупкими, но точно также можно воздействовать и на пластичные материалы, например, различные металлы и сплавы, которые в большинстве своем обладают именно пластическими свойствами. Воздействие струи может быть (аналогично зависит от свойств обрабатываемого материала) как абразивным (в качестве наполнителя применяют, как правило, гранитный песок) и при обработке твердых грунтов именно оно получило широкое распространение, т.к. позволяет воздействовать на материалы практически с любыми прочностными показателями, так и безабразивный режим для разрушения относительно мягких материалов.

Гидромеханический способ разрушения включает в себя комбинированное воздействие, причем здесь гидросоставляющая играет вспомогательную роль, задача которой состоит в минимизации усилий, возникающих в механическом инструменте (резцового или шарошечного) путем обеспечения разупрочнения обрабатываемого материала, отсюда и основная область применения данной технологии – наиболее прочные грунты или горные породы⁴ [8].

Цель применения гидраабразивного фрезирования состоит не в разрушении непосредственно объекта воздействия, а в его формообразовании, за счет удаления (разрушения) лишь необходимого объема материала. Отличие гидроиспультного способа состоит в том, что рабочая жидкость подается не непрерывно, а порционно (соответственно импульсно), в остальном же метод аналогичен вышеописанным.

Суть водоструйного бурения заключается в том, что традиционного механическое бурение и роль инструмента выполняют струи воды высокого давления, подаваемые через струеформирующие элементы, совершающие вращательные движения вокруг своей оси при внедрении штаги по глубине грунтового массива. Основным достоинством данного метода является упрощение конструкции инструмента и отсутствие механического взаимодействия

³ ISO 8501-4: 2006 Подготовка стальной поверхности перед нанесением красок и относящихся к ним аналогичных продуктов. Визуальная оценка чистоты поверхности. Часть 4. Начальное состояние поверхности, качество подготовки и степень ржавости поверхности в результате оплавления в связи с впрыскиванием водяной струи высокого давления.

⁴ Бреннер В.А., Жабин А.Б., Пушкарев А.Е. Гидраабразивное резание горных пород. М.: МГГУ, 2003. 279 с.

бурового инструмента с обрабатываемым материалом, которые позволяют осуществлять работы без возникновения в инструменте больших усилий и крутящего момента, ведущих к значительному износу или в крайнем случае его поломке, тем самым есть возможность получать малоразмерные отверстия значительной глубины.

Все вышеперечисленные традиционные и новые ГСТ воплощаются путем создания конструкций гидроструйных установок и, несмотря на различия в конкретных конструкторских реализациях, все установки для вышеописанных методов могут быть рассмотрены одной типовой конструктивной схемой – компоновочная схема ГСТ. Составными компонентами схемы являются гидроинструмент, предающее устройство, источник высокого давления и гидромагистраль⁵.

Каждое из указанных составляющих обладает своей функциональностью в рамках компоновочной схемы. Установка комплексно состоит из сопла или форсунки, функционально являющихся струеформирующим устройством (рисунок 1, в)⁶ и вместе с элементами, обеспечивающими подачу струй в требуемом направлении представляют собой гидроинструмент, обеспечивающий движение рабочей жидкости (соответствующего состава) в заданных направлениях. Рассматривая конструкции передающего устройства (рисунок 1, а, б), нужно отметить, что одна и та же задача, т.е. функционал подобного устройства – это передача рабочей жидкости от неподвижного элемента во вращающийся⁷, остается неизменным [10], решается несколькими компоновками, применяемыми для различной величины давления рабочей жидкости ≤ 40 МПа и до 500 МПа: вертлюги и гидросъемники соответственно. В качестве источника высокого давления (рисунок 2, а), как правило, выступает изготавливаемый (с учетом постоянных нагрузок) плунжерный насос, оснащенный мультипликатором давления, конструкция которого достаточно унифицированная и позволяет, в зависимости от нужного давления и производительности, ме-

нять сам плунжер и некоторые смежные детали. Рассмотренные конструктивные узлы соединяются гидромагистралями (рисунок 2, б), которыми служат стандартизированные и применяемые в различных отраслях промышленности, рукава/трубопроводы высокого давления, поэтому они доступны для выбора на основании выходных параметров для применения в конкретных агрегатах.

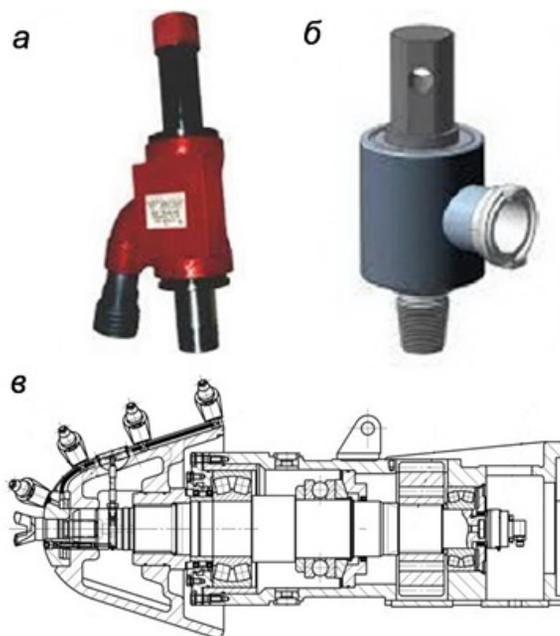


Рисунок 1 – Передающие устройства: а – вертлюг; б – гидросъемник струйной цементации грунтов; в – гидроинструмент для резания горных пород [2]

Figure 1 – Transmitting devices: a – swivel, b – the jet-grouting's hydro-puller device, v – hydraulic tools for cutting rocks [2].

На сегодняшний день последовательность проектирования установок ГСТ (на примере комплекта оборудования для струйной цементации грунтов) будет следующей (рисунок 3).

⁵ Жабин А.Б., Поляков А.В., Щеголевский М.М. Гидроструйные технологии в горном деле: практикум. М.: Горная книга, 2013. 399 с.

⁶ Бреннер В.А., Жабин А.Б., Пушкарев А.Е. Гидроабразивное резание горных пород. М.: МГУ, 2003. 279 с.

⁷ Новиков В.И., Пушкарев А.Е. Возможность применения устройств для струйной цементации для укрепления грунтов в сложных климатических условиях // Техническое обеспечение доступности арктических регионов. Сборник научных трудов III Всероссийского научного семинара, Санкт-Петербург, 27 октября 2022 г. СПбГАСУ. Санкт-Петербург, 2022. С. 121–129.



Рисунок 2 – Источники высокого давления (а) и рукава высокого давления (б) для ГСТ
 Источник: взято из открытых источников.

Figure 2 – High pressure sources (by left) and high pressure hoses (by right) for hydro-jet technologies
 Source: taken from open sources.

На первичном этапе определяются геометрические показатели гидроинструмента, как правило, выявляется диаметр струеформирующего элемента (сопла или форсунки), затем находятся технологические параметры для соответствующей гидроструйной технологии, например, расхода рабочей жидкости, соответствующий уже определенным параметрам оборудования для установки ГСТ, скорости вращения буровой колонны и ее линейного перемещения вдоль оси и с учетом отсутствия/наличия ограничения по наружному диаметру вала передающего устройства либо линейная скорость в области контактных поверхностей уплотнительных элементов с величиной наружного диаметра, либо только расход рабочей жидкости и линейная скорость соответственно. При условии превышения расхода рабочей жидкости, рассчитанного исходя из подобранных технологических параметров и диаметра струеформирующего устройства над той же величиной, но рассчитанной исходя из заданного наружного диаметра вала, происходит завершающий этап, т.е. округление значений до стандартного из ряда и получают входные параметры конструируемой установки или потребуется изменить величину диаметра. Однако в данной последовательно-

сти пренебрегают состоянием передающего устройства, которое определяет функционирование всей схемы.

Анализируя компоновочную схему как цепь передающих энергию конструктивных элементов, следует рассматривать её в рамках преобразования подводимой внешней энергии за счет функционирования основных узлов для транспортировки рабочей жидкости к месту реализации ГСТ и, исходя из того, что на этапе передачи энергии от одной составляющей к другой происходит изменение уровня энергетического потока (рисунок 4).

В конечном итоге вся подводимая энергия реализуется посредством гидроинструмента (см. рисунок 1, в) в кинетической энергии струи рабочей жидкости с конфигурацией, обеспечивающей получение требуемого результата в зависимости от вида ГСТ. Оценка эффективности или производительности данного узла осуществляется по количественному показателю «гидравлическая мощность», и по каждой подгруппе показатель может быть определен по соответствующей расчетной зависимости, поскольку на сегодняшний день тема проектирования гидроинструментов проработана достаточно глубоко^{8,9} [8].

⁸ Бреннер В.А., Жабин А.Б., Щегольский М.М. Совершенствование гидроструйных технологий в горном производстве. М.: Горная книга, 2010. 337 с.

⁹ Бреннер В.А., Жабин А.Б., Пушкарев А.Е. Гидроабразивное резание горных пород. М.: МГУ, 2003. 279 с.

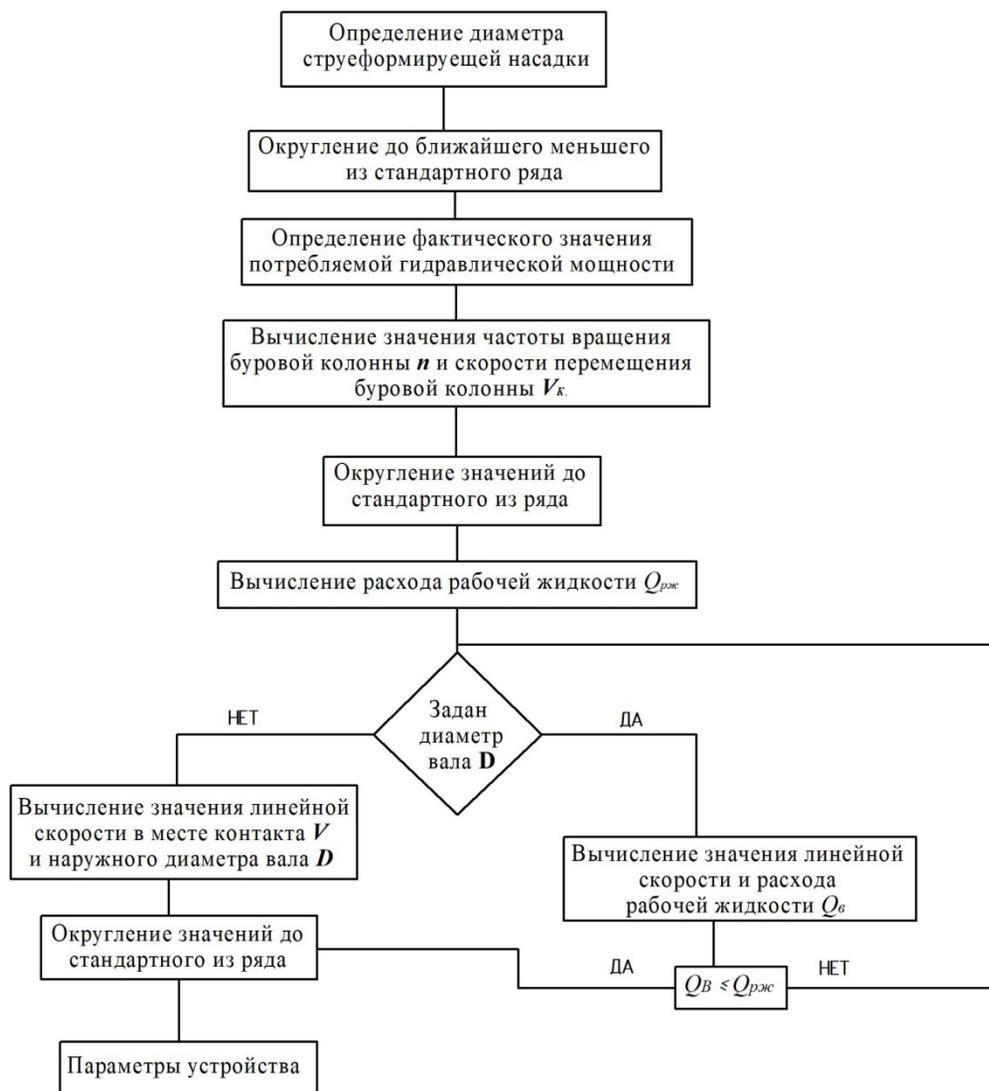


Рисунок 3 – Алгоритм подбора комплекта оборудования при СЦГ
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – The selection algorithm for a jet-grouting equipment set
Source: compiled by the authors.

С другой стороны, в установке ГСТ располагается узел для первичной подачи энергии (источником высокого давления в системе является насос). Соответственно подводимая энергия трансформируется в нем в давление и механическое движение рабочей жидкости. Сегодня промышленность выпускает данные агрегаты в серийном формате и можно произвести оценку потерь по КПД, который в среднем составляет порядка 90–95%, а значит и потери давления рабочей среды составят от 5 до 10%.

Эти две точки, входная и выходная, компоновочной схемы соединяются гидромаги-

стралями – их роль выполняют рукава (трубопроводы) высокого давления. И очевидно здесь также есть гидравлические потери в силу физического перемещения рабочей жидкости. Оценка подобных потерь производится согласно закону Бернулли и уравнению Ньютона по потерям напора по длине и в местных сопротивлениях. Потери в трубопроводе будут определяться не только его основными геометрическими параметрами, но также параметрами рабочей жидкости и шероховатостью поверхностей [11] и определяется по формуле Дарси-Вейсбаха [12]:

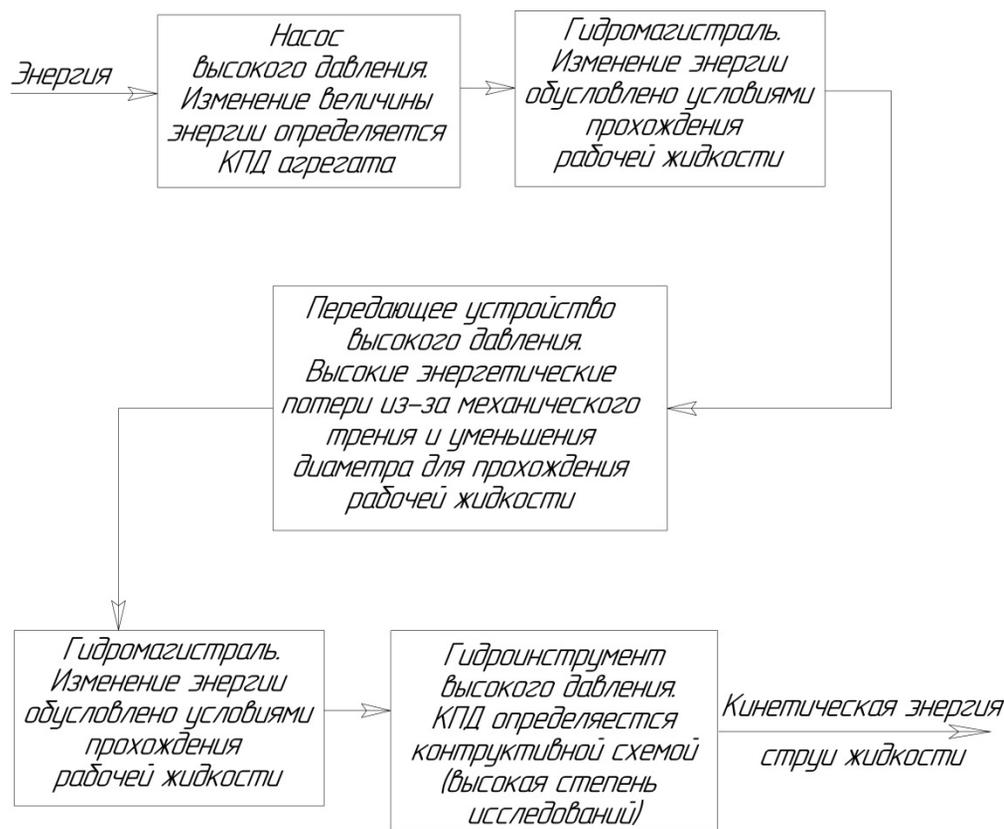


Рисунок 4 – Передача энергии при ГСТ
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Circuit of the power transfer with hydro-jet technologies
Source: compiled by the authors.

$$h = \lambda \frac{lV^2}{d2g},$$

где h – потеря напора, м; λ – коэффициент гидравлического трения; l – длина трубопровода, м; d – внутренний диаметр трубопровода, м; V – скорость потока жидкости, м/с; g – ускорение свободного падения – 9,81 м/с².

Формула является универсальной и применима для обоих видов течения рабочей жидкости с расчетом значения коэффициента гидравлического трения по отдельным зависимостям. Понятие «шероховатость» является комплексным и описывается в основном

двадцатью четырьмя количественными показателями, но для рассматриваемой ситуации определяющим будет то, что называется «абсолютная шероховатость» и рассчитывается через среднеарифметическое отклонение неровностей профиля шероховатости внутренней поверхности трубопровода. Использование в ходе эксплуатации показало, что степень влияния шероховатости определяется диаметром трубопровода и существует возможность пользоваться одним показателем – «относительная шероховатость», представляющим собой отношение эквивалентной шероховатости и внутреннего диаметра (Δ/d)^{10,11}.

¹⁰ ГОСТ 8.586.1–2005 ГСИ Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств: Межгосударственный стандарт: дата введения 2007-01-01 / Государственная система обеспечения единства измерений. Изд. официальное. М.: Стандартинформ, 2007.

¹¹ СП 42-101–2003 Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических и полиэтиленовых труб: Свод правил по проектированию и строительству: дата введения 2003-07-08 / Государственная система обеспечения единства измерений. Изд. официальное. М.: ЗАО «Полимергаз», ГУП ЦПП, 2003.

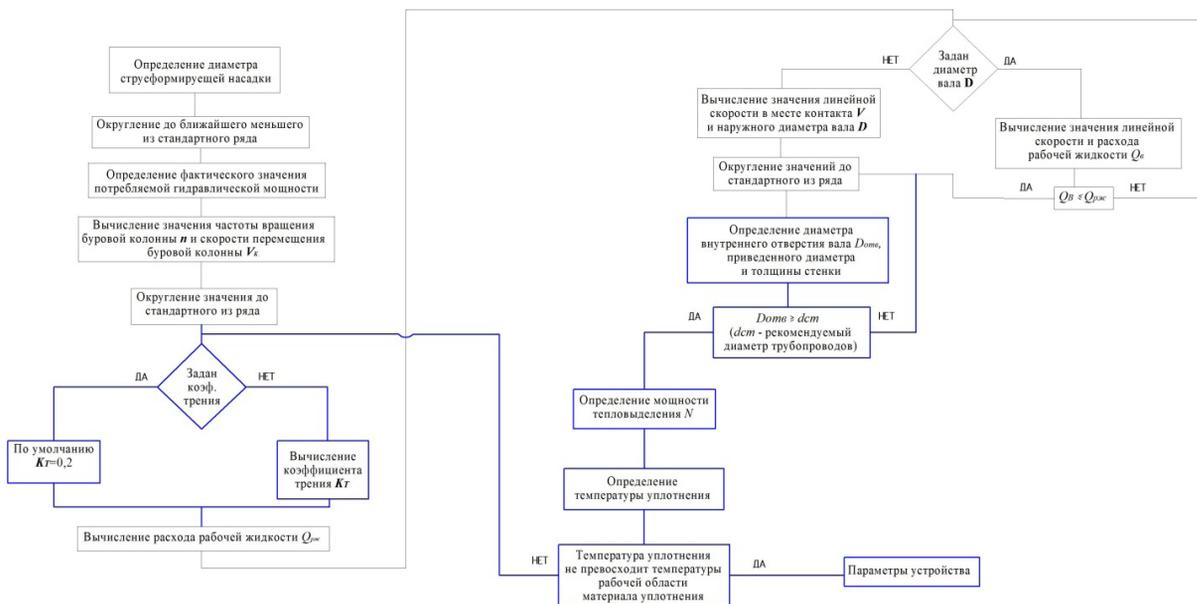


Рисунок 5 – Алгоритм подбора комплекта оборудования при СЦГ с учетом теплового состояния передающего устройства
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – The selection algorithm for a jet-grouting equipment set for the transmitting device's thermal state
Source: compiled by the authors.

Например, λ для ламинарного потока вычисляется по формуле Стокса¹² с использованием числа Рейнольдса (Re).

$$\lambda = 64/Re.$$

При турбулентном течении коэффициент гидравлического трения можно определить по эмпирическим формулам, для чего используют, например, формулу Альтшуля (формулу Блазиуса или формулу Шифринсона):

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}$$

где Re – число Рейнольдса; Δ – эквивалентная шероховатость; d – внутренний диаметр трубопровода, м.

Величина потерь в гидромагистралях зависит от диаметра трубы, средней высоты неровностей на ее внутренней поверхности и числа Рейнольдса, которые учитываются при расчете эквивалентной шероховатости и составляют порядка 3–7%.

Компоновочная схема была бы неполной без устройства (см. рисунок 1, а, б), призванного связать элементы, имеющие различ-

ную кинематику движения, т.е. в то время как источник давления должен быть неподвижен, то гидроинструмент должен двигаться (в большинстве случаев он совершает вращательное движение) и функция передающего устройства состоит в обеспечении передачи рабочей жидкости от неподвижного узла к подвижному. Такая конструкция приводит к тому, что эксплуатация передающих устройств сопровождается значительным тепловыделением в том, где происходит механическое трение. Величина тепловыделения может достигать значительных объемов (в пределах нескольких десятков процентов от подводимой мощности) [13] в местах контакта неподвижных уплотнительных элементов и вращающегося бурового вала, что негативно влияет на ресурс работы как самого устройства, так и гидроструйной установки в целом. Конструкция передающего устройства достаточно проста, но при этом она обуславливает две взаимоисключающие проблемы, напрямую влияющие на тепловое состояние механизма. Первая проблема вытекает из функционального назначения передающего устройства – механического трения, сопровождающегося значительным тепловы-

¹² Сергеев М.Н. Область применения формулы Стокса и Озена // Теория и практика модернизации научной деятельности в условиях цифровизации: сборник статей Международной научно-практической конференции (г. Уфа РФ, 22 июля 2022 г.). Уфа: Omega science, 2022. С. 7–9.

делением. Для снижения потерь на трение в процессе проектирования придерживаются решений, направленных на минимизацию контактных поверхностей трения, т.е. задается минимально возможный наружный диаметр вала и, как следствие этого, получают минимальное по размерам само устройство. Однако такой подход, направленный на уменьшение объема выделяемого тепла, автоматически уменьшает проходное сечение для рабочей жидкости, т.е. минимизирует величину диаметра внутреннего отверстия и возникает другая проблема – падение величины давления (согласно закону Бернулли), вследствие снижения величины сечения потока скорость жидкости возрастает, что отрицательно отражается на гидравлической мощности (причем это без учета потерь на смену направления (на 90°) движения жидкости) – параметре, определяющем эффективность метода ГСТ (см. рисунок 1, б).

Обобщая вышеизложенное, следует сделать вывод о том, что основой, на которую необходимо опираться при разработке подобных конструкций, является тепловой баланс в устройстве, особенно с учетом повышенной чувствительности уплотнительных элементов к температурному воздействию [14] и, следовательно, будут подвергаться наибольшему нагрузкам и износу в процессе работы, а значит, учтены должны быть обе обозначенные проблемы, для чего использовать можно три основные методики конструирования для таких устройств.

Данные методики позволяют учесть особенности работы передающих устройств (рисунок 5) и подбирать наиболее рациональные решения для соответствующего комплекта оборудования уже с учетом теплового баланса в них (передающих устройствах).

Первая методика (принцип изменения температуры) подразумевает влияние на величину выделяемой тепловой энергии за счет изменения уровня теплового потока, проходящего через элементы конструкции устройства. Добиться этого можно управляя геометрией вращающегося вала – уменьшая площадь контакта, за счет уменьшения наружного диаметра вала или увеличивая диаметр внутреннего отверстия для прохождения рабочей жидкости, тем самым улучшая охлаждение нагреваемых элементов. Также, базируясь на основах материаловедения и теплофизики, можно использовать материалы для данных изделий с более высокими коэффициентами теплопроводности [15].

Вторая методика (принцип изменения объема тепловыделения) основан на влиянии не на

следствие, а на причину появления тела в зоне контакта. Реализовать его можно либо регулируя технологические параметры метода ГСТ (давление, скорость вращения гидроинструмента и т.д.), либо создавая морфологию контактных поверхностей, более благоприятную для взаимодействия данных поверхностей, применяя определенный вид обработки [16].

Третья методика предполагает сбалансирование сочетания изменения факторов, влияющих на тепловой баланс, и позволяет разработать параметрический и типоразмерный ряды конструктивного исполнения для выбранного метода ГСТ. В то время как применение первых двух подходов рационально и обосновано в случае присутствия какого-либо ограничения к разрабатываемой конструкции, например, при ограничении геометрии вала или наличии определенных технологических параметров ГСТ.

Таким образом, предлагаемая последовательность принятия решений при конструировании гидроструйных установок включает в себя (см. рисунок 5, выделено синим) вышеописанные методики за счет таких этапов, как влияние коэффициента трения, определение диаметра внутренней полости вала с применением безразмерного приведенного показателя и учетом рекомендуемого проходного диаметра трубопровода для определенного ранее расхода рабочей жидкости и нахождения мощности тепловыделения в зоне контактных поверхностей (в процессе работы передающего устройства) с соответствующей температурой уплотнительных элементов как наименее термостойких составляющих конструктивного узла.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая вышеизложенное, необходимо сделать вывод, для того чтобы обеспечить оптимальное конструктивное исполнение передающего устройства высокого давления наиболее эффективная эксплуатация передающих устройств сверхвысокого давления для гидроструйных технологий возможна только с учетом теплового состояния конструктивного узла, характеризуемого описанием в них теплового баланса, который может быть обеспечен за счет разработки ряда методик, предлагаемых к применению для проектирования устройств подобного типа. Таким образом, организуя процесс проектирования и разработки, обеспечивающих не отдельное решение, а комплекс взаимосвязанных решений при подпоре рациональных параметров всей гидроструйной установки в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Borkowski P. Hydro-jetting method of bas-relief shaping // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2011. V. 11, Issue 2. P. 267. [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60142-3](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60142-3)
2. Papakostas V., Paravantis J.A., Kontoulis N., Cazenave F., Gerbaud L., Velmurugan N. Environmental Impacts of Water-Based Fluids in Geothermal Drilling // *European Geothermal Congress, Berlin, Germany 17–21 October 2022*. <https://www.researchgate.net/publication/364816487>
3. Liu D., Xie W., Gao J., Hu S., Chen M., Li Y., Li L. Study on the Construction Method and Effects of Ipsilateral, Multi-Nozzle, High-Pressure Jet Grouting Cut-Off Wall // *Sustainability*. 2022; 14(16): 10383. <https://doi.org/10.3390/su141610383>
4. Ahmed B., Khoshnaw F. A., Raza M., Elmoineim H., Dar A.A., Shakeel A. New Type of Fluidic Oscillator Made Clean Out Operation Environment Friendly and Cost Effective – A Case Study that Converted Failure into a Success // *International Petroleum Technology Conference*. Riyadh, Saudi Arabia 21–23 February 2022. <https://doi.org/10.2523/IPTC-22265-MS>
5. Shanab I.A., Sorensen A.D. Experimental and Statistical Study of High-Pressure Water Jet «Hydro-Demolition Technique» on Concrete for Partial-Depth Concrete Bridge Deck Repair Applications // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2023. V. 2677, Issue 12, <https://doi.org/10.1177/03611981231168842>
6. Gerbaud L.A. multifold increase in drilling performance using combined hydro-jet and percussion drilling: case study from ORCHYD project // *GeOTHERM*. 2023. V. 2. <https://geotherm-journal.com/index.php/gtj/article/view/77>
7. Pourakbar M., Naziri S., Babaee E. Maleknia A.A. Case Study on Jet Grouting Application for Deep Excavation in Granular Soils // *Geo-Congress*. 2022. P. 386-394 <https://doi.org/10.1061/9780784484029.039>
8. Merlini D., Stocker D., Falanesca M., Schuerch R. The Ceneri Base Tunnel: Construction Experience with the Southern Portion of the Flat Railway Line Crossing the Swiss Alps // *Engineering*. 2018. V.4. P. 235. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.09.004>
9. Veropalumbo R., Russo F., Viscione N., Biancardo S.A. Rheological Properties Comparing Hot and Cold Bituminous Mastics Containing Jet Grouting Waste // *Advances in Materials Science and Engineering*. Volume 2020. Article ID 8078527. 16 p. <https://doi.org/10.1155/2020/8078527>
10. Гарипов М.В., Головин К.А. Разработка конструкции расширителя прокалывающей установки для закрепления неустойчивых горных пород // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2013. № 1. С. 326–329.
11. Карпов Д.Ф., Павлов М.В. Методика определения потерь давления на трение в круглом трубопроводе постоянного сечения // *Природообустройство*. 2023. № 1. С. 69–75. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-1-69-75
12. Ямилев М.З. [и др.] Модифицированные формулы гидравлического расчета нефтепровода для условий изотермического течения степенной жидкости // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2021. Т. 11, № 4. С. 388–395. <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2021-11-4-388-395>
13. Головин К.А., Маликов А.А., Пушкарев А.Е. Тепловой режим работы гидросъемника высокого давления на установках гидроструйной цементации // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2015. № 4. С. 46–52.
14. Новиков В.И., Пушкарев А.Е., Воронцов И.И. Методика моделирования теплового баланса элементов конструкции строительно-дорожных машин для струйной цементации грунтов // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2019. № 3. С. 369–376. <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-03-369-376>
15. Новиков В.И. Влияние теплопроводности материалов контактных поверхностей на тепловой баланс элементов гидросъемника для струйной цементации грунтов // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2023. № 1. С. 71–78. <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2023-09-01-71-78>
16. Новиков В.И. Влияние морфологии контактных поверхностей на распределение температурного поля в устройствах для струйной цементации грунтов // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2022. № 4. С. 54–62. <https://doi.org/10.3103/s1052618822020108>

REFERENCES

1. Borkowski P. Hydro-jetting method of bas-relief shaping. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2011; V. 11, Issue 2: 267. [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60142-3](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60142-3)
2. Papakostas V., Paravantis J.A., Kontoulis N., Cazenave F., Gerbaud L., Velmurugan N. Environmental Impacts of Water-Based Fluids in Geothermal Drilling. *European Geothermal Congress*. Berlin, Germany 17-21 October 2022. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/364816487>
3. Liu D., Xie W., Gao J., Hu S., Chen M., Li Y., Li L. Study on the Construction Method and Effects of Ipsilateral, Multi-Nozzle, High-Pressure Jet Grouting Cut-Off Wall. *Sustainability*. 2022; 14(16): 10383. <https://doi.org/10.3390/su141610383>
4. Ahmed B., Khoshnaw F. A., Raza M., Elmoineim H., Dar A.A., Shakeel A. New Type of Fluidic Oscillator Made Clean Out Operation Environment Friendly and Cost Effective – A Case Study that Converted Failure into a Success. *International Petroleum Technology Conference*. Riyadh, Saudi Arabia 21–23 February 2022. <https://doi.org/10.2523/IPTC-22265-MS>
5. Shanab I.A., Sorensen A.D. Experimental and Statistical Study of High-Pressure Water Jet «Hydro-Demolition Technique» on Concrete for Partial-Depth Concrete Bridge Deck Repair Applications. *Transportation Research Record: Journal of the Trans-*

portation Research Board. 2023; V. 2677, Issue 12. Available at: <https://doi.org/10.1177/03611981231168842>

6. Gerbaud L.A. multifold increase in drilling performance using combined hydro-jet and percussion drilling: case study from ORCHYD project. *Geotherm.* 2023; V. 2. Available at: <https://geotherm-journal.com/index.php/gtj/article/view/77>

7. Pourakbar M., Naziri S., Babae E. Maleknia A.A. Case Study on Jet Grouting Application for Deep Excavation in Granular Soils. *Geo-Congress.* 2022: 386–394. <https://doi.org/10.1061/9780784484029.039>

8. Merlini D., Stocker D., Falanesca M., Schuerch R. The Ceneri Base Tunnel: Construction Experience with the Southern Portion of the Flat Railway Line Crossing the Swiss Alps. *Engineering.* 2018; V.4: 235. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.09.004>

9. Veropalumbo R., Russo F., Viscione N., Biancardo S.A. Rheological Properties Comparing Hot and Cold Bituminous Mastics Containing Jet Grouting Waste. *Advances in Materials Science and Engineering.* 2020; Article ID 8078527: 16. <https://doi.org/10.1155/2020/8078527>

10. Golovin K.A. Development of the design of the extender piercing installation for fixing unstable rocks. *Izvestiya Tula State University* (Izvestiya TulGU). 2013; 1: 326–329. (In Russ.)

11. Karpov D.F., Pavlov M.V. Method of determining the friction pressure loss in a circular pipeline of constant cross-section. *Environmental Engineering.* 2023;(1): 69–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-1-69-75>

12. Yamilev M.Z. Modified formulas for hydraulic calculation of an oil pipeline for conditions of isothermal flow of power-law fluid. *Science & technologies: oil and oil products pipeline transportation scientific and technical journal.* 2021; V. 11. no 4: 388–395. (In Russ.) <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2021-11-4-388-395>

13. Golovin K.A., Malikov A.A., Pushkarev A.E. Thermal mode of operation of high-pressure hydraulic puller at hydro jet grouting installations. *Izvestiya Tula State University* (Izvestiya TulGU). 2015; 4: 46–52. (In Russ.)

14. Novikov V.I., Pushkarev A.E., Vorontsov I.I. The modeling of the heat balance elements of construction jet-grouting machines. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta.* 2019; No3: 369–376. (In Russ.) <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-03-369-376>

15. Novikov V.I. The effect of the thermal conductivity by the materials of contact surfaces on the heat balance of the jet-grouting drill stem hydraulic elements. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta.* 2023; 1: 71–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2023-09-01-71-78>

16. Novikov V.I. The Effect of the Morphology of Contact Surfaces on the Temperature Field Distribution in Devices for Jet-Grouting of Soils. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2022, № 51(4), pp. 329–335. <https://doi.org/10.3103/s1052618822020108>.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Новиков В.И. Постановка цели и задачи исследования; описание проблемы, с которой связано исследование; разработка алгоритма методике проведения исследования; обработка результатов проведения исследования; составление статьи; окончательное утверждение версии для публикации.

Кузьмин О.В. Обработка результатов проведения исследования; анализ и интерпретация данных; концепция и дизайн работы; составление статьи; итоговая переработка статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Novikov V.I. Purpose and objectives of the study statement; the problem with which the study is associated statement; the algorithm of the research methodology development; the results of the study processing; the article layout; final approval of the version for publication;

Kuzmin O.V. The results of the study Processing; data analysis and interpretation; concept and design of the work; the article layout; final revision of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Новиков Виталий Иванович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Судебные экспертизы» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4472-8218>, **Researcher ID:** W-1648-2019, **Scopus Author ID:** 57210646203, **SPIN-код:** 7590-7891, e-mail: vitalynewage@gmail.com

Кузьмин Олег Владимирович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Технологии строительных материалов и метрологии» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9171-9170>, **Researcher ID:** ABA-9562-2021, **Scopus Author ID:** 57741619000, **SPIN-код:** 9238-5680, e-mail: ov-kuzmin@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vitaly I. Novikov – Cand. Sci., Associate Professor, Forensics Department, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2 Krasnoarmeiskaia Street, St Petersburg, 190005), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4472-8218>, **Researcher ID:** W-1648-2019, **Scopus Author ID:** 57210646203, **SPIN-код:** 7590-7891, e-mail: vitalynewage@gmail.com

Oleg V. Kuzmin – Cand. of Sci., Associate Professor, Technology of Building Materials and Metrology Department, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2 Krasnoarmeiskaia Street, St Petersburg, 190005) **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9171-9170>, **Researcher ID:** ABA-9562-2021, **Scopus Author ID:** 57741619000, **SPIN-код:** 9238-5680, e-mail: ov-kuzmin@yandex.ru

Научная статья
УДК 625.76.08
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-540-560>
EDN: UCHWDO



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ОДНОКОВШОВЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

Р.Ф. Салихов ✉, **В.Б. Пермяков**

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

✉ ответственный автор
salikhorinat@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие автомобильно-дорожного строительства является приоритетным направлением в российской экономике. Своевременная сдача в срок объектов строительства повышает требования к планированию проведения механизированных работ. Процесс эксплуатации транспортно-технологических машин в течение продолжительного времени приводит к снижению их потенциальных возможностей, в том числе и эксплуатационной производительности. Целью предлагаемой статьи является совершенствование метода расчета производительности одноковшового гидравлического экскаватора (ЭО) с учетом наработки.

Методы и материалы. Метод расчета производительности учитывает динамику рабочего давления в гидравлической системе рабочего оборудования (ГРО), частоты вращения коленчатого вала (ЧВКВ) от наработки, для описания которых использовались регрессионные зависимости. Также были получены параметры закона распределения случайной величины рабочего давления в ГРО и скорости его падения для операции «разработка и набор грунта».

Результаты. Обработка результатов производственных экспериментов позволила установить зависимости изменения рабочего давления в гидравлической системе в процессе разработки и набора грунта, а также для всех технологических операций рабочего цикла, частоты вращения коленчатого вала двигателя ЭО от наработки. Исследовано влияние рабочего давления в ГРО, ЧВКВ двигателя экскаватора на подачу, гидравлическую мощность, продолжительность выполнения технологических операций. Проведен расчет эксплуатационной производительности ЭО с учётом динамики параметров, отражающих ее изменение с течением наработки.

Обсуждение и заключение. Установлено, что с увеличением наработки рабочее давление в ГРО снижается в среднем на 12,7–13,0%, снижение среднего значения рабочей ЧВКВ составляет 4%. Расчетная величина падения средней часовой эксплуатационной производительности ЭО с учетом ухудшения технического состояния составляет 65% на интервале наработки от 0 до 10 000 мото-часов для модели японского ЭО ZX 330.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: производительность экскаватора, наработка, объемный КПД, гидравлическая мощность, рабочее давление в гидросистеме, частота вращения коленчатого вала

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

Статья поступила в редакцию 05.05.2024; одобрена после рецензирования 22.07.2024; принята к публикации 14.08.2024.

Все 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: Салихов Р.Ф., Пермяков В.Б. Исследование влияния динамики технических параметров на эксплуатационную производительность гидравлических одноковшовых экскаваторов // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 4. С. 540-560. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-540-560>

© Салихов Р.Ф., Пермяков В.Б., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-540-560>

EDN: UCHWDO

STUDY OF THE TECHNICAL PARAMETERS DYNAMICS INFLUENCE ON OPERATIONAL PERFORMANCE OF HYDRAULIC SINGLE-BUCKET EXCAVATORS

Rinat F. Salikhov ✉, Vladislav B. Permiakov

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),

Omsk, Russia

✉ corresponding author

salikhorinat@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The development of automobile and road construction is a priority in the Russian economy. Timely putting construction projects in commission increases the requirements for planning of execution mechanized works. The operation of transport and technological machines in construction processes for a long time leads to a decrease in their potential capabilities, including operational productivity. The purpose of the proposed article is to improve the method of calculating the performance of a single-bucket hydraulic excavator (EO), taking into account the operating time.

Methods and materials. The performance calculation method takes into account the dynamics of the working pressure in the hydraulic system of the working equipment (GRO), the speed of rotation of the crankshaft (PMVC) from the operating time, regression dependencies were used to describe them. The parameters of the law of distribution of the random value of the working pressure in the hydraulic drive and the rate of its fall for the 'development and recruitment of soil' operation were also obtained.

Results. Processing of the results of production experiments enables to establish the dependence of changes in the working pressure in the hydraulic system during development and gathering soil, as well as for all technological operations of the working cycle, the rotational frequency of the crankshaft of a single-bucket excavator engine on the operating time. The influence of the working pressure in the hydraulic drive, the rotational speed of the crankshaft of the excavator engine on the supply and hydraulic power, the duration of technological operations is studied. The calculation of the operational productivity of a single-bucket excavator is carried out taking into account the dynamics of parameters reflecting its change over operating time.

Discussion and conclusions. It has been established that with an increase in operating time, the operating pressure in the hydraulic drive decreases by an average of 12.7-13.0%, and the decrease in the average operating speed of the crankshaft is 4%. The estimated value of the drop in the average hourly operating performance of the EO, taking into account the deterioration of the technical condition, is 55% in the operating time range from 0 to 10,000 operating hours for the Japanese EO ZX 330 model.

KEYWORDS: excavator performance, operating time, volumetric efficiency, hydraulic power, operating pressure in the hydraulic system, crankshaft rotation frequency

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

The article was submitted 05.05.2024; approved after reviewing 27.06.2024; accepted for publication 14.08.2024.

All 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. Salikhov R.F., Permyakov V.B. Study of the technical parameters dynamics influence on operational performance of hydraulic single-bucket excavators. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (4): 540-560. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-540-560>

© Salikhov R.F., Permyakov V.B., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Развитие автомобильно-дорожного строительства является приоритетным направлением в российской экономике. Строительство новых автомобильных дорог не обходится без применения дорожной техники. Своевременная сдача в срок объектов строительства повышает требования к планированию проведения механизированных работ. Строительство и ввод объектов в срок зависит от разных факторов: природно-климатических, организационных, экономических, технических [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26].

Процесс эксплуатации транспортно-технологических машин в строительных процессах в течение продолжительного времени приводит к снижению их потенциальных возможностей, в том числе и эксплуатационной производительности. Строительство объектов – сложный технологический процесс, требующий использования различных средств механизации, таких как одноковшовые экскаваторы, бульдозеры, рыхлители, трубоукладчики и др. При строительстве и ремонте автомобильных дорог основную долю занимают объемы по возведению земляного полотна. Одноковшовые экскаваторы (ЭО) благодаря своей универсальности и высокой производительности при разработке грунтов различных категорий получили наибольшее распространение в производстве земляных работ^{1, 2, 3}. Экскаваторы, как правило, являются ведущими машинами в комплекте с другими видами техники, например, грузовым автотранспортом, поэтому снижение производительности ЭО может значительно сказаться на технологических простоях остальных видов средств механизации. Это может привести к значительным издержкам производства, величине недополученной прибыли. Отсутствие учета снижения величины производительности различных видов строительной техники сказывается на качестве подбора состава комплектов машин. В силу влияния различных факторов величина снижения производительности будет отличаться среди машин комплекта, даже одного вида с течением времени.

В последнее время нашли широкое применение бортовые системы измерения производительности строительных машин, в связи с чем ряд работ направлен на фактическое измерение данного параметра, что позволяет оперативно отслеживать причины ее изменения в процессе эксплуатации [8, 9, 10].

Для повышения точности расчета величины снижения производительности в процессе эксплуатации ЭО необходимо использовать комплексные диагностические параметры, способные оценивать износ совокупности агрегатов. Анализ работ, изучавших изменение технических параметров, в частности, описывающих ухудшение состояния элементов гидропривода, показал отсутствие исследований изменения рабочего давления с течением наработки. Учет изменения объемного коэффициента полезного действия (КПД) элементов гидропривода предполагает измерение данного показателя при номинальном значении. Как показали нижеприведенные исследования, рабочее давление отличается от номинального, а значит, требует корректирования при расчете действительного значения падения объемного КПД.

Также объемный КПД гидравлической системы рабочего оборудования (ГРО) зависит от частоты вращения коленчатого вала (ЧВКВ). Измерение объемного КПД производится при номинальной величине ЧВКВ. Изучение динамики данного параметра позволит учитывать его влияние на подачу в ГРО, а следовательно, и на КПД элементов ГП в течение исследуемого интервала наработки.

Целью предлагаемой статьи является совершенствование метода расчета производительности одноковшового гидравлического экскаватора с учетом наработки. Для достижения поставленной цели необходимо оценить влияние динамики рабочего давления в ГРО, частоты вращения коленчатого вала на интенсивность изменения объемного КПД элементов гидропривода с течением наработки, выдать рекомендации по поддержанию рациональной величины вышеуказанных параметров.

¹ Доценко А.И., Карасев Г.Н., Кустарев Г.В., Шестопалов К.К. Машины для земляных работ: учебник для студентов вузов. М.: «Издательский дом «БАСТЕТ», 2012. 688 с.

² Технологические машины и комплексы в дорожном строительстве (производственная и техническая эксплуатация): учеб. пособие / В.Б. Пермяков, В.И. Иванов, С.В. Мельник [и др.]; под ред. В.Б. Пермякова. М.: ИД «Бастет», 2014. 752 с.

³ Волков Д.П. Строительные машины: учеб. для вузов по спец. ПГС / Д.П. Волков, Н.И. Алешин, В.Я. Крикун, О.Е. Рынсков; под ред. Д.П. Волкова. М.: Высш. шк., 1988. 319 с.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

На этапе проектирования комплектов машин, особенно для долгосрочных проектов, важно учитывать предполагаемую величину падения выработки единичной техники. Это приведет к снижению издержек, связанных с организационными простоями, вызванными несоответствием производительности отдельных видов машин внутри комплекта заданному темпу, ущерба от срыва сроков строительства. В настоящее время существуют методы, направленные на учет падения выработки машин.

Исследование, проведенное проф. В.Г. Самойловичем, было посвящено учету простоев в зоне технического обслуживания и ремонта (ТО и Р), которые возрастают с увеличением срока эксплуатации. В его работе приведена зависимость изменения коэффициента снижения эксплуатационной производительности для некоторых видов строительных машин от срока эксплуатации⁴.

Данный подход учитывает только влияние изменения продолжительности простоев ТО и Р, связанных с обеспечением работоспособности в зависимости от срока эксплуатации техники на годовую производительность.

Второй способ подразумевает изменение производительности от наработки путем учета увеличения продолжительности времени рабочего цикла, связанного с уменьшением скорости выполнения технологических операций из-за ухудшения технического состояния различных видов агрегатов. Например, снижение мощности двигателя внутреннего сгорания (ДВС), КПД гидропривода, затупление режущих элементов^{5, 6, 7, 8, 9} [1, 2, 3, 4, 5].

Способы, учитывающие влияние изменения параметров технического состояния на увеличение продолжительности рабочего цикла в процессе наработки, сосредоточены только на отдельных системах и узлах машины, что не позволяет комплексно оценить общее влияние на изменение продолжительности выполнения технологических операций. Необходим комплексный параметр, рассматривающий совокупное влияние ухудшения технического состояния систем машин на производительность. Также не учитывается продолжительность простоев в зоне ТО и Р.

Третий способ учитывает общие изменения производительности как с учетом простоев, так и снижением скорости выполнения технологических операций¹⁰. Автор предлагает коэффициенты ухудшения технико-экономических показателей за год эксплуатации техники в связи с ее старением: K_n – сокращение производительности из-за износа агрегатов и узлов, $K_n = 0,5 - 2,5\%$; K_ϕ – уменьшение годового фонда рабочего времени по причине отказов и ремонтов, $K_\phi = 2 - 4\%$. Недостатками третьего подхода являются опосредованный учет изменения производительности. Так как экскаватор работает в широком диапазоне нагрузок, то ежегодное изменение производительности может превышать 2–4%, потому что изменение производительности по техническим причинам может носить нелинейный характер, что также приведет к некорректному учету данного параметра.

На скорость разработки и наполнение ковша грунтом влияют его прочность, однородность, сопротивление одноосному сжатию, коэффициент трения грунта по стали, основные физико-механические характеристики

⁴ Российская энциклопедия самоходной техники. Основы эксплуатации и ремонта самоходных машин и механизмов: справ. и учеб. пособие для специалистов отрасли «Самоходные машины и механизмы». Т. 1 / В.А. Зорин, В.А. Синецын, К.К. Шестопапов, А.Н. Новиков, Ю.П. Бакатин, А.В. Рубайлов [и др.]; гл. науч. рук. работы В.А. Зорин; МАДИ. 1-е изд. М.: 2001. 407 с.

⁵ Харазов А.М. Техническая диагностика гидроприводов машин. М.: Машиностроение, 1979. 112 с.

⁶ Харазов А.М. Методы оптимизации в технической диагностике машин: научное издание / А.М. Харазов, С.Ф. Цвид. М.: Машиностроение, 1983. 132 с.

⁷ Техническая диагностика гидравлических приводов / Т.В. Алексеева, В.Д. Бабанская, Т.М. Башта [и др.]; под общей редакцией Т.М. Башты. М.: Машиностроение, 1989. 264 с.

⁸ Гринчар Н.Г. Надежность гидроприводов путевых, строительных и грузоподъемных машин: учеб. пособие для вузов. М.: МИИТ, 2001. 112 с.

⁹ Кабашев Р.А., Кульгильдинов М.С. Исследование процесса копания гидравлическим экскаватором ЭО-3122 с изношенными зубьями // Проблемы совершенствования и моделирования дорожной техники и технологических процессов строительства автомобильных дорог и автотранспорта: тезисы докл. Алма-Ата, 1992. 183 с.

¹⁰ Луцкий С.Я. Корпоративное управление техническим перевооружением фирм: учеб. пособие / С.Я. Луцкий, А.Я. Ландсман; под. ред. А.Г. Поршнева. М.: Высш. шк., 2003. 319 с.

(плотность, относительная влажность, число ударов плотномером ДорНИИ, угол внутреннего трения, сцепление), площадь поперечного сечения, толщина стружки, угол резания, удельная сила липкости^{11,12}. В данной статье особое внимание уделено изменению производительности от наработки путем учета увеличения продолжительности времени рабочего цикла, связанного с уменьшением скорости выполнения технологических операций. Уменьшение скорости выполнения технологических операций связано с ухудшением технического состояния различных видов агрегатов, деталей. Например, снижение мощности ДВС, КПД гидропривода (ГП) рабочего оборудования (РО), затупление режущих элементов [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Исследования, проведенные А.М. Харазовым, посвящены учету снижения объемного КПД элементов гидропривода, которые влияют на производительность гидрофицированных машин¹³.

В работах^{14, 15} степень влияния объемного КПД на производительность машины определяется удельным весом продолжительности полезной работы гидропривода в общем цикле (времени) работы машины. Проведенные исследования позволили определить предельное значение объемного КПД, оптимизировать периодичность замены элементов ГП. Исходя из предложенного метода, можно сделать вывод о том, что общее падение КПД одинаково влияет на продолжительность каждой технологической операции, а именно её увеличение от наработки. Но это не соответствует действительности, потому что при выполнении различных технологических операций участвуют разные гидроагрегаты, которые в разной степени влияют на изменение продолжительности операций и продолжительность цикла в целом. Поэтому падение производительности будет иметь некорректную скорость падения от наработки.

Проведенные исследования позволяют определить оптимальную периодичность тех-

нических воздействий, направленных не только на обеспечение работоспособного технического состояния, но и снижение потерь от падения производительности.

В работе канд. техн. наук В.И. Сидорова говорится о том, что все элементы дорожно-строительной машины можно разделить на две группы: первая из них, которая непосредственно влияет на производительность машины, снижение ее работоспособности и вторая, которая не имеет такого влияния, но отказ которой приводит к полной потере работоспособности, например подшипники качения или скольжения [1]. В данной работе рассматривается влияние на падение производительности и ухудшение технического состояния агрегата – двигателя внутреннего сгорания, элементов ГП. Однако рассматривается обобщенное влияние ухудшения технического состояния транспортно-технологических машин на снижение мощности ДВС, объемного КПД без привязки к конкретным узлам и агрегатам.

В вышеизученных работах при расчете динамики производительности не учитываются фактические значения параметров работы ГРО, которые будут влиять на значение объемного КПД, а именно – рабочее давление, частота вращения коленчатого вала.

Расчет часовой эксплуатационной производительности определяется по известным зависимостям¹⁶ [3, 4, 5, 8, 9, 10, 14]. Для расчета часовой эксплуатационной производительности с учетом снижения надежности узлов и агрегатов ниже представлена следующая формула:

$$П(t) = 60 \frac{q \cdot n_{ц}(t) \cdot K_H}{K_p} K_B, \quad (1)$$

где q – вместимость ковша; $n_{ц}(t)$ – количество циклов за минуту, циклов в минуту; K_H – коэффициент наполнения; K_p – коэффициент разрыхления; $K_B(t)$ – коэффициент использования машины по времени.

¹¹ Федоров Д.И. Рабочие органы землеройных машин. М.: Машиностроение, 1977. 288 с.

¹² Технологические машины и комплексы в дорожном строительстве (производственная и техническая эксплуатация): учеб. пособие / В.Б. Пермяков, В.И. Иванов, С.В. Мельник [и др]; под ред. В.Б. Пермякова. 752 с.

¹³ Харазов А.М. Методы оптимизации в технической диагностике машин: научное издание / А.М. Харазов, С.Ф. Цвид. 132 с.

¹⁴ Харазов А.М. Техническая диагностика гидроприводов машин. 112 с.

¹⁵ Харазов А.М. Методы оптимизации в технической диагностике машин: научное издание. 132 с.

¹⁶ Машины для земляных работ: учебник для студентов, обучающихся по направлению 270100 «Строительство» / А.И. Доценко [и др.]. М.: Бастет, 2012. 687 с.

Количество циклов экскавации за одну минуту (60 с) определяется по формуле

$$n_{ц}(t) = \frac{60}{t_{ц}(t)} = \frac{60}{\sum_{z=1}^Z t_z(t)} = \frac{60}{t_k(t) + t_{про}(t) + t_{пн}(t) + t_p(t) + t_{пнп}(t) + t_{оро}(t)} = \frac{60}{\sum_{z=1}^Z \frac{A_z}{N_z}}, \quad (2)$$

где $t_z(t)$ – функция продолжительности выполнения технологических операций z -го номера от наработки, с; A_z, N_z – величина затрачиваемой работы на выполнение технологической операции z -го номера, мото-час; $t_{ц}(t)$ – продолжительность цикла экскавации, с; $t_k(t)$ – продолжительность копания, с; $t_{про}(t), t_{оро}(t)$ – продолжительности соответственно подъема и опускания рабочего органа в забой, с; $t_{пн}(t)$ – продолжительность поворота платформы, с; $t_p(t)$ – продолжительность разгрузки экскаватора, с; $t_{пнп}(t)$ – продолжительность порожнего поворота платформы в забой, с.

Изначально приведем метод расчета для определения продолжительности разработки и набора грунта в ковш.

Продолжительность разработки и набора грунта в ковш ЭО от наработки определится по формуле

$$t_k(t) = \frac{q \cdot K_H \cdot K_1 \cdot K_{рз} \cdot K_э}{N_k(t) \cdot K_p}, \quad (3)$$

где q – вместимость ковша экскаватора, м³; K_H – коэффициент наполнения ковша грунтом; K_1 – коэффициент удельного сопротивления копания грунта, кН/м²; $K_{рз}$ – коэффициент затупления режущих элементов, $K_{рз} = 0,8^{17}$; $K_э$ – коэффициент энергоемкости, назначаемый для песчаных грунтов 0,80...0,92, 0,87...0,88 для суглинков, 0,82...0,94 для глин¹⁸; $N_k(t)$ – функция мощности от наработки, необходимая для копания, кВт; K_p – коэффициент разрыхления грунта.

Коэффициент удельного сопротивления копания грунта K_1 зависит от разных факторов, скорости копания, физико-механических свойств грунта. Расчет K_1 был получен с использованием следующих параметров: ма-

тематического ожидания среднего рабочего давления в ГРО (таблица 1), ширины ковша – 1,41 м, длины рукояти – 3,2 м, внутреннего диаметра гидроцилиндра рукояти – 0,17 м, толщины срезаемой стружки – 0,25 м. В результате проведения расчетов среднее касательное усилие резания составило 65,8 кН, удельное сопротивление копанию K_1 – 186,7 кН/м², что соответствует II категории грунта (согласно ГОСТ 17343–71).

Для определения мощности, необходимой для разработки и набора грунта, воспользуемся формулой

$$N_k(t) = P_{cp}(t) \cdot Q(t) \cdot k_{вых} \cdot \eta_{гм} \cdot \eta_{об}(t) \cdot \eta_{ш}^m, \quad (4)$$

где $P_{cp}(t)$ – функция среднего давления при разработке и наборе грунта от наработки, Н/м²(Па); $Q(t)$ – подача гидравлической жидкости в гидроприводе ЭО от наработки, м³/с; $k_{вых}$ – коэффициент снижения выходной мощности ДВС вследствие колебания нагрузки $k_{вых} = 0,90$; – КПД, учитывающий гидромеханические потери элементов гидропривода, в расчетах принимался 0,84 [15]; – КПД механизма поворота элемента рабочего органа, учитывающий потери на трение в шарнирах ковша, рукояти, $\eta_{ш} = 0,95$ для одного смазанного шарнира; m – количество шарниров у ковша, рукояти; $\eta_{об}(t)$ – объемный КПД элементов гидропривода.

Подача гидравлической жидкости в гидроприводе ЭО от наработки определяется по формуле

$$Q(t) = V \cdot n(t), \quad (5)$$

где V – рабочий объем двухсекционного гидронасоса (для исследуемой модели гидронасоса $158 \cdot 10^{-3} \dots 302 \cdot 10^{-3}$), м³/об; $n(t)$ – функция ЧВКВ от наработки, об/с.

С учетом вышеприведенных зависимостей формула (2) примет следующий вид:

$$t_k = \frac{q \cdot K_H \cdot K_1 \cdot K_{рз} \cdot K_э}{P_{cp}(t) \cdot V \cdot n(t) \cdot \eta_{об} \cdot k_{вых} \cdot k_{пр} \cdot \eta_{гм} \cdot \eta_{ш}^m \cdot K_p}. \quad (6)$$

Для технологической операции «разработка и набор грунта» рабочего цикла ЭО исследуется следующая совокупность элементов

¹⁷ Кабашев Р.А., Кульгильдинов М.С. Исследование процесса копания гидравлическим экскаватором ЭО-3122 с изношенными зубьями // Проблемы совершенствования и моделирования дорожной техники и технологических процессов строительства автомобильных дорог и автотранспорта: тезисы докл. Алма-Ата, 1992. 183 с.

¹⁸ Крикун В.Я., Манасян В.Г. Расчет основных параметров гидравлических экскаваторов с рабочим оборудованием обратная лопата: учебное пособие. Изд. 1-е. М.: АСВ, 2001. 104 с.

ГРО: гидронасос – гидрораспределитель – гидроцилиндры. Именно для этой совокупности элементов ниже представлена формула расчёта объемного КПД:

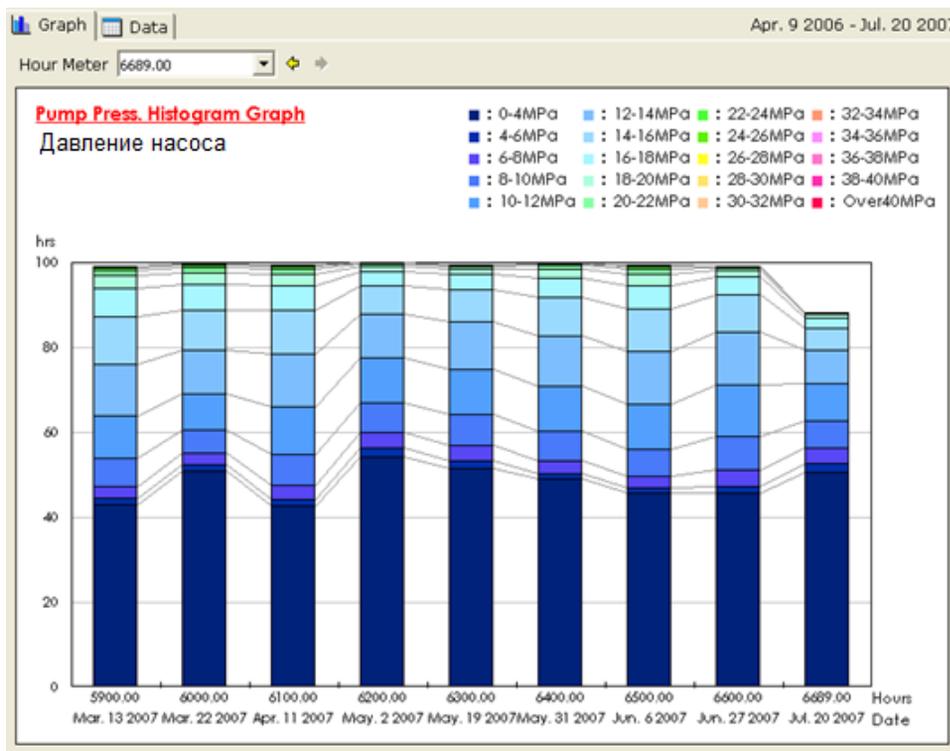
$$\eta_{об}(t) = \eta_{об}^{гн}(t) \cdot \eta_{об}^{р}(t) \cdot \eta_{об}^{гц}(t), \quad (7)$$

где $\eta_{об}(t)$ – функция общего объемного КПД ГРО, при выполнении технологической операции «разработка и набор грунта» от наработки; $\eta_{об}^{гн}(t)$, $\eta_{об}^{р}(t)$, $\eta_{об}^{гц}(t)$ – объемные КПД от наработки соответственно гидронасоса, гидрораспределителя, гидроцилиндров рабочего оборудования.

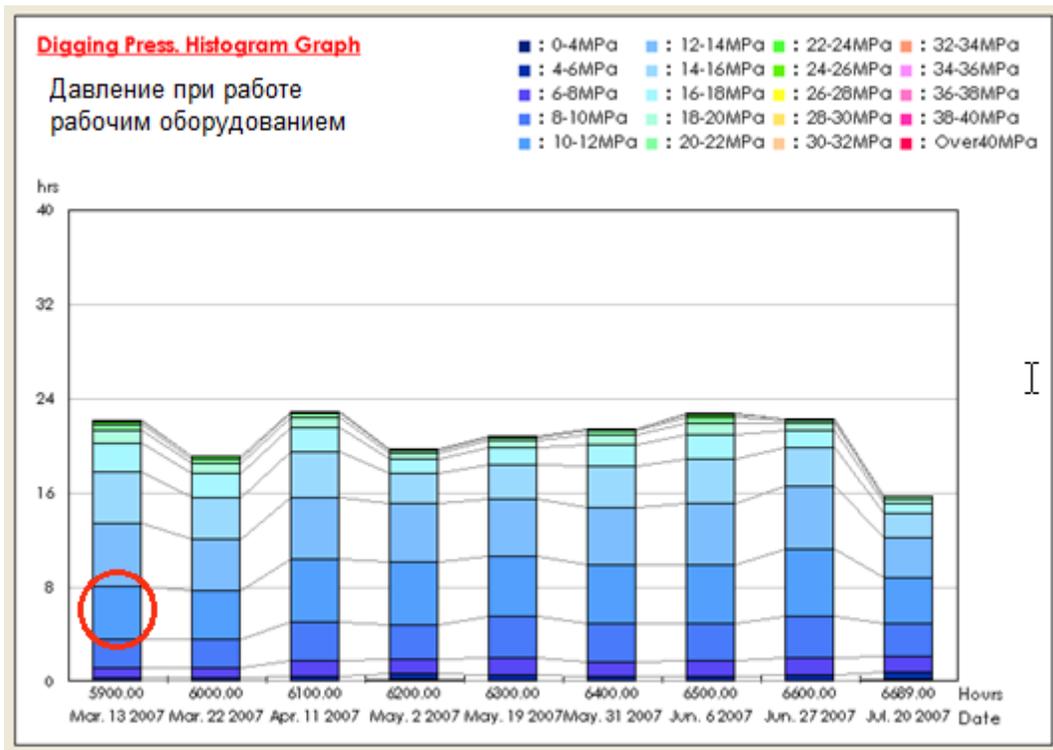
Для получения информации по параметрам рабочего давления в ГРО, ЧВКВ был проведен сбор данных с системы встроенной бортовой диагностики, позволяющей осуществлять мониторинг диагностических параметров ЭО. Считываемая информация может накапли-

ваться на протяжении нескольких тысяч мото-часов. В исследуемом случае информация была накоплена в течение 9 140 мото-часов. Для извлечения результатов измерения параметров применяется фирменный диагностический сканер, представляющий собой считывающее устройство (диагностическую колодку с кабелем), подключаемое к переносному компьютеру с программным обеспечением или программно-диагностическим комплексом MICDataviewer. Программное обеспечение сканера исследуемой модели ЭО позволяет не только выводить параметры в режиме онлайн, но и скачивать их в виде файла для последующей обработки в среде MS Excel, Statistika и других программах.

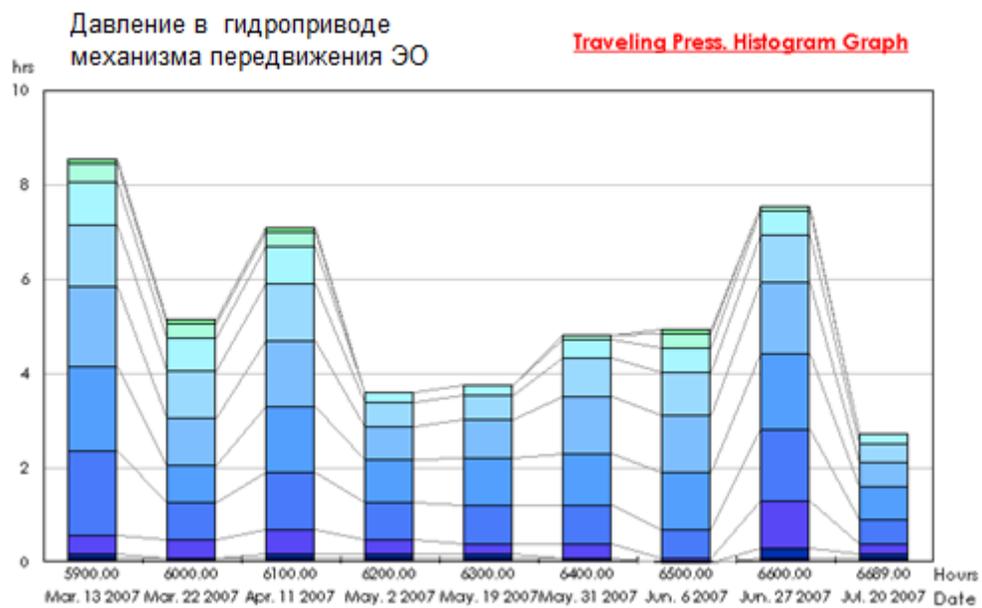
Величины параметров выдаются в виде гистограммы с долевым распределением по времени (рисунок 1, а, б, в).



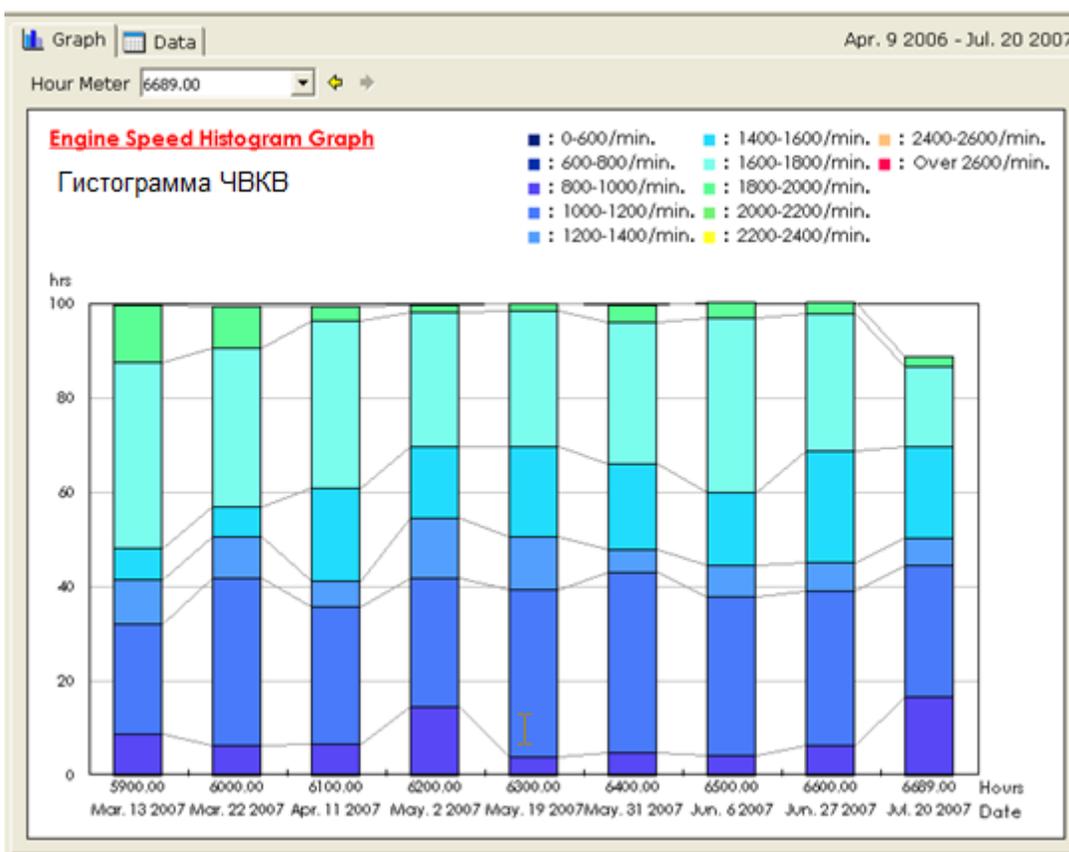
а



6



6



e

Рисунок 1 – Гистограммы давления рабочей жидкости, частоты вращения коленчатого вала, представленные с помощью программного диагностического комплекса экскаватора производства компании Hitachi:
 а – при выполнении всех технологических операций, перемещении и работе на холостом ходу двигателя внутреннего сгорания;
 б – давление при работе стрелы, рукояти;
 в – при работе гидропривода механизма перемещения ЭО;
 г – частота вращения коленчатого вала
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Histograms of the pressure of the working fluid, the speed of rotation of the crankshaft, presented using the diagnostic software package of the Hitachi companies excavator:
 a – when performing all technological operations, moving and operating the internal combustion engine at idle;
 b – pressure during operation of the boom, handle;
 c – when operating the hydraulic drive of the excavator movement mechanism;
 d – the speed of rotation of the crankshaft
 Source: compiled by the authors.

Например, доля времени работы на диапазоне величин давления от 10 до 12 МПа составляет 4,5 мото-часа (обведен окружностью красного цвета) при моменте наработки 5900 мото-часов (см. рисунок 1, б). Результаты измерения параметров в определенных диапазонах распределены через каждые 100 мото-часов. Разработанная программой фирмой Хитачи выводит информацию о давлении в гидросистеме при работе отдельно: рабочего оборудования (стрелы, рукояти), механизма перемещения машины и всех операций в со-

вокупности, включая холостой ход ДВС и ГП машины. Для измерения продолжительности работы в определенных диапазонах давления и при различных технологических операциях система бортового диагностирования имеет встроенные датчики, которые установлены в корпусах гидравлических насосов, а также корпусах основного и системы управления гидрораспределителей (гидравлические контуры механизма передвижения, механизма вращения поворотной части, движения рукояти к стреле, подъема стрелы).

Таблица 1

Продолжительность времени работы рабочего оборудования экскаватора при различных величинах давления за 100 мото-часов работы двигателя внутреннего сгорания

Источник: составлено авторами.

The operating time of the excavator's working equipment at different pressure values for 100 hours of operation of the internal combustion engine

Source: compiled by the authors.

Среднее давление в гидросистеме рабочего оборудования	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
Фактическое время работы в указанном диапазоне давления, мото-часов	0,3	0,8	2,4	4,5	5,3	4,3	2,4	1,1	0,5	0,2

Программа фиксирует продолжительность работы систем машины (рабочего оборудования, механизма поворота платформы, механизма перемещения) и выводит информацию сервисному инженеру на монитор компьютера. Каждый диапазон параметра обозначается цветом от темно-синего до красного, например, темно-синий фон – это диапазон от 0 до 4 МПа, желтый – от 26 до 28 МПа и т. д. (см. рисунок 1, а, б, в).

Помимо продолжительности давления была считана и обработана информация по параметру ЧВКВ. Диапазон ЧВКВ также установлен с фиксированным шагом 200 об/мин, например, 600–800 об/мин, 800–1000 об/мин, ..., 2000–2200 об/мин. Было принято допущение о том, что данный параметр будет исследоваться с диапазона величин 1000–1200 об/мин с учетом того, что остальное время ЭО работает на холостом ходу (рисунок 1, г). Как показали исследования ЭО модели ZX 330, средний коэффициент потерь времени на холостой ход от общей продолжительности работы ДВС составляет $K_{xx} = 0,28$, т.е. продолжительность времени работы ЭО на ЧВКВ до 1200 об/мин прямо пропорционально разделялась между полезной работой и работой на холостом ходу ДВС (см. рисунок 1, е).

Первоначально исследования были проведены по давлению в ГРО (движение рукояти к стреле, подъем стрелы). В программе приводится обобщенная информация о продолжительности работы в определенном диапазоне давления элементами рабочего оборудования, стрелы (при подъеме) и рукояти (при движении к стреле). Среднее значение диапазона, например, для диапазона 6–8 МПа принималось 7 МПа. Давление до 6 МПа не принималось в учет, т.к. видно из диаграмм,

что оно составляет в среднем 3% при перемещении и выполнении рабочих операций. Средние значения параметров были получены по формуле

$$P_{\text{ф ср}} = \sum_{d=1}^D \frac{P_{\text{ср}}^d}{T_{\text{изм}}} \cdot t_d, \quad (8)$$

где $P_{\text{ф ср}}$ – фактическое среднее значение параметра, ед. изм.; $P_{\text{ср}}^d$ – среднее значение исследуемого диапазона, ед. изм.; t_d – продолжительность работы в исследуемом диапазоне, ч; $T_{\text{изм}}$ – наработка исследуемого оборудования или механизма, за 100 мото-часов (см. рисунок 1).

Приведем пример расчета среднего фактического давления гидравлической жидкости при работе рабочего оборудования для интервала наработки 5800–5900 мото-часов ЭО модели ZX 330, $T_{\text{изм}} = 21,8$ мото-часа за 100 мото-часов работы ДВС (см. рисунок 1, б, таблицу 1).

Подставляя данные в формулу (1), получим $P_{\text{ф ср}} = 15,23$ МПа. Таким образом, было обработано 1329 значений на интервале наработки от 0 до 9140 мото-часов. По такой же методике были получены средние фактические значения для параметра ЧВКВ.

Техника эксплуатировалась на строительных площадках Московской и Омской областей. Полученные данные были обработаны по девятнадцати единицам одноковшовых гидравлических экскаваторов моделей ZX 330 производства фирмы «Хитачи» (Япония), мощностью ДВС 185–202 кВт, массой 31 т, вместимостью ковша 1,4 м³. Встроенной бортовой системой помимо вышеперечисленных параметров контролируется температура охлаждающей и гидравлической жидкости.

Таблица 2
Статистические характеристики рабочего давления в ГРО
для операции ЭО «разработка и набор грунта»
Источник: составлено авторами.

Table 2
Statistical characteristics of the working pressure in GRO
for the 'digging ground' EO operation
Source: compiled by the authors.

Статистические характеристики	Наименование параметра	
	Рабочее давление в ГРО, МПа	Скорость падения давления в ГРО для операции «разработка и набор грунта», МПа/мото-ч
Математическое ожидание	14,98	$3,17 \cdot 10^{-4}$
Среднеквадратическое отклонение	1,73	$2,2 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент вариации	0,12	0,69

Эксплуатация ЭО проводилась в умеренной климатической зоне, круглогодично, при разработке II и III категорий грунтов, коэффициент использования номинального давления в среднем составил 0,53 (средний режим работы гидропривода) [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Авторами уделено внимание параметрам – рабочее давление в ГРО, ЧВКВ в процессе выполнения технологических операций, т.к. изменение этих параметров напрямую влияет на продолжительность выполнения технологических операций, в том числе и на разработку с набором грунта в ковш – одной из самых энергоемких операций цикла экскавации [14, 25, 27].

По результатам обработки данных, по каждой из машин с применением программы Statistika 6.0 были получены графическая, аналитическая регрессионные зависимости, определены величины падения давления в ГРО на исследуемом интервале наработки, а также характеристики случайных величин нормального закона распределения, скорости падения данного параметра (таблица 2, рисунок 2). Для более детального изучения поставленного вопроса были построены гистограмма эмпирических частот давления в ГРО, теоретическая кривая, соответствующая

нормальному закону распределения (рисунок 3).

Учитывая коэффициент вариации рабочего давления в процессе копания грунт наиболее близок к суглинкам, глине¹⁹.

$$P_{cp}(t) = -0,0002 \cdot t + 15,702, \quad (9)$$

где P_{cp} – средняя величина рабочего давления при разработке и наборе грунта, МПа, t – наработка, мото-ч.

По результатам анализа наблюдается снижение исследуемого параметра в среднем на 12,7% на интервале наработки от 0 до 10 000 мото-часов. Максимальная величина падения давления отдельно взятой единицы ЭО составляет 4,63 МПа, минимальная – 0,4 МПа на исследуемых интервалах наработки.

Технология измерения объемного КПД предполагает измерение при номинальном давлении^{20,21}. Для исследуемой модели согласно технической информации, предоставленной представителем завода-изготовителя ЭО модели ZX 330, номинальное давление в гидросистеме соответствует максимальному и составляет 34,3 МПа. В статье приведен расчет изменения объемного КПД ЭО модели ZX 330 при давлении в гидросистеме 20 МПа, т.к. при данном значении этого параметра наблюдается наибольшая гидравлическая мощность.

¹⁹ Федоров Д.И. Рабочие органы землеройных машин. М.: Машиностроение, 1977. 288 с.

²⁰ Харазов А.М. Техническая диагностика гидроприводов машин. 112 с.

²¹ Техническая диагностика гидравлических приводов / Т.В. Алексеева, В.Д. Бабанская, Т.М. Башта и др.; под общ. ред. Т.М. Башты. М.: Машиностроение. 1989. 264 с.

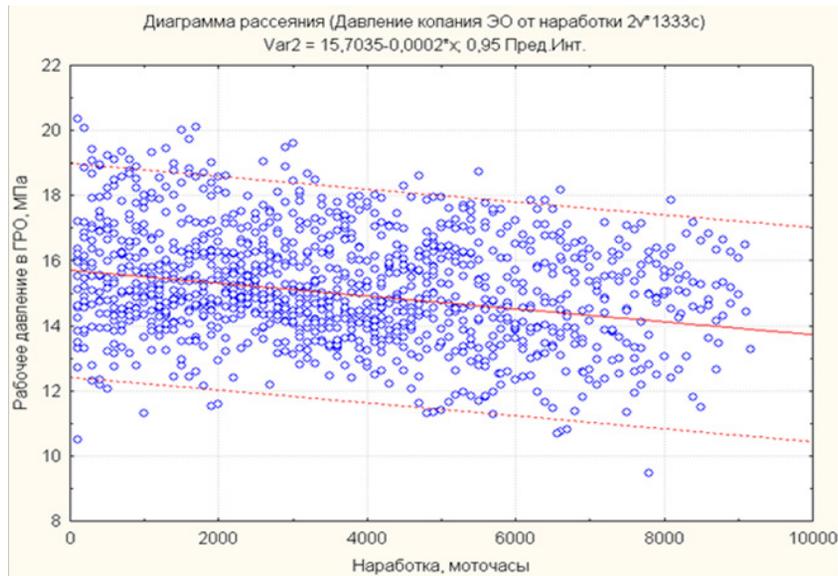


Рисунок 2 – Изменение давления в ГРО при разработке и наборе грунта ЭО марки ZX 330 с течением наработки (доверительные границы указаны с вероятностью 0,95)
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Pressure change in hydraulic system during excavation and earthmoving ZX 330 EOs with operating hours (confidence limits are indicated with a probability of 0.95)
 Source: compiled by the authors.

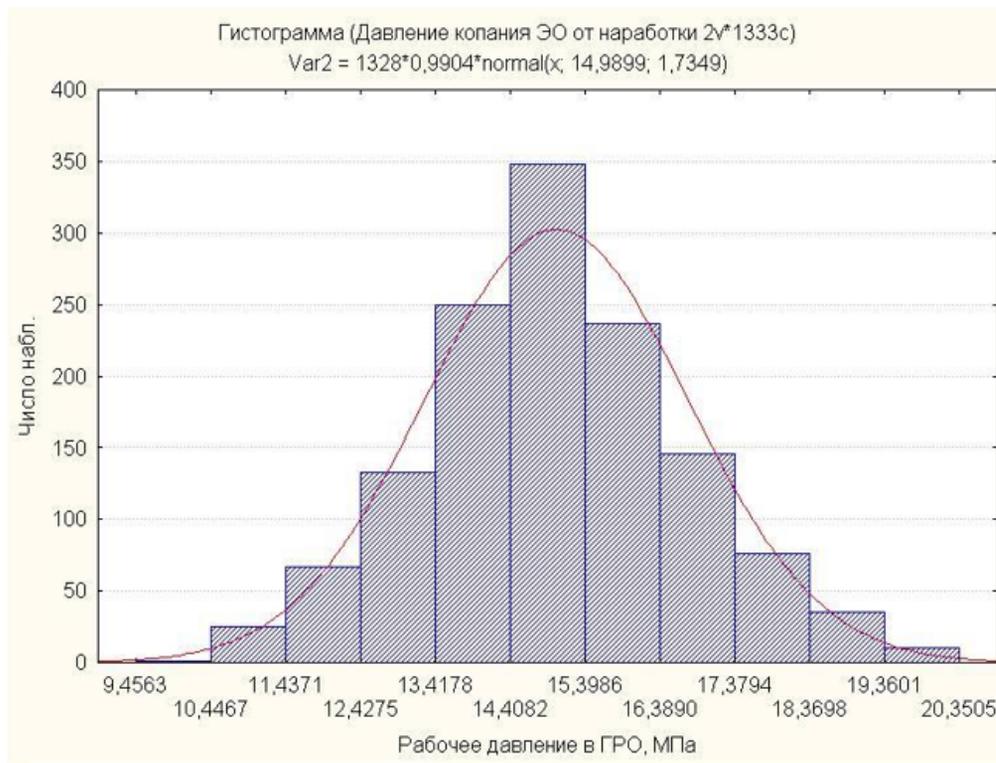


Рисунок 3 – Гистограмма эмпирических частот и теоретической кривой рабочего давления в ГРО экскаватора при разработке и наборе грунта
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Histogram of empirical frequencies and theoretical working pressure curve in the excavator during soil digging
 Source: compiled by the authors.

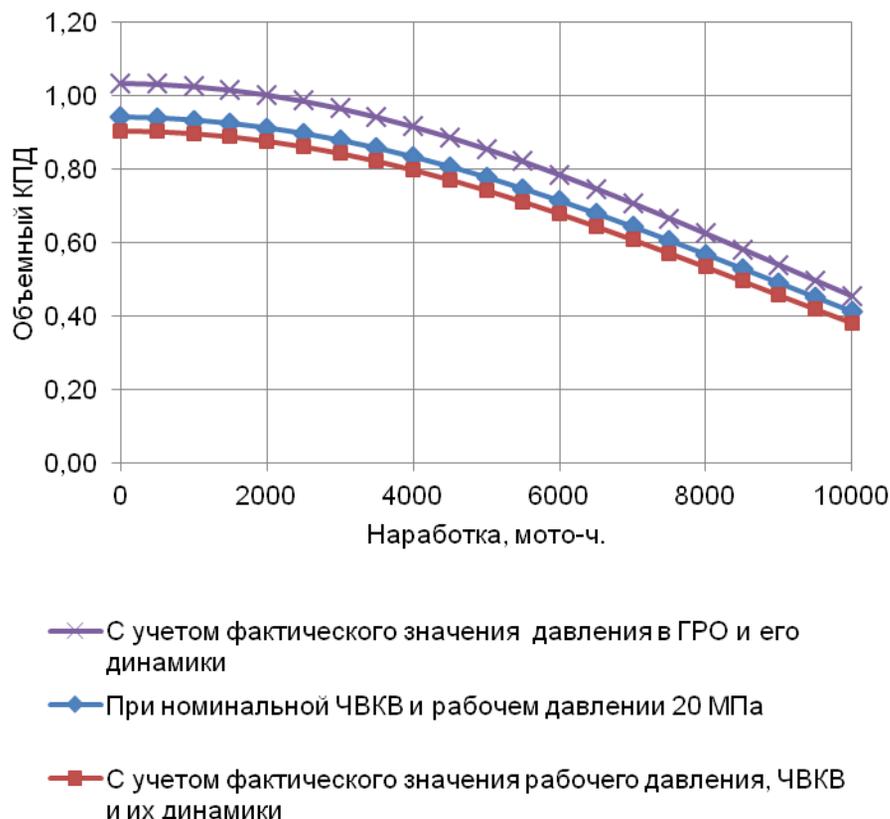


Рисунок 4 – Зависимость объемного КПД элементов гидропривода для операции «разработка и набор грунта» от наработки
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Dependence of the volumetric efficiency of the hydraulic drive elements for the 'digging ground' operation from the time since the beginning
Source: compiled by the authors.

Далее были построены зависимости изменения объемного КПД при среднем рабочем давлении и при 20 МПа в ГРО для операции «разработка и набор грунта» (рисунок 4).

Динамика величин объемных КПД в зависимости от наработки элементов ГП для исследуемой марки ЭО принимались по верхним доверительным границам, величины которых приведены в источнике²².

Как видно из рисунка 4, величина объемного КПД ГРО при среднем рабочем давлении выше, чем при 20 МПа на 9%. Это объясняет-

ся тем, что при меньшем значении рабочего давления подача повышается. Поэтому при расчетах динамики производительности этот факт необходимо учитывать²³. Снижение общего объемного КПД ГРО при 10 000 мото-часов достигает значения 0,41, что значительно ниже допустимого значения 0,60 (для среднего режима работы ГРО), однако авторы в данной статье не рассматривают вывод машины из эксплуатации, повышение коэффициента использования двигателя внутреннего сгорания по мощности²⁴.

²² Гринчар Н.Г. Надежность гидроприводов путевых, строительных и грузоподъемных машин: учеб пособие для вузов. М.: МИИТ, 2001. 112 с.

²³ Харазов А.М. Техническая диагностика гидроприводов машин. 112 с.

²⁴ Надежность строительных машин / Г.П. Гриневич, Е.А. Каменская, А.К. Алферов [и др.] 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1983. 296 с.

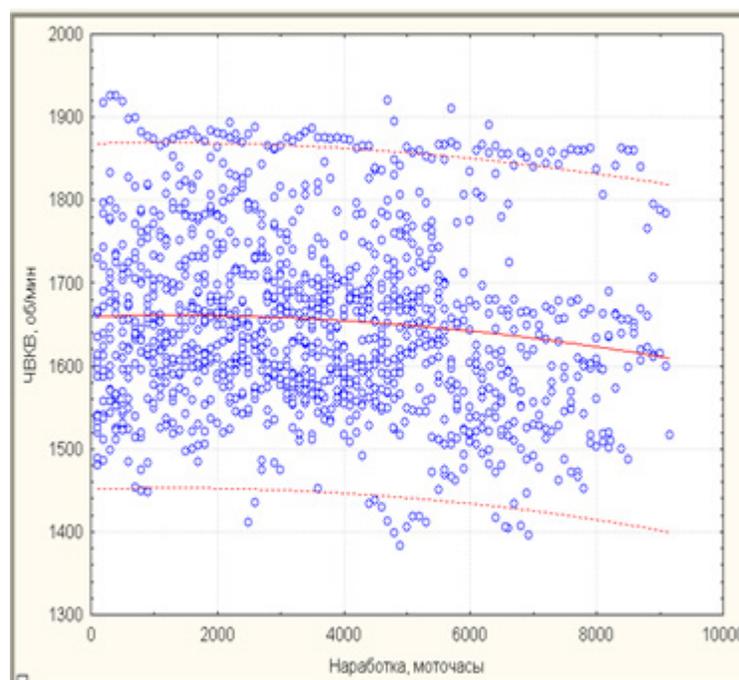


Рисунок 5 – Зависимость изменения частоты вращения коленчатого вала с течением наработки для исследуемой модели ЭО (доверительные границы указаны с вероятностью 0,95)
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – The dependence of the change in the crankshaft rotation frequency on the time elapsed since the start of work for the excavator model under study (confidence limits are indicated with a probability of 0.95)
Source: compiled by the authors.

На величину снижения подачи рабочей жидкости в гидросистеме влияет не только негерметичность внутренних сопряжений, изменение начальных кинематических соотношений, но и ухудшение технического состояния ДВС, по причине которого понижается частота вращения коленчатого вала [8]. На рисунке 5 представлена зависимость изменения ЧВКВ с течением наработки для исследуемой модели ЭО. Ниже приведена аналитическая зависимость функции ЧВКВ от наработки.

$$n(t) = -8 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 + 0,002 \cdot t + 1659,9. \quad (10)$$

В результате анализа полученных зависимостей снижение среднего значения рабочей ЧВКВ на интервале наработки от 0 до 10 000 мото-часов составляет изменение – 4% или 60 об/мин. Полученная зависимость была использована при расчёте производительности ЭО. В нормативах технического обслуживания исследуемой модели ЭО предписана ре-

гулировка ЧВКВ в случае ее снижения более чем на 50 об/мин. Причиной снижения ЧВКВ являются повышение негерметичности камеры сгорания ДВС, неисправности в системах топлива и воздухоподачи. Следовательно, необходимо в процессе эксплуатации уделять внимание данному техническому параметру и своевременно осуществлять его проверку и регулировку.

С учетом полученных уравнений по формуле (4) были рассчитаны и построены зависимости мощности, необходимой для разработки и набора грунта от наработки (рисунок 6). При расчете гидравлической мощности была учтена динамика ЧВКВ ЭО модель ZX 330 (см. рисунок 5).

Анализ полученных результатов, представленных графическими зависимостями на рисунке 6, позволил установить среднюю разницу по величине реализуемой гидравлической мощности в 38%.

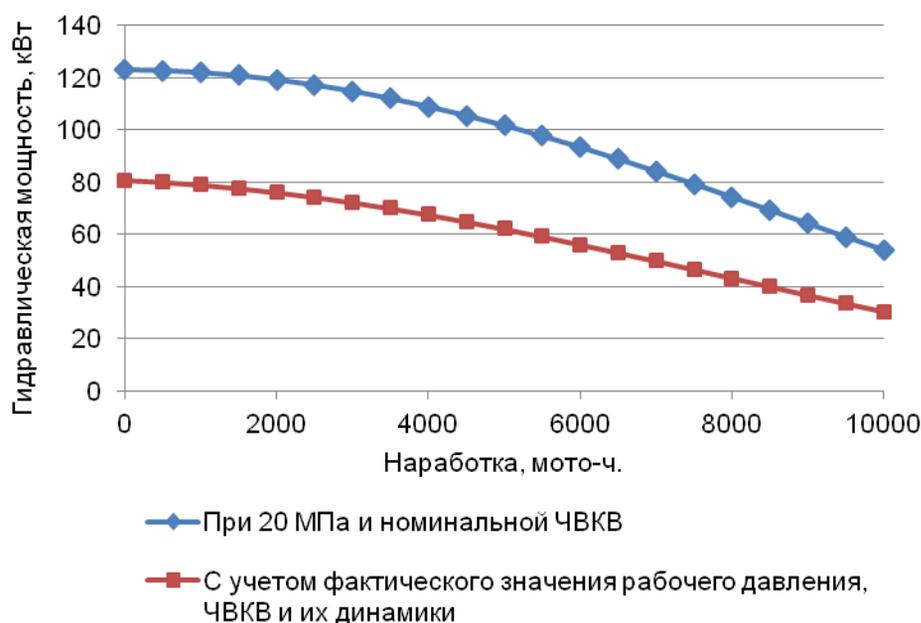


Рисунок 6 – Зависимость гидравлической мощности ЭО модели ZX 330 от наработки для операции «разработка и набор грунта»
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – The dependence of the hydraulic power of model ZX 330 excavator on the time elapsed since the start of work for 'digging ground' operation
Source: compiled by the authors.

Как показывают исследования, несмотря на меньшее значение объемного КПД, в течение наработки наибольшая величина гидравлической мощности наблюдается при давлении 20 МПа для исследуемой модели ЭО (см. рисунки 4, 6). На рисунке 7 приведены графические зависимости полезной гидравлической мощности в диапазоне от 12 до 34,3 МПа в начале эксплуатации и при предельном техническом состоянии.

При расчете гидравлической мощности нового насоса, подставляя данные регуляторной характеристики в формулу (4), была получена зависимость (верхняя кривая бордового цвета, см. рисунок 7).

Далее, учитывая величину падения объемного КПД от наработки элементов ГП, равную 0,60 (для среднего режима работы гидропривода)²⁵, соответствующую предельному техническому состоянию, и подставив значения

в формулу (4), был получен график (нижняя кривая синего цвета, см. рисунок 7).

Величина падения гидравлической мощности в области 20 МПа имеет наибольшее значение (37 кВт), а при 12 МПа (24 кВт) наименьшее. Тем не менее эксплуатация ЭО при значении давления 20 МПа при предельном техническом состоянии не теряет своей целесообразности и является более предпочтительной для обеспечения наибольшей по величине производительности.

Для обеспечения роста эффективности среднее повышение данного показателя должно составлять 25%, что позволит снизить энергозатраты, повысить мощность до 20%. Одним из мероприятий, позволяющих повысить рабочее давление, является увеличение толщины разрабатываемой стружки грунта в процессе резания, применение ковшей с большей или изменяемой геометрической вместимостью²⁶.

²⁵ Надежность строительных машин / Г.П. Гриневич, Е.А. Каменская, А.К. Алферов [и др.] 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1983. 296 с.

²⁶ Салихов Р.Ф., Груснев М.Г.; ГОУ ВПО «Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)» Раздвижной ковш. Патент № 100531 РФ, МКП E02F 3/40. № 2010135571/03; Заявл. 25.08.2010; Опубли. 20.12.2010 Бюл. № 35.

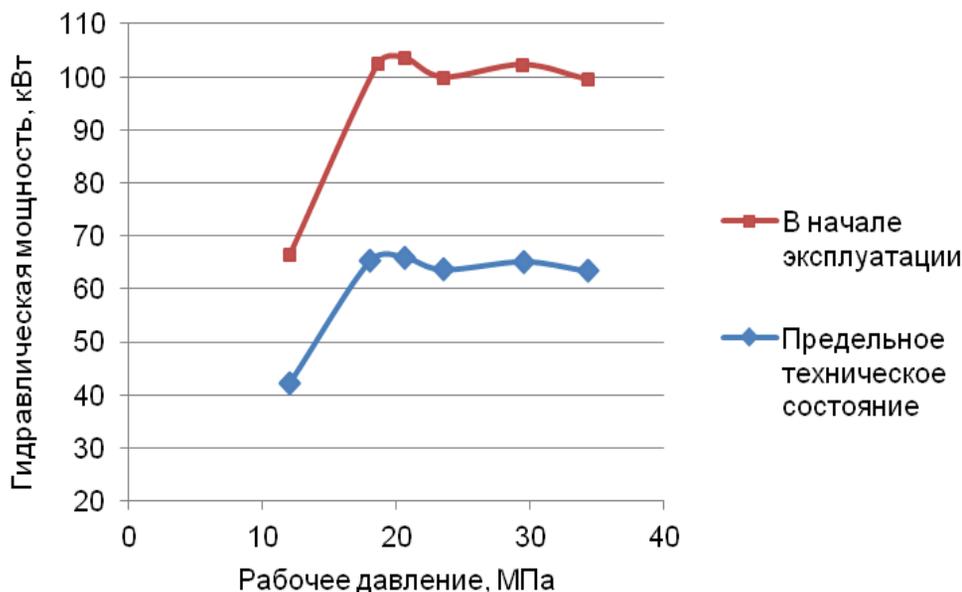


Рисунок 7 – Зависимости гидравлической мощности от величины рабочего давления при разных технических состояниях для операции «разработка и набор грунта»
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – The dependence of hydraulic power on the value of the operating pressure with a serviceable and marginal technical condition of the excavator for 'digging ground' operation
Source: compiled by the authors.

Помимо исследования изменения рабочего давления на операции «разработка и набор грунта» был проведен анализ параметров рабочего давления на всех технологических операциях (включая операцию «перемещение»). В ходе обработки полученных данных с бортового компьютера выявлено то, что операция перемещения занимает от 9 до 11% всей продолжительности эксплуатации (см. рисунок 1, в). Авторы приняли допущение, что учет рабочего давления при перемещении в общей выборке параметров незначительно повлияет на математическое ожидание этого показателя для остальных технологических операций рабочего цикла. Было принято допущение о том, что общее давление в гидросистеме исследовалось с величины 4 МПа с учетом того, что остальное время ЭО работы на данной величине и ниже приходится на холостой ход ($K_{xx} = 0,28$) (см. рисунок 1, а). Средняя величина рабочего давления для всех технологических операций рабочего цикла приведена ниже:

$$P_{cp}(t) = -0,0002 \cdot t + 14,074, \quad (11)$$

где $P_{cp}(t)$ – средняя величина рабочего давления при выполнении технологических операций цикла экскавации ЭО, МПа, t – наработка, мото-ч.

Как видно из полученных зависимостей (см. формулы (9) и (11), различия между ними составляют 12%, это объясняется тем, что при возвращении в забой давление в гидросистеме снижается до 4 МПа, а операция «разработка и набор грунта» является одной из наиболее энергоемких операций рабочего цикла [27].

Также проведены исследования по коэффициенту использования ЭО по времени, о методике расчета которого с учетом современных средств контроля продолжительности рабочего времени будет подробно изложено в последующих статьях. По результатам проведенных исследований средний коэффициент использования ЭО по времени составил 0,43.

Данные исследования позволяют повысить точность прогнозирования изменения эксплуатационной производительности ЭО с течением наработки.

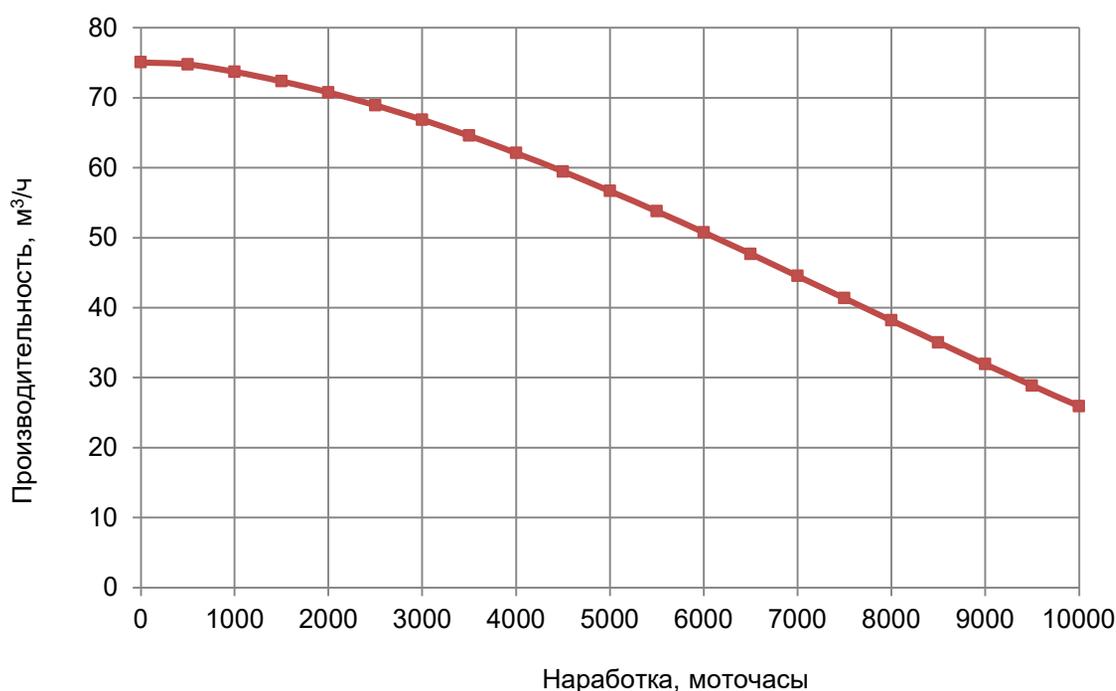


Рисунок 8 – Изменение часовой эксплуатационной производительности ЭО марки ZX 330 от наработки
 ЭО марки ZX 330 от наработки
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The dependence of the hourly productivity of the excavator of ZX 330 model on the time elapsed since the start of work
 Source: compiled by the authors.

Значительную долю потерь мощности вносит ухудшение технического состояния основного гидронасоса, гидромотора поворота платформы, затупление режущих элементов, снижение мощности ДВС из-за износа ЦПГ, системы питания [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Авторами принято допущение о том, что полученные зависимости рабочего давления в ГРО от наработки учитывают влияние ухудшения технического состояния подсистем ЭО.

Расчет технологических операций рабочего цикла ЭО проводился с учетом среднего значения рабочего давления, частоты вращения коленчатого вала (формулы (10), (11)). Для расчета эксплуатационной производительности ЭО воспользуемся формулами (1), (2) (см. рисунок 8)²⁷ [3, 4, 5, 8, 9, 10, 14].

Анализ полученной закономерности (см. рисунок 8) свидетельствует о том, что при изменении вышеперечисленных параметров, в том числе давления в ГРО, сокращение среднего значения часовой эксплуатационной производительности за период наработки от 0 до 10 000 мото-часов составит 65% при условии, того что коэффициент использования ДВС по мощности равен 0,59. В расчетах не приводится также влияние динамики температуры рабочей жидкости на снижение КПД, влияние данного параметра можно учитывать применительно к местным условиям эксплуатации.

Таким образом, представленная методика расчета часовой эксплуатационной производительности позволяет спрогнозировать динамику данного показателя с течением наработки.

²⁷ Машины для земляных работ: учебник для студентов, обучающихся по направлению 270100 «Строительство» / А.И. Доценко [и др.]. М.: Бастет, 2012. 687 с.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

а) установлено то, что с увеличением наработки (интервал от 0 до 10 000 мото-часов) рабочее давление в гидросистеме рабочего оборудования снижается в среднем на 12,7–13,0%, получены регрессионные линейные зависимости, доверительные границы с вероятностью 0,95; характеристики случайных величин рабочего давления в гидросистеме рабочего оборудования, скорости падения данного параметра;

б) достигается повышение точности расчета изменения величины общего объемного КПД элементов гидропривода за счет применения регрессионной зависимости рабочего давления в гидросистеме. Величина объемного КПД при учете динамики среднего рабочего давления выше, чем при 20 МПа на 9% для исследованной модели ЭО;

в) расчеты показывают то, что наибольшее значение гидравлической мощности достигается при рабочем давлении 18–20 МПа. Как показали исследования, только 7% от всей продолжительности выполнения технологических операций ЭО соответствуют рекомендуемым требованиям. Необходимо повышать величину рабочего давления до рекомендуемого путем увеличения толщины срезаемой стружки в процессе набора грунта, применения ковшей с большей и изменяемой геометрической вместимостью, повышать скорость выполнения технологических операций, что позволит значительно повысить производительность и снизить энергозатраты, ориентировочно до 15%;

г) результаты расчетов аналитических регрессионных зависимостей средней величины рабочего давления всех технологических операций рабочего цикла, включая перемещение и отдельно операции «разработка и набор грунта», имеют расхождение 12%, что связано с тем, что копание является наиболее энергоемкой операцией по отношению к остальным;

д) установлено то, что с увеличением наработки частота вращения коленчатого вала снижается, получены регрессионная линейная зависимость, доверительные границы с вероятностью 0,95. В результате анализа полученных зависимостей снижение среднего значения рабочей частоты вращения коленчатого вала на интервале наработки от 0 до 10 000 мото-часов составляет 4%, что прямо пропорционально отражается на величине падения объемного КПД;

е) расчетная величина падения средней часовой эксплуатационной производительности ЭО с учетом ухудшения технического состояния, характеризуемого падением рабочего давления в гидросистеме частоты вращения коленчатого вала, составляет 65% при условии того, что коэффициент использования ДВС по мощности равен 0,59 на интервале наработки от 0 до 10 000 мото-часов для модели ЭО ZX - 330.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сидоров В.И. Управление восстановлением мощности силовых установок строительных и дорожных машин в эксплуатации // Труды МАДИ. 1975. Вып. 97. С 47–51.
2. Казакова Ю.Д., Вахрушев С.И. Исследование износостойкости рабочих органов строительных и дорожных машин в различных условиях эксплуатации // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2016. Т. 1. С. 310–319.
3. Салихов Р.Ф. Совершенствование методики прогнозирования изменения эксплуатационной производительности строительных машин от наработки // Механизация строительства. 2016. № 1. С. 29–32.
4. Салихов Р.Ф. Совершенствование методики прогнозирования изменения эксплуатационной производительности строительных машин от наработки // Механизация строительства. 2017. № 4. С. 46–50.
5. Салихов Р.Ф., Попков В.И. Методика расчета изменения производительности одноковшового гидравлического экскаватора в процессе наработки // Механизация строительства. 2018. Т. 79, № 3. С. 26–31.
6. Salikhov R.F., Permyakov V.B., Filippov Y.O., Grusnev M.G. A study of dynamics of the operational performance of a single-bucket excavator, taking into account the operating time during construction of transport infrastructure of oil and gas facilities // Journal of Physics: Conference Series. This link is disabled. 2021. 1901(1).0120981313
7. Макацария Д.Ю., Кутузов В.В., Кутузова Е.В., Зезюлина Е.В. Влияние наработки с начала эксплуатации строительных и дорожных машин на показатели эффективности их использования // Вестник Белорусско-Российского университета. 2009. № 2. С. 36–43.
8. Определение технической и эксплуатационной производительностей дорожных машин на основе анализа объемов работ / С.М. Грушецкий, С.А. Евтюков, С.В. Репин, А.А. Кузнецов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. № 1. С. 38–52.
9. Дубровский Н.А., Веретенникова Е.С., Камеко О.А. Эксплуатационная производительность машин как показатель эффективности ее применения // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Д. Экономические и юридические науки. 2021. № 5. С. 38–43. DOI 10.52928/2070-1632-2021-56-5-38-43

10. Грушецкий С.М., Евтюков С.А., Репин С.В., Карро Г.А. Производительность как качественный критерий оценки эффективности всех этапов системы жизненного цикла дорожных машин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. 2020. № 4 (63). С. 36–42.
11. Монгуш С.Ч., Чооду О.А., Евтюков С.А. Моделирование процессов влияния климатических факторов и рельефа местности на производительность наземных транспортно-технологических машин // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2019. № 3 (47). С. 108–111.
12. Максименко А.Н., Кутузов В.В., Сидоров А.Н. Влияние сезона и наработки с начала эксплуатации на производительность строительных и дорожных машин и себестоимость механизированных работ // Грузовик &. 2010. № 2. С. 16–21.
13. Фахратов М.А., Кужин М.Ф., Ибрагимов Р.И. Влияние автоматизированных систем управления грузоподъемных механизмов на производительность строительно-монтажных работ // Перспективы науки. 2020. № 1 (124). С. 62–65.
14. Павлов В.П. Основы системотехники многоцелевых землеройных машин: монография. Мино образования и науки РФ, Федеральное агентство по образованию, Красноярский гос. тех. ун-т. Новосибирск: Изд-во СО РАН; Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. 332 с.
15. Чмиль В.П. Гидропневмопривод: монография. СПбГАСУ. СПб., 2010. 176 с.
16. Минин В.В., Мирзоян Г.С. Оптимизация параметров привода малогабаритных погрузчиков: монография. Красноярск: Изд. Красноярского университета, 1987. 160 с.
17. Салихов Р.Ф., Груснев М.Г. Влияние параметров силовой установки на технико-экономические показатели одноковшовых гидравлических экскаваторов // Строительные и дорожные машины. 2010. № 4. С. 47–49.
18. Максименко А.Н., Кутузов В.В., Тимофеев Г.С., Васильев В.В. Учет и оценка эффективности использования каждой машины парка в строительстве // Вестник Белорусско-Российского университета. 2010. № 4. С. 21–28.
19. Оценка эффективности использования машин в строительном производстве / А.Н. Максименко [и др.] // Строительная наука и техника. 2008. № 5 (20). С. 37–43.
20. Grabovyy P.G., Zhikharev D.F. The productivity of an industrial housing construction enterprise as the main indicator of the potential intensity growth of the producton and construction system Real Estate: Economics, Management. 2022. № 2. С. 11–17. DOI: 10.22337/2073-8412-2022-2-11-17
21. Чечуев В.Е. Методика расчета коэффициента сохранения эффективности строительных машин по данным эксплуатации // Строительные и дорожные машины. 2021. № 5. С. 15–20.
22. Репин С.В., Зазыкин А.В., Рулис К.В., Максимов С.Е. Методика формирования парка транспортно-технологических машин с использованием лизинга и кредита // Вестник гражданских инженеров. 2017. 4(63). С. 209–218.
23. Евтюков С.А., Репин С.В., Грушецкий С.М., Карро Г.А. Формирование парка машин для строительства, реконструкции, ремонта и содержания автомобильных дорог с учетом этапов их жизненного цикла // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. 2020. № 3 (62). С. 62–68.
24. Куляшов И.Д., Чечуев В.Е., Кравец К.О. Влияние видов эксплуатации на эффективность и надежность парка строительных машин // Фундаментальные основы механики. 2023. № 11. С. 80–89.
25. Доценко А.И. Комплексный мониторинг параметров дорожных машин и асфальтобетонной смеси – основа повышения качества покрытий автомобильных дорог // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. 2018. № 2 (53). С. 89–93.
26. Салихов Р.Ф., Бердников И.Е. Метод расчета годовой продолжительности проведения технических обслуживаний и ремонтов для отечественных и зарубежных экскаваторов с течением наработки // Вестник СибАДИ. 2024;21(1):26–37. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-1-26-37>. EDN: HZWSMV
27. Тарасов В.Н., Коваленко М.В. Механика копания грунтов ковшом гидравлического экскаватора // Строительные и дорожные машины. 2003. № 8. С.41–45.

REFERENCES

1. Sidorov V.I. Power recovery management of power plants of construction and road machinery in operation. *Trudy MADI*.1975; issue 97: 47–51. (in Russ.)
2. Kazakova Yu.D., Vakhrushev S.I. Research of wear resistance of working bodies of construction and road machinery in various operating conditions. *Sovremennye tehnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika*. 2016; Vol. 1: 310–319. (in Russ.)
3. Salikhov R.F. Improving the methodology for predicting changes in the operational productivity of construction machines from operating time. *Mehanizacija stroitel'stva*. 2016; 1: 29–32. (in Russ.)
4. Salikhov R.F. Improving the methodology for predicting changes in the operational productivity of construction machines from operating time. *Mehanizacija stroitel'stva*. 2017;4: 46–50. (in Russ.)
5. Salikhov R.F., Popkov V.I. Methodology for calculating the performance change of a single-bucket hydraulic excavator in the process of operation. *Mehanizacija stroitel'stva*. 2018; Vol. 79. No. 3: 26–31. (in Russ.)
6. Salikhov R.F., Permyakov V.B., Filippov Y.O., Grusnev M.G. A study of dynamics of the operational performance of a single-bucket excavator, taking into account the operating time during construction of transport infrastructure of oil and gas facilities. *Journal of Physics: Conference Series* *link is disabled*. 2021. 1901(1).0120981313

7. Maksimenko A.N., Makazarija D.Y., Kutuzov V.V., Kutuzova E.V., Zezulina E.V. Influence of the operating time from the beginning of operation of building and road machines on parameters of efficiency of their use. *Vestnik Belarusian – Russian University*. 2009; 2: 36–43. (in Russ.)
8. Grushetsky S.M., Evtyukov S.A., Repin S.V., Kuznecov A.A. Determination of technical and operating performance of road machines based on analysis of the scope of work. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2021; 1: 38–52. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-38-52
9. Dubrovsky N., Veretennikova E., & Kameko O. Machine operating productivity as an indicator of the efficiency of its application. *Vestnik of Polotsk State University. Part D. Economic and Legal Sciences*. 2021; (5): 38–43. <https://doi.org/10.52928/2070-1632-2021-56-5-38-43>
10. Grushetsky S.M., Yevtyukov S.A., Repin S.V., Karro G.A. Productivity as a qualitative criterion for evaluating the effectiveness of all stages of the life cycle system of road vehicles. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*. 2020; 4 (63): 36–42.
11. Mongush S.Ch., Choodu O.A., Yevtyukov S.A. Modeling of the processes of the influence of climatic factors and terrain on the productivity of ground transport and technological machines. *Polytechnical bulletin. Series: Engineering Studies*. 2019; 3 (47): 108–111. (in Russ.)
12. Maksimenko A.N., Kutuzov V.V., Sidorov A.N. The influence of the season and operating time since the beginning of operation on the productivity of construction and road machinery and the cost of mechanized work. *Gruzovik &*. 2010; 2: 16–21. (in Russ.)
13. Fahratov M.A., Kuzhin M.F., Ibragimov R.I. The Influence of Automated Control Systems of Lifting Mechanisms on the Performance of Construction Works. *Science prospects*. 2020; 1 (124): 62–65. (in Russ.)
14. Pavlov V.P. *Fundamentals of system engineering of multipurpose earthmoving machines: monograph*. Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Federal Agency for Education, Krasnoyarsk State Technical University. un-T. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS; Krasnoyarsk: CPI KSTU, 2006: 332. (in Russ.)
15. Chmil V.P. *Gidropneumoprivod: monograph*. SPbGASU. St. Petersburg, 2010: 176. (in Russ.)
16. Minin V.V., Mirzoyan G.S. *Optimization of the drive parameters of small-sized loaders: monograph*. Krasnoyarsk: Ed. Krasnoyarsk State University, 1987:160. (in Russ.)
17. Salikhov R.F., Grusnev M.G. The influence of power plant parameters on the technical and economic indicators of single-bucket hydraulic excavators. *Construction and road machines*. 2010; 4: 47–49. (in Russ.)
18. Maksimenko A.N., Kutuzov V.V., Timofeev G.S., Vasiliev V.V. Accounting and evaluation of the efficiency of using each car of the park in construction. *Vestnik Belarusian – Russian University*. 2010; 4: 21–28. (in Russ.)
19. Maksimenko A.N. Evaluation of the efficiency of using machines in construction production. *Stroitel'naja nauka i tehnika*. 2008; 5 (20): 37–43. (in Russ.)
20. Grabovyy P.G., Zhikharev D.F. The productivity of an industrial housing construction enterprise as the main indicator of the potential intensity growth of the product and construction system Real Estate: Economics, Management. 2022; 2: 11–17. DOI: 10.22337/2073-8412-2022-2-11-17
21. Chechuyev V.E. Methodology for calculating the coefficient of conservation of efficiency of construction machines according to operation data. *Construction and road machines*. 2021; 5: 15–20. (in Russ.)
22. Repin S.V., Zazikin A.V., Rulis K.V., Maksimov S.E. Methodology for the formation of a fleet of transport and technological machines using leasing and credit. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2017; 4(63): 209–218. (in Russ.)
23. Yevtyukov S.A., Repin S.V., Grushetsky S.M., Karro G.A. Formation of a fleet of cars for the construction, reconstruction, repair and maintenance of highways, taking into account the stages of their life cycle. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*. 2020; 3 (62): 62–68. (in Russ.)
24. Kulyashov I.D., Chechuyev V.E., Kravets K.O. The influence of types of operation on the efficiency and reliability of the fleet of construction machines. *Fundamental'nye osnovy mehaniki*. 2023; 11: 80–89. (in Russ.)
25. Dotsenko A.I. Complex monitoring of parameters of road vehicles and asphalt concrete mixture – the basis for improving the quality of road coverings. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*. 2018; 2 (53): 89–93. (in Russ.)
26. Salikhov R.F., Berdnikov I.E. Method for calculating annual duration of maintenance and repairs of domestic and foreign excavators considering time in service. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21(1): 26–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-1-26-37>. EDN: HZWSMV
27. Tarasov V.N., Kovalenko M.V. Mechanics of digging soils with a bucket of a hydraulic excavator. *Construction and road machines*. 2003; 8: 41–45. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Салихов Р.Ф. Формулирование направления и методологии исследования. Руководство процессом разработки темы. Выбор методологии и методов исследования, расчет параметров, определение аналитических и графических зависимостей. Формулирование результатов и выводов (80%).

Пермяков В.Б. Критический пересмотр в части значимого интеллектуального содержания. Анализ качества написания статьи. Формулировка результатов и выводов (20%).

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Salikhov R.F. Research area and methodology statement. Theme development process guiding. Research methodology and methods selection, parameters calculation, analytical and graphical dependencies determination. Results and conclusions statement (80%).

Permyakov V.B. Critical revision in terms of significant intellectual content. Quality of the article writing analysis. Results and conclusions statement (20%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Салихов Ринат Фокилевич – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 5), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9619-7789>, **SPIN-код:** 3196-9174, e-mail: salikhorinat@yandex.ru

Пермяков Владислав Борисович – д-р техн. наук, заслуженный деятель науки Российской Федерации, проф. кафедры «Эксплуатация нефте-

газовой и строительной техники» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 5), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-3957-237X>, **SPIN-код:** 9297-4909, e-mail: v.b_permyakov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rinat F. Salikhov – Cand. of Sci., Associate Professor, Maintenance and Operation of Transport and Technological Machines and Complexes in Construction Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5 Prospekt Mira, Omsk, 644050), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9619-7789>, **SPIN cod:** 3196-9174, e-mail: salikhorinat@yandex.ru.

Vladislav B. Permyakov – Dr. of Sci., Honored Scientist of the Russian Federation, Professor of the Oil Gas and Construction Equipment Operation Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5 Prospekt Mira, Omsk, 644050), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-3957-237X>, **SPIN-code:** 9297-4909, e-mail: v.b_permyakov@mail.ru

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

Научная статья
УДК 629.3.064.7
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-562-579>
EDN: FBCWFE



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОДИОДОВ В ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С УЧЕТОМ КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ

К.Н. Сокирко ✉, Е.А. Павлюченко, Е.А. Лысенко
Омский государственный технический университет (ОмГТУ),
г. Омск, Россия
✉ ответственный автор
gaika-94@inbox.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из перспективных способов уменьшения динамических нагрузок при работе гидравлических кран-манипуляторных установок является использование гидродюзов. В гидравлических системах, работающих при высоких скоростях рабочей жидкости, в гидродюзе могут возникнуть кавитационные явления, которые сопровождаются повышенным шумом и вибрацией и могут привести к разрушению гидродюза, что недопустимо. В работе проведено сравнение результатов расчета течения жидкости в проточной части вихревого гидродюза с учетом кавитационных явлений и без учета кавитационных явлений с результатами исследовательских испытаний. Представлен анализ влияния кавитации на рабочие процессы в вихревом гидродюзе для кран-манипуляторных установок.

Материалы и методы. Для изучения рабочих процессов, происходящих в рабочей камере вихревого гидродюза, были созданы модели вычислительной гидродинамики (CFD) с использованием кода FLUENT CFD. Для моделирования течения жидкости в проточной части вихревого гидродюза использовался коммерческий CFD-код ANSYS FLUENT.

Результаты. В работе проведена верификация результатов численного эксперимента с результатами исследовательских испытаний, а также количественный и качественный анализ влияния кавитации на рабочие процессы вихревого гидродюза.

Обсуждение и заключение. Установлено, что значения давления и дюзовности при расчетах с учетом кавитации и без учета кавитации практически не отличаются, таким образом, влияние кавитации при числах Рейнольдса $Re < 30000$ не оказывают существенного влияния на количественные значения параметров вихревого гидродюза и модуль расчета кавитации можно не использовать. Однако при более высоких значениях чисел Рейнольдса в рабочей полости вихревого гидродюза появляются кавитации, и расчетные значения параметров гидродюза без учета кавитации и с учетом кавитации существенно отличаются. Следовательно, при расчете высокоскоростных течений необходимо использовать модуль расчёта кавитации. Проведенный анализ влияния кавитации на рабочие процессы вихревого гидродюза показал, что при прямом направлении течения кавитация несущественно оказывает влияние на параметры гидродюза и место ее образования – верхнюю входную область тангенциальной камеры. При обратном направлении потока кавитации оказывают существенное влияние на картину течения жидкости в вихревом гидродюзе. Кавитация охватывает практически весь входной объем радиальной трубки и частично захватывает центральную часть вихревой камеры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вихревой гидродюз, кавитация, гидродюзное регулирование, гидравлический дюз

БЛАГОДАРНОСТИ. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00370, <https://rscf.ru/project/23-29-00370/>

Статья поступила в редакцию 17.05.2024; одобрена после рецензирования 22.06.2024; принята к публикации 14.08.2024.

© Сокирко К.Н., Павлюченко Е.А., Лысенко Е.А., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

**Все 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: Сокирко К.Н., Павлюченко Е.А., Лысенко Е.А. Повышение эффективности автомобильного транспорта за счет использования гидродиодов в гидравлических системах с учетом кавитационных явлений // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 4. С. 562-579. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-562-579>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-562-579>

EDN: FBCWFE

IMPROVING EFFICIENCY OF ROAD TRANSPORT THROUGH THE USE OF HYDRODIODES IN HYDRAULIC SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT CAVITATION PHENOMENA

Ksenia N. Sokirko ✉, **Evgenii A. Pavliuchenko**, **Evgenii A. Lysenko**
Omsk State Technical University (OmSTU),
Omsk, Russia
✉ corresponding author
gaika-94@inbox.ru

ABSTRACT

Introduction. One of the promising ways to reduce dynamic loads during operation of hydraulic crane manipulator installations is the use of hydrodiodes. In hydraulic systems operating at high speeds of the working fluid, cavitation phenomena may occur in the hydrodiode, which are accompanied by increased noise and vibration, and may lead to the destruction of the hydrodiode, which is not acceptable. The paper compares the results of calculating the flow of liquid in the flow part of a vortex hydrodiode, taking into account cavitation phenomena and without cavitation phenomena, with the results of research tests. The analysis of the effect of cavitation on the working processes in a vortex hydrodiode for crane manipulator installations is presented.

Materials and method. Computational fluid dynamics (CFD) models using the FLUENT CFD code to study the working processes occurring in the working chamber of a vortex hydrodiode were developed. The commercial CFD code ANSYS FLUENT to simulate the flow of liquid in the flow part of a vortex hydrodiode was used.

Results. The paper verifies the results of a numerical experiment with the results of research tests. A quantitative and qualitative analysis of the effect of cavitation on the working processes of a vortex hydrodiode has been carried out.

Discussion and conclusion. It has been found that the values of pressure and diode in calculations taking into account cavitation and without cavitation practically do not differ, thus, the effect of cavitation at Reynolds numbers $Re < 30000$ does not significantly affect the quantitative values of the parameters of the vortex hydrodiode and the cavitation calculation module can not be used. However, at higher values of the Reynolds numbers, cavitation appears in the working cavity of the vortex hydrodiode and the calculated values of the parameters of the hydrodiode without cavitation and taking cavitation into account differ significantly. Therefore, when calculating high-speed flows, it is necessary to use the cavitation calculation module. The analysis of the effect of cavitation on the working processes of a vortex hydrodiode showed that in the forward direction of the flow, cavitation does not significantly affect the parameters of the hydrodiode and the place of its formation, the upper inlet region of the tangential chamber. In the opposite direction of flow, cavitation has a significant effect on the pattern of fluid flow in the vortex hydrodiode. Cavitation covers almost the entire inlet volume of the radial tube and partially captures the central part of the vortex chamber

KEYWORDS: vortex hydrodiode, cavitation, hydrodiode regulation, hydraulic diode

ACKNOWLEDGEMENTS. The study was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 23-29-00370, <https://rscf.ru/project/23-29-00370/>

© Sokirko K.N., Pavlyuchenko E.A., Lysenko E.A., 2024



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

The article was submitted 17.05.2024; approved after reviewing 22.06.2024; accepted for publication 14.08.2024.

All 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. Sokirko K.N., Pavlyuchenko E.A., Lysenko E.A. Improving efficiency of road transport through the use of hydrodiodes in hydraulic systems taking into account cavitation phenomena. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2024; 21 (4): 562-579. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-562-579>

ВВЕДЕНИЕ

В машиностроении гражданского и военного назначения используется огромное количество механизмов и систем, применяющих в работе энергию жидкости под давлением. Благодаря ее свойствам такие механизмы и системы обладают определёнными преимуществами, в связи с чем важную роль в развитии современной техники играют гидравлические приводы как основное средство механизации и автоматизации технологических процессов и процессов управления различными объектами.

В современных условиях значение проведения ремонта крупногабаритных агрегатов, механизмов и автомобильной техники значительно увеличивается. Большая часть ремонтно-восстановительных комплексов и передвижных мастерских имеет в своем составе грузоподъемные механизмы на базе объемного гидропривода, поскольку он обладает высокой удельной (по отношению к габаритам и массе) мощностью, простотой преобразования вращательного движения в возвратно-поступательное, высокой технологичностью и т.д.¹ [1, 2].

В настоящее время развитие современных грузоподъемных механизмов и машин в целом связано с совершенствованием объемного гидропривода и его исполнительных механизмов, что позволяет успешно осуществить переход от применения устаревших видов подъемно-транспортной техники к высокопроизводительным комплексам [3, 4].

Анализ работы гидравлических кран-манипуляторных установок, а также других гидравлических систем автомобильной техники и транспортных средств специального назначения показал, что гидроагрегаты работают в тяжелых условиях, которые характеризуются постоянно изменяющимся температурным режимом и рабочим давлением, особенно это характерно для пуско-тормозных режимов

и, как следствие, возникают гидравлические удары и циклические нагрузки. Это повышает вероятность отказов узлов и деталей гидросистемы и может привести к возникновению неисправностей [5, 6, 7].

Снижение амплитуды колебаний давления рабочей жидкости достигается использованием дросселей, регуляторов расхода, гидравлических демпферов, предохранительных клапанов, которые имеют ряд недостатков в конструкции и в работе² [8, 9].

Одним из перспективных способов уменьшения динамических нагрузок при работе гидроаппаратуры автотракторной техники, в частности, в гидравлических кран-манипуляторных установках (КМУ), является использование гидродиодов [10, 11].

Гидродиод – проточный элемент без подвижных механических частей, предназначенный для регулирования расхода протекающей через гидродиод жидкости в зависимости от прямого или обратного направления течения: при максимальном расходе жидкости с минимальным сопротивлением – направление прямое, при минимальном расходе жидкости с высоким сопротивлением – направление обратное (противоположное). Гидродиод является прямым аналогом нерегулируемого дросселя с обратным клапаном.

Применение гидродиодов уменьшает чрезмерные скачки давления в различных режимах работы гидравлической системы КМУ, что позволяет добиться плавности хода, точности позиционирования и уменьшения времени выполнения цикла погрузочно-разгрузочных работ. Гидродиоды имеют простую и надежную конструкцию, обладают схожими массогабаритными показателями, как и классические дросселирующие устройства. Применение гидродиодов в КМУ может значительно увеличить их надежность и уменьшить себестоимость изготовления [11].

¹ Лозовецкий В.В. Гидро- и пневмосистемы транспортно-технологических машин: учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2022. ISBN 978-5-8114-1280-8.

² Целищев В.А. Гидравлический привод и гидроагрегаты: учебное пособие / Уфимский университет науки и технологий. Изд. 2-е, перераб. и доп. Уфа: РИЦ УУНИТ, 2023.

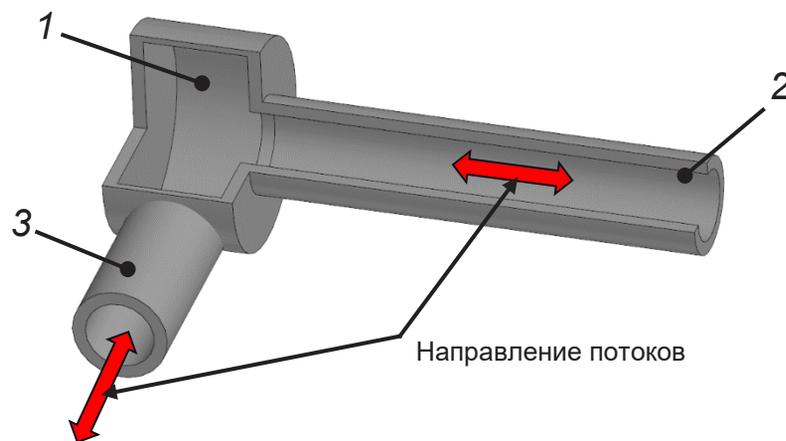


Рисунок 1 – Трехмерная модель вихревого гидродиода с разрезом:
1 – вихревая камера; 2 – радиальная трубка; 3 – тангенциальная трубка.
Стрелками показано направление движения жидкости
Источник: составлено авторами.

Figure 1 Three-dimensional model of a vortex hydrodiode with a section:
1 – a vortex chamber; 2 – a radial tube; 3 – a tangential tube.
The arrows show the direction of movement of the liquid
Source: compiled by the authors.

Существуют различные конструктивные исполнения гидродиодов, однако наибольшее распространение получили вихревые гидродиоды. На рисунке 1 представлен классический вихревой гидродиод, состоящий из цилиндрической вихревой камеры 1 постоянной высоты, к которой примыкает тангенциальная трубка 3 и радиальная трубка 2. В вихревых гидродиодах закрутка потока создается за счет тангенциальной подачи обратного потока в цилиндрическую камеру. При течении жидкости в прямом направлении поток через трубку 2 поступает в камеру 1 и выходит из вихревой камеры через тангенциальную трубку 1. В этом случае поток имеет минимальные гидравлические потери, которые обусловлены потерями на выходе осевого потока в вихревую камеру и потерями на входе в тангенциальную трубку из вихревой камеры. Расход жидкости максимальный.

В обратном направлении поток через тангенциальную трубку 3 поступает в вихревую камеру 1, где закручивается и выходит из камеры через радиальную трубку 2. В этом случае общие потери складываются из потерь в вихревой камере (потери на закрутку потока) и потерь на входе закрученного потока в радиальную трубку 2 из камеры 1. В этом случае гидравлические потери оказываются значительно больше, чем при прямом течении и расход жидкости минимальный.

Вполне очевидно, что при движении жидкости с большими скоростями в гидродиоде могут возникнуть кавитационные явления [12]. Кавитация представляет собой «холодное» кипение жидкости и возникает, когда местное давление насыщенных паров для заданной температуры. Наличие газовой фазы в рабочей жидкости оказывает только отрицательное влияние на параметры и характеристики гидропривода. Можно выделить три направления негативного влияния газовой фазы в рабочей жидкости на работоспособность и эффективность гидропривода. Во-первых, газовая фаза ухудшает динамические характеристики гидропривода, приводит к снижению усилий на гидродвигателях и, как следствие, к уменьшению производительности машины, а также снижению точности позиционирования груза. Во-вторых, газовая фаза уменьшает смазывающие свойства рабочих жидкостей, что ведет к повышению износа пар трения деталей гидрооборудования, уменьшается мощность привода насоса и усилия на гидродвигателях для выполнения технологических операций. В-третьих, в зоне схлопывания пузырьков повышается температура жидкости, что увеличивает внутренние и наружные утечки, снижает объемный КПД и полезное усилие на гидродвигателях [13]. Применительно к гидродиоду, кавитация может сопровождаться

повышенным шумом и вибрацией, и привести к разрушению гидродиода, что недопустимо. Таким образом, возникает задача провести анализ влияния кавитационных явлений на рабочие процессы вихревого гидродиода при гидродиодном регулировании кран-манипуляторных установок.

В последнее время, благодаря возросшим вычислительным ресурсам, в вычислительной гидродинамике (Computational Fluid Dynamics, CFD) появилась возможность проводить расчеты сложных течений с учетом кавитационных явлений. Моделирование гидродинамических процессов средствами пакета конечных элементов ANSYS CFX – инструмент, который уже широко используется для оптимизации и проектирования различных гидравлических устройств, их многофункционального анализа, в том числе и с учетом кавитации [14, 15, 16, 17, 18].

В статье проведено сравнение результатов расчета течения жидкости в проточной части вихревого гидродиода с учетом кавитационных явлений и без учета кавитационных явлений с результатами исследовательских испытаний. Представлен анализ влияния кавитации на рабочие процессы в вихревом гидродиоде, который используется для управления гидравлических кран-манипуляторных установок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Существуют три метода исследования: аналитический, экспериментальный и численный эксперимент (численное моделирование). Решение задачи течения жидкости в проточной части гидродиода, которое носит сложный нестационарный вихревой характер, получить аналитическими методами не представляется возможным, в то время как эксперименты всегда дорогостоящи или трудозатратны, поскольку необходимо изготовить большое количество опытных образцов гидродиодов и провести экспериментальные исследования. Поэтому для решения многомерных нестационарных задач течения жидкости в настоящее время используют численное моделирование, которое подразумевает создание математической модели движения рабочей среды и дальнейшее её исследование с использованием численных методов, реализуемых на компьютере. Применение численных методов в задачах гидродинамики позволяет решать многие практические задачи, а появление высокопроизводительных вычислительных систем позволяет решать нестационарные пространственные задачи течения жидкости с интенсивным вихреобразованием.

В общем случае, для описания нестационарного течения вязкой сжимаемой жидкости в проточной части вихревого гидродиода может использоваться классическая система уравнений [19]: уравнение неразрывности, уравнение движения вязкой жидкости (в форме уравнения Навье-Стокса), уравнения сохранения энергии и уравнения состояния:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho V) = 0; & (1) \\ \rho \frac{\partial (V)}{\partial t} + \rho (V \nabla) V = -\operatorname{grad}(p) + \operatorname{div}(\tau); & (2) \\ \frac{\partial (\rho H)}{\partial t} + \nabla(\rho V H) - \nabla \left(\frac{\lambda}{c_p} \nabla(h) \right) = \frac{\partial p}{\partial \tau}; & (3) \\ p = (p, T). & (4) \end{cases}$$

В уравнениях (1) – (4) приняты следующие обозначения: t – текущее время; ρ – плотность жидкости; V – модуль вектора скорости; P, T – давление и температура; $H = h + |V|^2/2$ – энтальпия торможения; $h = c_p T$ – удельная статическая энтальпия; c_p, λ – удельная изобарная теплоемкость и коэффициент теплопроводности; τ – обобщенный тензор напряжений.

В частном случае, если температура жидкости постоянна, уравнение (4) можно исключить из этой системы.

В настоящее время разработано большое количество численных методов для решения систем дифференциальных уравнений в частных производных, однако широкое распространение получили лишь три метода: метод конечных разностей, метод конечных объемов и метод конечных элементов. Наиболее высокой устойчивостью обладает метод конечных объемов, поэтому его чаще используют для решения подобных задач [20]. Его суть заключается в замене бесконечно малого объема рассматриваемой жидкости на расчетные ячейки, имеющие конечный размер. Совокупность всех расчетных ячеек расчетной области называют «расчётной сеткой». Системы уравнений (1) – (4) записываются для каждой расчетной ячейки.

Как известно, турбулентные течения состоят из большого множества вихревых образований, эти образования могут иметь различные размеры. Таким образом, для достоверного расчета турбулентного течения расчетные ячейки должны иметь размер меньше, чем размер самого маленького вихревого образования, это приводит к большому количеству расчетных ячеек, что увеличивает время расчета.

С целью сокращения времени расчета, расчетную сетку строят из крупных ячеек, а характеристики турбулентного потока определяют, вводя дополнительные уравнения. Так, например, Рейнольдсом был предложен метод, в котором значения пульсации давления и скорости для каждой из точек турбулентного течения осредняются. С учетом осредненных параметров образуется новая система уравнений (1) – (4) в виде:

$$\nabla \cdot V = 0, \quad (5)$$

$$\frac{dV}{dt} + (V \cdot \nabla)V = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu_{eff}}{\rho} \nabla^2 v + div(\Pi), \quad (6)$$

где V – вектор скорости; p – абсолютное давление; ρ – плотность; $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ – эффективная вязкость; μ – динамическая вязкость жидкости; μ_t – турбулентная вязкость; Π – тензор рейнольдсовых напряжений.

При нахождении тензора рейнольдсовых напряжений появляется шесть новых неизвестных, для уменьшения которых, как правило, используют гипотезу Буссинеска. Гипотеза предполагает для расчета использовать понятие «турбулентная вязкость», которая не является свойством жидкости, а характеризует режим ее движения и изменяется по времени и координате. Такой подход является наиболее развитым аппаратом численных решений. В иностранной литературе он обозначается RANS (Reynolds Averaged Navier – Stokes) [21]. Турбулентные касательные напряжения можно найти, если будет известна зависимость от определяющих факторов. Такого рода зависимости называют моделями турбулентной вязкости (или просто моделями турбулентности). При моделировании интенсивного вихревого потока, ограниченного стенкой, применение стандартной модели k – ϵ связано с большой погрешностью расчетов – занижается скорость турбулентного рассеяния ϵ и поэтому переоцениваются величины турбулентной кинетической энергии k и вихревой вязкости. Модели турбулентных замыканий Renormalization group (RNG) k – ϵ и Shear-stress transport (SST) k – ω – более реалистичны для моделирования турбулентной вязкости и лучше подходят для моделирования течения в вихревом гидродiode. Модели типа Reynolds stress models (RSM), в которых не используются формулировки изотропной турбулентной вязкости, также подходят для моделирования закрученных течений [22].

По результатам проведенных исследований в работе [23], авторами установлено, что для вихревых гидродиодов моделирование замыкания турбулентности с применением моделей SST k – ω и RSM более точно отражает физику диодного потока (по сравнению с расчетами по модели RNG k – ϵ). При моделировании вихревых потоков с применением модели RSM требуется значительно большее время расчета, при этом точность расчетов по модели RSM сравнима с точностью расчетов по модели SST k – ω . Поэтому в данной работе для моделирования течения жидкости в вихревом гидродiode была выбрана модель турбулентности SST k – ω .

Для изучения рабочих процессов, происходящих в рабочей камере вихревого гидродиода, были созданы модели вычислительной гидродинамики (CFD) с использованием кода FLUENT CFD [24, 25]. Для моделирования течения жидкости в проточной части вихревого гидродиода использовался коммерческий CFD-код ANSYS FLUENT, в котором реализована модель турбулентности SST k – ω .

Геометрия проточной части вихревого гидродиода моделировалась с помощью программы ANSYS ICEM CFD. Построение расчетной сетки заключается в разбиении общей расчетной области на большое количество расчетных ячеек. Из возможных методов построения расчетной сетки, которые предоставляет ANSYS ICEM CFD, был выбран метод построения Tetrahedrons, предполагающий объемную неструктурированную расчетную сетку с типом ячеек в виде тетраэдров.

С целью оценки качества полученной сетки была проведена проверка сеточной сходимости. В качестве оценочного параметра использовался расход жидкости при постоянном перепаде давления на гидродiode. Результат анализа чувствительности расчетной сетки представлен на рисунке 2. Анализ показал, что с уменьшением размера расчетных ячеек, а следовательно с увеличением их количества, расход жидкости сначала уменьшается, потом возрастает, а затем стабилизируется. Стабилизация расхода наблюдается в диапазоне от 461 830 до 714 784 ячеек. Таким образом, для дальнейших расчетов была использована сетка с количеством ячеек не менее 700 000 элементов. Общий вид расчетной сетки представлен на рисунке 3.

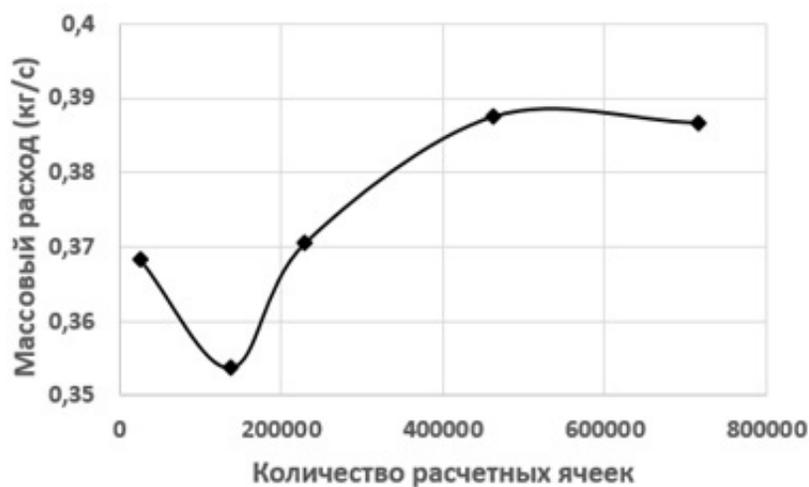


Рисунок 2 – Результат анализа чувствительности расчетной сетки
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – The result of the sensitivity analysis of the calculated grid
Source: compiled by the authors.

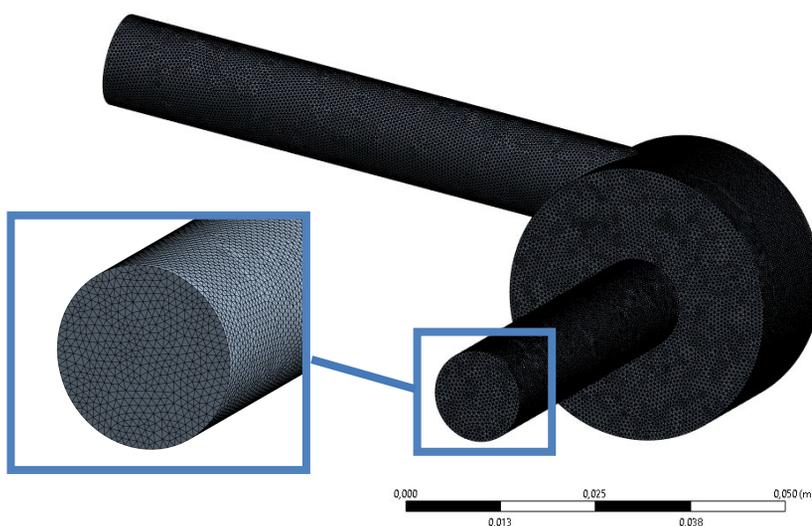


Рисунок 3 – Расчетная сетка (общий вид)
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Calculation grid (general view)
Source: compiled by the authors.

Для правильности выполнения расчетов были обозначены граничные поверхности: поверхность входа (Inlet) потока жидкости в расчетную область, поверхность выхода (Outlet) из расчетной модели и внешние поверхности, в которых жидкость соприкасается с твердыми стенками гидродиода (Wall). На

рисунке 4 представлены обозначения граничных поверхностей расчётной модели в прямом направлении. Для расчета в обратном направлении поверхности входа (Inlet) потока жидкости в расчетную область и поверхности выхода (Outlet) из расчетной модели менялись местами.

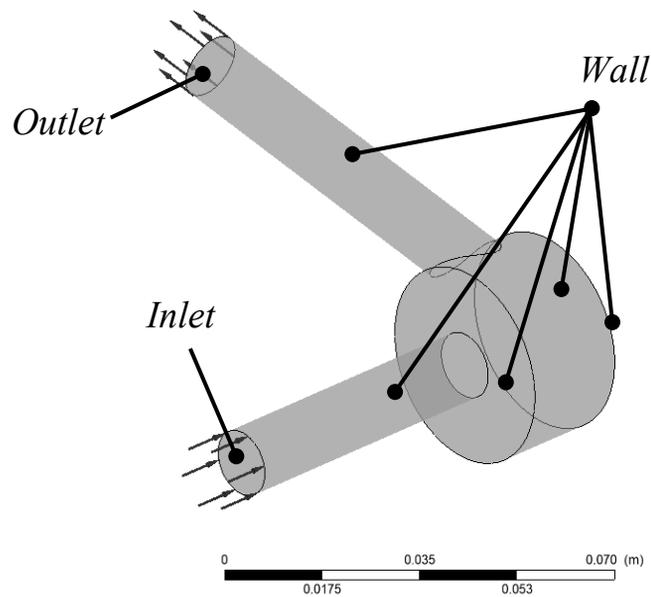


Рисунок 4 – Обозначение граничных поверхностей расчётной модели в прямом направлении
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Designation of the boundary surfaces of the computational model in the forward direction
Source: compiled by the authors.

При расчете трехмерного течения жидкости в гидродиоде задавались следующие начальные и граничные условия:

- на твердые стенки задавались граничные условия прилипания жидкости (скорость равна нулю);
- граничные условия на входе (Inlet) в расчетную область;
- граничные условия на выходе (Outlet) из расчетной области;
- модель турбулентности;
- рабочие тела;
- объемные отношения жидкости и ее паров

на входе. Для учета расчета кавитационных явлений зада:

- размер пузырьков;
- давление насыщенных паров при заданной температуре.

В качестве граничных условий на входе (Inlet) в расчетную область были приняты расходы, полученные в ходе эксперимента (см. ниже), а в качестве граничных условий на выходе (Outlet) из расчетной области были приняты измеренные манометром давления М2 (на выходящем патрубке), данные представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1
Граничные условия при прямом течении
Источник: составлено авторами.

Table 1
Boundary conditions for direct flow
Source: compiled by the author.

Расход на входе, кг/с	Избыточное давление на выходе, Па
0,280	130 000
0,264	150 000
0,250	170 000
0,236	190 000
0,217	210 000

Таблица 2

Граничные условия при обратном течении
Источник: составлено авторами.

Table 2

Boundary conditions for reverse flow
Source: compiled by the author.

Расход на входе, кг/с	Избыточное давление на выходе, Па
0,275	130 000
0,261	150 000
0,256	170 000
0,247	190 000
0,230	210 000

Модель режима течения была выбрана SST $k-\omega$.

В работе [10] авторы установили, что для вихревых диодов вязкость рабочей жидкости мало оказывает влияния на технические параметры гидродиода, поэтому в качестве рабочей жидкости были выбраны вода (Water) и пары воды (Varour).

Течение жидкости в большинстве гидравлических систем происходит, как правило, при постоянной рабочей температуре, поэтому была выбрана модель изотермическая (Isotermal). Температура принималась равной 20 °С.

На входе в расчетную область задаем объемное отношение воды 100%, а паров воды 0%.

При проведении расчета, с учетом кавитационных явлений, задавался диаметральный размер пузырька пара воды, равный $2 \cdot 10^{-6}$ м. Давление насыщенных паров при температуре 20 °С принималось 2338.8 Па.

Для моделирования течения жидкости в вихревом гидродиоде использовался метод расчета стационарных течений (без необходимости назначения начальных условий). Алгоритм SIMPLE использовался для связи давления и скорости. Перед запуском расчета в модуле Fluid Flow (CFX) задавалось количество итераций, равное 1000, и критерий сходимости, равный $1 \cdot 10^{-6}$ для каждого из решаемых уравнений.

Для верификации результатов численного эксперимента были проведены исследовательские испытания. Для этого был изготовлен экспериментальный образец вихревого гидродиода и стенд для его исследования. На рисунке 5, а представлена трехмерная модель проточной части вихревого гидродиода с указа-

нием основных геометрических размеров. На рисунке 5, б показан изготовленный экспериментальный образец гидродиода. Проточная часть экспериментального образца гидродиода имеет такие же геометрические размеры, как и математическая модель: диаметр вихревой камеры, $D=36$ мм; высота вихревой камеры, $H=20$ мм; диаметр диаметрального патрубка, $d_1=12$ мм; диаметр тангенциального патрубка, $d_2=12$ мм. Экспериментальный образец гидродиода изготовлен из стали марки Ст3 и имеет увеличенные толщины стенок, что позволяет работать с большим давлением рабочей жидкости при проведении исследовательских испытаний.

На рисунке 6, а показана гидравлическая схема стенда для проведения исследовательских испытаний, а на рисунке 6, б фотография стенда. На гидравлической схеме (см. рисунок 6, а) приняты следующие сокращения: КР1 – кран магистрального водопровода; М1 – входной манометр; М2 – выходной манометр; ВГД – вихревой гидродиод; ЕМ1 – мерная ёмкость; КР2 – кран регулирования расхода; КР3 – сливной кран; Б1 – жидкостной бак.

В качестве источника жидкости был выбран магистральный водопровод, который подключался к крану 6 (см. рисунок 6, б). Расходно-напорная характеристика магистрального водопровода позволила провести весь комплекс запланированных исследовательских испытаний. В качестве прибора для измерения входного давления был взят манометр с предельным давлением 6 кг/см² и классом точности 1, для измерения давления в выходном патрубке использовался манометр с предельным давлением 2,5 кг/см² и классом точности 1. Для определения расхода жидкости использовался объемный метод.

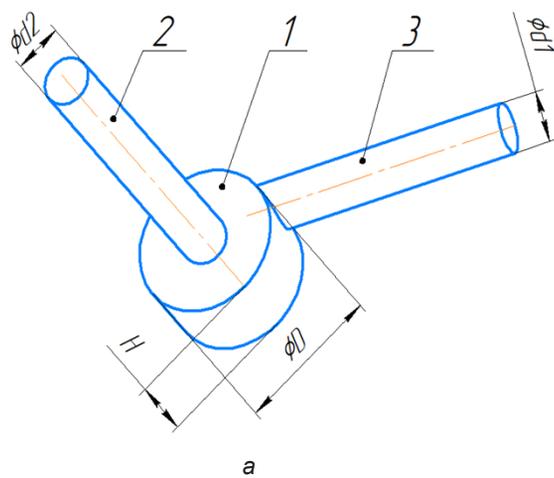


Рисунок 5 – Трехмерная модель проточной части вихревого гидродиода (а) и изготовленный экспериментальный образец гидродиода (б):
1 – вихревая камера; 2 – радиальная трубка; 3 – тангенциальная трубка
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – A three-dimensional model of the flow part of a vortex hydrodiode (a) and a manufactured experimental sample of a hydrodiode (b):
1 – a vortex chamber; 2 – a radial tube; 3 – a tangential tube
Source: compiled by the authors.

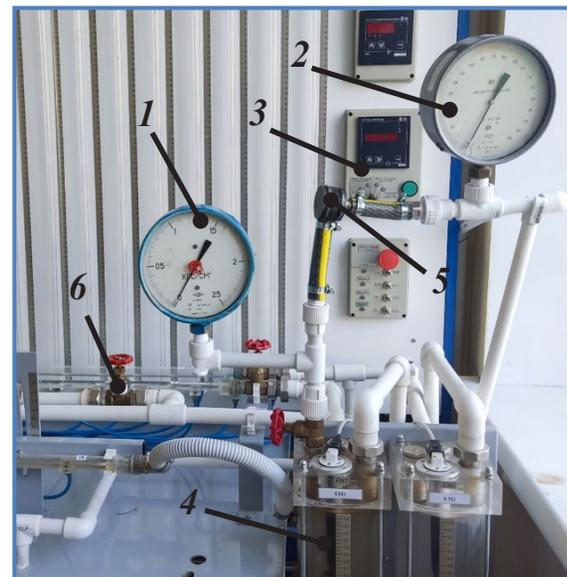
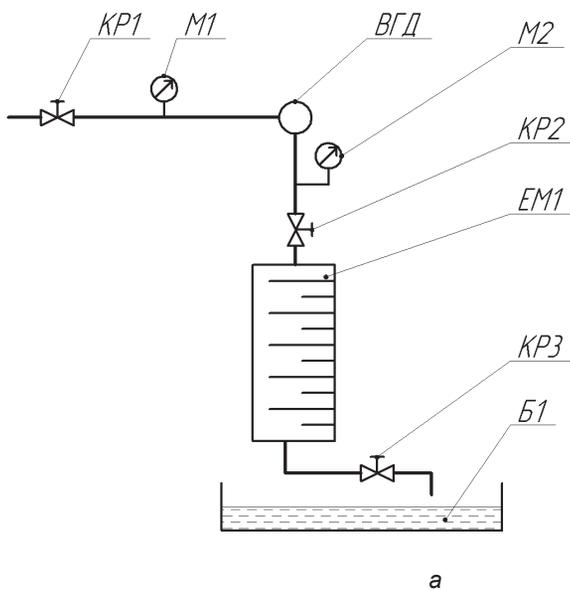


Рисунок 6 – Гидравлическая схема экспериментального стенда (а) и фотография экспериментального стенда (б):
1 – выходной манометр (М2); 2 – входной манометр (М1); 3 – секундомер модели СИ-8 «Овен»;
4 – мерная емкость (ЕМ1); 5 – вихревой гидродиод (ВГД); 6 – кран регулирования расхода (КР1)
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Hydraulic diagram of the experimental stand (a) and a photo of the experimental stand (b):
1 – output pressure gauge (M2); 2 – input pressure gauge (M1); 3 – stopwatch of SI-8 Oven model;
4 – dimensional container (EM1); 5 – vortex hydrodiode (IOP); 6 – flow control valve (KR1)
Source: compiled by the authors.

Жидкость после гидродиода поступала в цилиндрическую емкость, объемом 3 л, с установленными поплавковыми датчиками уровня. Для автоматической фиксации заполнения емкости водой использовался секундомер модели СИ-8 «Овен» с ценой деления 0,01 с и погрешностью измерений $\pm 0,5\%$. Начало и конец отсчета определялись сигналами от поплавковых датчиков уровня, расположенных в мерной емкости. Замер времени между срабатыванием нижнего и верхнего датчиков происходил автоматически, при этом контрольный объем жидкости составлял два литра.

Поскольку вихревые гидродиоды в виду их особенностей работы рекомендуется применять в гидроприводах малой мощности [10], то течение в гидравлическом диоде во время исследовательских испытаний моделировалось при небольших давлениях рабочей жидкости. Давление на выходе из гидродиода, определяемое по манометру М2, устанавливалось равным от 130 до 210 кПа, с шагом 20 кПа. Для каждого значения давления определялся расход жидкости и значение манометра М1. Для исключения случайной ошибки при проведении исследовательских испытаний измерения одного параметра проводились не менее пяти раз. Результаты экспериментов представлены выше, в таблицах 1 и 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Одним из основных параметров гидродиода, определяющих его работу, является диодность – это технический параметр гидродиода, который определяет его конструктивные и эксплуатационные особенности. Диодность устанавливается как отношение расходов через гидродиод в прямом $Q_{\text{прям}}$ и обратном $Q_{\text{обр}}$ направлениях (при одинаковых потерях удельной механической энергии) или как отношение коэффициентов гидравлического сопротивления проточной части гидродиода при течении жидкости в обратном $\xi_{\text{обр}}$ и прямом $\xi_{\text{прям}}$ направлениях [26, 27]. Для удобства анализа выберем второй вариант расчета диодности гидродиода. На рисунке 7 представлены зависимости диодности от давления жидкости на выходе из гидродиода, полученные по результатам полиномиальной аппроксимации экспериментальных данных и данных численного эксперимента с учётом кавитации и без учёта кавитации. Максимальная погрешность экспериментальных и расчетных данных составила 8,22%, при общей аппаратной погрешности измерения 2,92%. Максимальное отклонение

полиномиальной аппроксимации результатов расчетов, полученных с использованием математической модели от экспериментальных данных, составило не более 5,6% при давлении 210 кПа, что подтверждает адекватность разработанной математической модели течения жидкости в вихревом гидродиоде.

Проводя анализ графиков диодности, рассчитанных с использованием модуля учета кавитации и без учета кавитации, можно сказать, что они практически не отличаются (рисунок 7), следовательно, влияние кавитации при числах Рейнолдса не оказывают существенного влияния на количественные значения параметров вихревого гидродиода.

Как было сказано выше, работа вихревого гидродиода может осуществляться и при больших давлениях рабочей жидкости, что может вызвать кавитационные явления. Поскольку ранее была подтверждена адекватность разработанной математической модели течения жидкости в вихревом гидродиоде, то дальнейшие исследования будут проходить с ее использованием. Для анализа влияния кавитации на картину течения жидкости в вихревом гидродиоде была проведена серия расчетов. В качестве граничных условий на входе в гидродиод было выбрано статическое давление, равное 800 кПа, на выходе задано атмосферное давление как для прямого, так и обратного направления течения жидкости. Все остальные начальные и граничные условия расчета оставались без изменений. Результаты расчета представлены в таблице 3.

Как видно из таблицы 3, при увеличении числа Рейнолдса до 200 000 кавитация начинает оказывать существенное влияние на картину течения, а также на количественные значения расходов и диодности. Необходимо отметить, что существенно отличаются расчетные значения массового расхода в обратном направлении течения при учете кавитации и без учета, отличие составляет примерно 17%. Отличаются и значения диодности на те же 17%.

Рассмотрим качественную картину течения жидкости в проточной части гидродиода при учете кавитации и без учета. На рисунке 8 показано распределение полей давления при прямом течении жидкости без учета кавитации (рисунок 8, а) и с учетом кавитации (рисунок 8, б). Из рисунка видно, что при прямом направлении течения без учета кавитации распределение давлений по всему объему носит более равномерный характер, чем для режима с учетом кавитации.

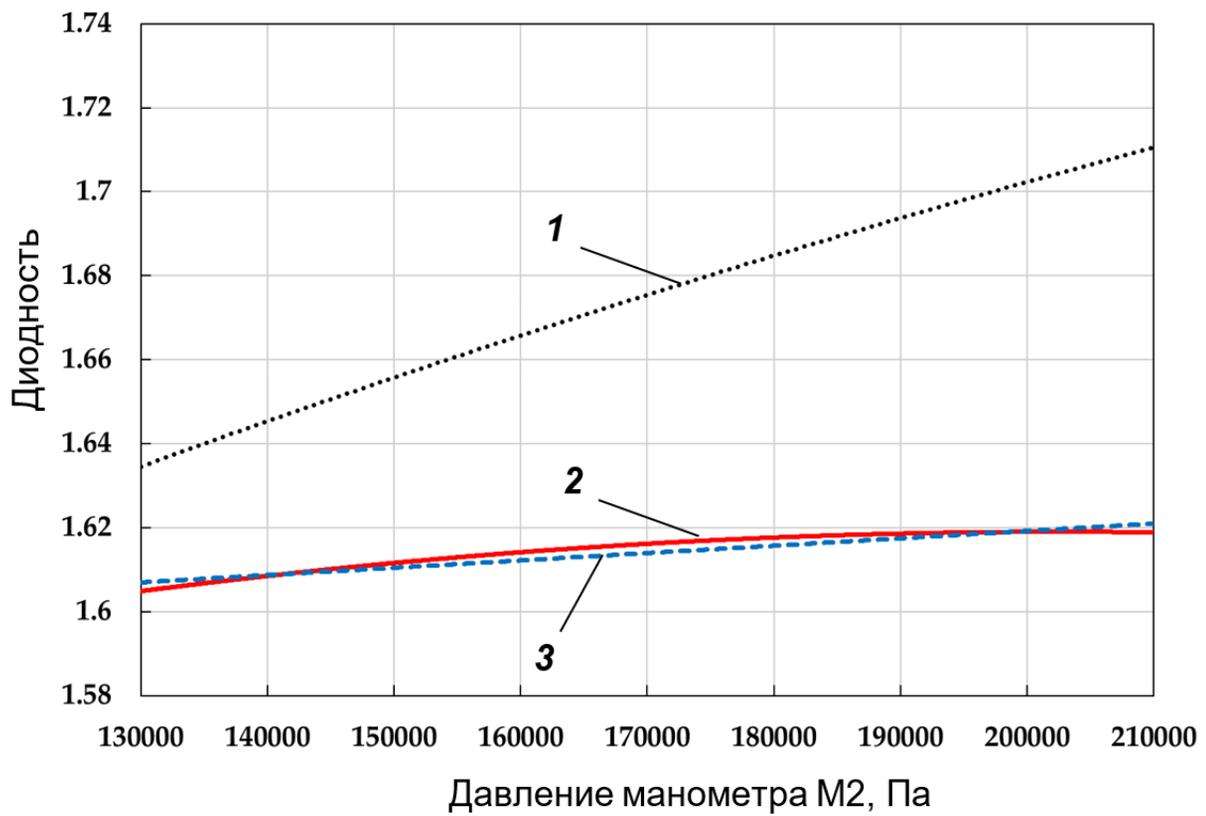


Рисунок 7 – Результаты численного эксперимента и исследовательских испытаний:
 1 – полиномиальная аппроксимация экспериментальных данных;
 2 – полиномиальная аппроксимация данных численного эксперимента с учетом кавитации;
 3 – полиномиальная аппроксимация данных численного эксперимента без учета кавитации
 Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Results of numerical experiment and research tests:
 1 – polynomial approximation of experimental data;
 2 – polynomial approximation of numerical experiment data taking into account cavitation;
 3 – polynomial approximation of numerical experiment data without cavitation
 Source: compiled by the authors.

Таблица 3
 Результаты расчета при повышенном перепаде давления
 Источник: составлено авторами.

Table 3
 Calculation results for increased pressure drop
 Source: compiled by the author.

Учет кавитации	Массовый расход в прямом направлении, кг/с	Массовый расход в обратном направлении, кг/с	Диодность по расходу
Без учета	2,43645	1,80203	1,352
С учетом	2,43534	1,48301	1,642

В последнем случае наблюдается уменьшение давления до давления насыщенных паров при данной температуре. Это особенно заметно на входном участке тангенциальной трубки. Это происходит за счет увеличения центробежных сил, которые прижимают радиальный вихрь, образованный в вихревой камере, к внешним стенкам камеры. В результате происходит вход жидкости в тангенциальную трубку с прижимом к нижней стенке, а это приводит к падению давления на верхней части тангенциальной трубки и образованию кавитации. Более детальную картину процесса кавитации можно увидеть на рисунке 10, а, где показано распределение концентрации пара при прямом течении. Из рисунка видно, что местом нарушения сплошности потока является верхняя входная область тангенциальной камеры.

На рисунке 9 показаны распределение полей давления при обратном течении жидкости без учета кавитации (рисунок 9, а) и с учетом кавитации (рисунок 9, б). В обоих случаях падение давления наблюдается при входе жид-

кости в радиальную трубку. Распределение давлений без учета кавитации носит более равномерный характер. В случае с учетом кавитации, по всему входному сечению радиальной трубки, мы наблюдаем резкое падение давления, равное давлению насыщенных паров при данной температуре, что приводит к возникновению кавитации.

На рисунке 10, б показано распределение концентрации пара при обратном течении. На рисунке видно, что кавитация охватывает практически весь входной объем радиальной трубки и частично захватывает центральную часть вихревой камеры. Это происходит вследствие интенсивной закрутки основного потока, в результате давление в центре вихревой камеры сильно падает и перед входом в радиальную трубку у оси образуется парогазовый жгут. Такая картина течения при обратном потоке объясняет существенное различие массового расхода в обратном направлении и диодности при расчетах с учетом кавитации и без учета (см. таблицу 3).

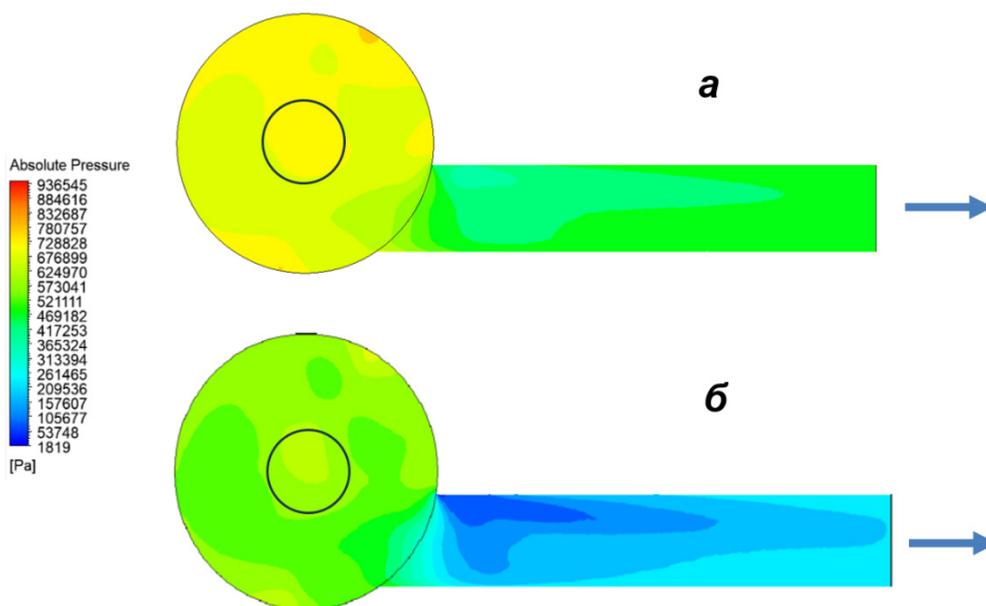


Рисунок 8 – Распределение полей давления при прямом течении жидкости без учета кавитации (а) и с учетом кавитации (б)
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Distribution of pressure fields in the direct flow of a liquid without cavitation (a) and taking into account cavitation (b)
Source: compiled by the authors.

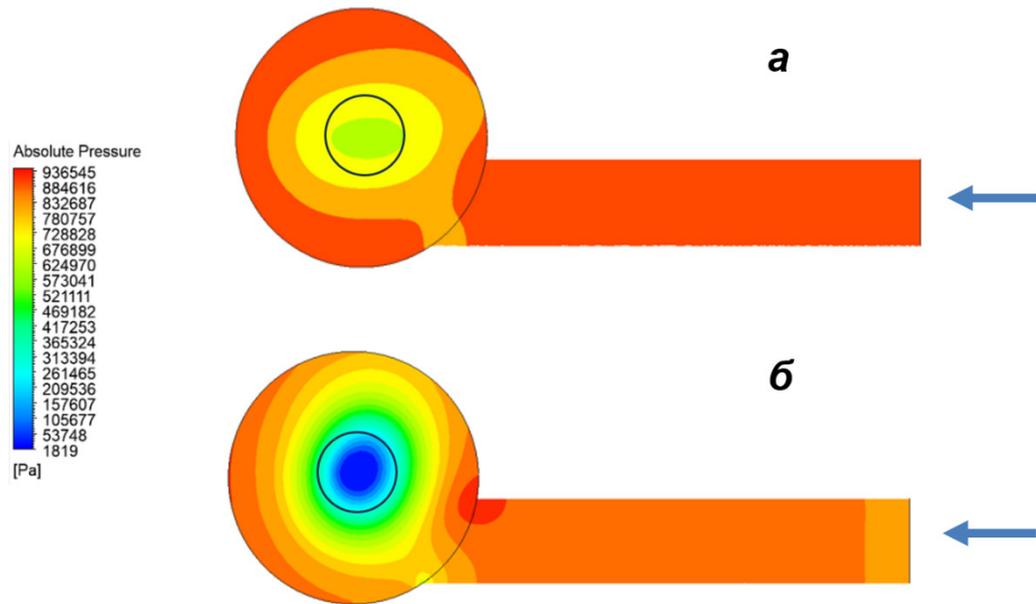


Рисунок 9 – Распределение полей давления при обратном течении жидкости без учета кавитации (а) и с учетом кавитации (б)
 Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Distribution of pressure fields during the reverse flow of the liquid without cavitation (a) and taking into account cavitation (b)
 Source: compiled by the authors.

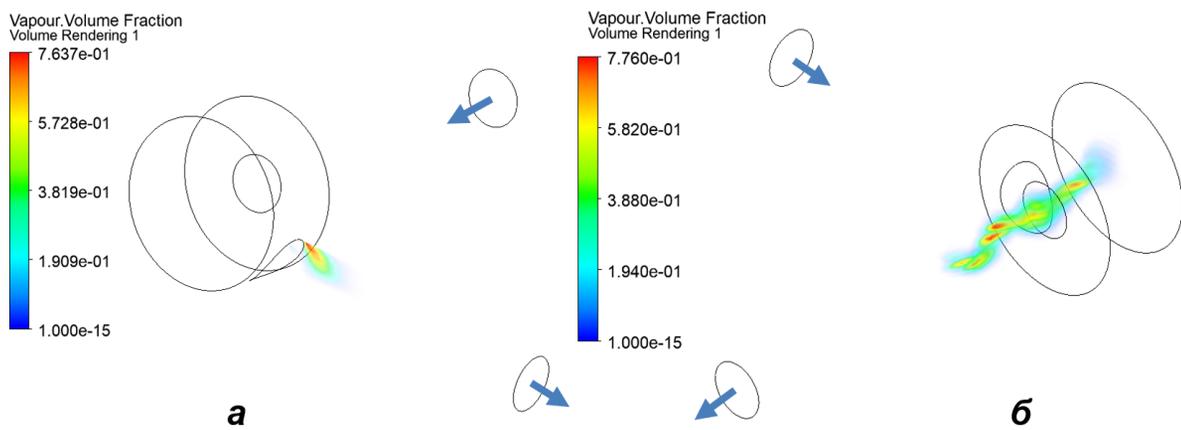


Рисунок 10 – Распределение концентрации пара при прямом течении (а) и обратном течении (б) с учетом кавитации
 Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Distribution of vapor concentration at forward flow (a) and reverse flow (b), taking into account cavitation
 Source: compiled by the authors.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для изучения рабочих процессов, происходящих в рабочей камере вихревого гидродиода, были разработаны модели вычислительной гидродинамики (CFD) с использованием кода FLUENT CFD. Для моделирования течения жидкости в проточной части вихревого гидродиода применялся коммерческий CFD-код ANSYS FLUENT.

По разработанным вычислительным моделям был проведен расчет течения жидкости в проточной части вихревого гидродиода для различных граничных условий с использованием модуля учета кавитации и без использования модуля учета кавитации.

Для верификации результатов численного эксперимента были проведены исследовательские испытания. Для этого был изготовлен экспериментальный образец вихревого гидродиода и стенд для его исследования.

Проведено сравнение результатов расчета течения жидкости в проточной части вихревого гидродиода с учетом кавитационных явлений и без учета кавитационных явлений с результатами исследовательских испытаний. По результатам сравнения было установлено, что максимальная погрешность экспериментальных и расчетных данных составила 8,22%, при общей аппаратной погрешности измерения 2,92%. Максимальное отклонение полиномиальной аппроксимации результатов расчетов, полученных с использованием математической модели от экспериментальных данных, составило не более 5,6% при давлении 210 кПа, что подтверждает адекватность разработанной математической модели течения жидкости в вихревом гидродиоде. Значения давлений и диодности при расчетах с учетом кавитации и без учета кавитации практически не отличаются, таким образом, влияние кавитации при числах Рейнольдса $Re < 30000$ не оказывают существенного влияния на количественные значения параметров вихревого гидродиода и модуль расчета кавитации можно не использовать. Однако при более высоких значениях чисел Рейнольдса в рабочей полости вихревого гидродиода появляются кавитации и расчетные значения параметров гидродиода без учета кавитации и с учетом кавитации существенно отличаются. Следовательно, при расчете высокоскоростных течений необходимо использовать модуль расчёта кавитации.

Проведенный анализ влияния кавитации на рабочие процессы вихревого гидродиода показал, что при прямом направлении течения

кавитация несущественно оказывает влияние на параметры гидродиода и место ее образования – верхнюю входную область тангенциальной камеры. При обратном направлении потока кавитация оказывает существенное влияние на картину течения жидкости в вихревом гидродиоде. Кавитация охватывает практически весь входной объем радиальной трубки и частично захватывает центральную часть вихревой камеры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Коробкин В.А., Котлобай А.Я., Котлобай А.А., Тамело В.Ф. О перспективных направлениях создания гидравлических агрегатов приводов строительных и дорожных машин // Наука и техника. 2012. № 6. С. 71–76. (Белоруссия).
2. Лагерева А.В., Лагерева И.А. Проектирование и исследование приводных шарнирных соединений звеньев гидравлических манипуляционных систем мобильных транспортно-технологических машин // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2018. №1. С. 14–30. DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-01-14-30.
3. Подъемно-транспортное оборудование для обработки крупнотоннажных контейнеров: монография // Зуб И.В., Ежов Ю.Е., Стенин Н.Н. СПб.: ФГБОУ ВПО ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2021. 267 с.
4. Гринчар Н.Г., Шошин А.С., Чалова М.Ю. Сравнение безредукторного и редукторного гидроприводов машин транспортного строительства // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. № 2. С. 103–109. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-02-103-109.
5. Юдин Р.В., Попиков П.И., Усков В.И., Платонов А.А., Попиков В.П., Канищев Д.А. Математическая модель рабочих процессов бесчокерного трелевочного захвата с энергосберегающим гидроприводом // Resour. Technol. 2022. № 1. С. 72–86. DOI: 10.15393/j2.art.2022.6023.
6. Гринчар Н.Г., Федасов Д.С., Чалова М.Ю. Расчетно-динамическая модель гидропривода рабочих органов щетнеочистительных машин // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. № 2.
7. Вагин В.С., Курочкин А.И. Демпфирование динамических нагрузок передвижных проходческих подъемных установок с безредукторным высокомоментным гидроприводом // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2013. № 2 (42). С. 12–15.
8. Бадалин Д.С., Егоров И.С., Москвитин Е.А., Феденков В.В., Шаповалов А.Б. Перспективы применения распределительной аппаратуры 3-го поколения в гидроприводе УП ПТТ // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. № 6. С. 88–96. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-6-88-96.
9. Ефремова К.Д., Пильгунов В.Н. Анализ эффективности дроссельного регулирования скорости в объемных гидроприводах // / Машиностроение и компьютерные технологии. 2019. № 2. С. 13–33. DOI: 10.24108/0219.0001455.

10. Цветков И.В., Кайгородов С.Ю., Павлюченко Е.А., Кужбанов А.К. Разработка и исследование вихревого гидродиода повышенной диодности для специальной техники военного назначения // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 5-6 (155–156). С. 131–142.
11. Кайгородов С.Ю. Модель рабочего процесса механизма подъема и опускания стрелы с дополнительным демпфером в виде гидродиода // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 2. С. 52–57.
12. Varaha P. Sarvothaman, Shekhar R. Kulkarni, Janardhanraj Subburaj, Swetha L. Hariharan, Vijay K. Velisoju, Pedro Castaño, Paolo Guida, Deoras M. Prabhudharwadkar, William L. Roberts Evaluating performance of vortex-diode based hydrodynamic cavitation device scale and pressure drop using coumarin dosimetry. *Chemical Engineering Journal*. 2024. V. 481. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148593>.
13. Qi Liu, Xinyang Qi, Zuchao Zhu, Yongcao Gao, Guangwu Yang, Chuancang Li, Luo Sun Investigation of cavitation characteristics in an aircraft centrifugal fuel pump. 2024. Vol. 96. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102521>.
14. Хафизов Ф.Ш., Александров А.А., Суцев С.П., Абуталипова Е.М., Хафизов И.Ф. Моделирование и метод расчета кавитационно-вихревого аппарата // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2017. № 1. С. 78–91. DOI: 10.18698/1812-3368-2017-1-78-91.
15. Tsutsumi K., Watanabe S., Tsuda S., Yamaguchi T. Cavitation simulation of automotive torque converter using a homogeneous cavitation model // *European Journal of Mechanics – B/Fluids*. 2017. Vol. 61. No. 2. P. 263–270. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2016.09.001
16. Zhang G., Zhang D., Ge M., Petkovšek M., Coutier-Delgosha O. Experimental investigation of three distinct mechanisms for the transition from sheet to cloud cavitation // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. Vol. 197. 123372. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123372
17. Gu Y., Zhang J., Yu S., Mou C., Li Z., He C., Wu D., Mou J., Ren Y. Unsteady numerical simulation method of hydrofoil surface cavitation // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2022. Vol. 228. 107490. doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107490
18. Zhang S., Qian Z., Ji B. Estimation of cavitation erosion area in unsteady cavitating flows using a modified approach // *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 262. 112229. doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112229
19. Коптев А.В. Как разрешить 3D-уравнения Навье Стокса // Известия РГПУ им. А. И. Герцена. 2015. № 173. С.7–15.
20. Chen S., Li X. Finite volume element methods for a multi-dimensional fracture model. *J. Comput. Appl. Math.*, 2022. 406, Article 114028
21. Walters D. K., Cokljat D. A. Three-Equation Eddy-Viscosity Model for Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulations of Transitional Flows II *Journal of Fluids Engineering*. 2008. Vol. 130. No. 12. pp. 28. 11.
22. Pandare A., Ranade V.V. Flow in vortex diodes // *Chemical Engineering Research and Design*. 2015. V. 102. P. 274–285.
23. Pavlyuchenko E.A., Grigoriev A.V., Kaigorodov S.Yu., Sokirko K.N. Aspects of the Numerical Simulation of High-Diode Vortex Hydrodiodes // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2023. Vol. 59, no. 4. P. 347–352. DOI: 10.1007/s10556-023-01247-9
24. Kulkarni, A.A., Ranade, V.V., Rajeev, R. and Koganti, S.B. CFD simulation of flow in vortex diodes // *AIChE J.* 2008. V. 54: P. 1139–1152. <https://doi.org/10.1002/aic.11439>
25. Matsson, John E. *An Introduction to Ansys Fluent 2023*. Sdc Publications, 2023.
26. Yoder, G.L., Jr. *Vortex Diode Analysis and Testing for Fluoride Salt-Cooled High-Temperature Reactors* / G.L. Yoder, Y. Elcassadgi, G. De Leon // UT-Battelle, 2011. 40 p
27. Спиридонов Е.К., Хабарова Д.Ф. Расчетная модель и характеристики бесклапанного поршневого насоса одностороннего действия // Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение. 2014. № 4. С. 13–22.

REFERENCES

1. Korobkin V.A., Kotlobaj A.YA., Kotlobaj A.A., Tanelo V.F. About perspective directions of creation of hydraulic aggregates of drives of construction and road machines. *Science & Technique*. 2012; 6: 71–76.
2. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Design and study of drive swivel joints for hydraulic manipulation systems of mobile transport-technological machines. «*Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*» («Scientific and Technical Journal of Bryansk State University», Scientific and Technical BSU Journal). 2018; 1: 4–30. (in Russ.) DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-01-14-30
3. Zub I.V., Ezhov YU.E., Stenin N.N. Lifting and transportation equipment for handling large-tonnage containers. Monograph. St. Petersburg, 2021: 267. (in Russ.)
4. Grinchar N.G., SHoshin A.S., CHalova M.YU. Comparison of reduced and geared hydraulic drives of transport construction machines. «*Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*» («Scientific and Technical Journal of Bryansk State University», Scientific and Technical BSU Journal). 2022; 2: 103–109. (in Russ.) DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-02-103-109
5. YUdin R.V., Popikov P.I., Uskov V.I., Platonov A.A., Popikov V.P., Kanishchev D.A. Mathematical model of working processes of a chokerless hauling grip with an energy-saving hydraulic drive. *Resources and Technology*. 2022; 19 (1): 72–86. (in Russ.) DOI: 10.15393/j2.art.2022.6023
6. Grinchar N.G., Fedasov D.S., CHalova M.YU. Computational and dynamic model of hydraulic drive of working bodies of crushed stone cleaning machines. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU)*. 2022; 2. (in Russ.)
7. Vagin V.S., Kurochkin A.I. Damping of dynamic loads of mobile tunneling hoisting units with gearless high-torque hydraulic drives. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2013; 2 (42). (in Russ.)

8. Badalin D.S., Egorov I.S., Moskvitin E.A., Fedenkov V.V., SHapovalov A.B. Prospects of application of the 3rd generation distributive equipment in hydraulic drive of UP PTT. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU)*. 2023; 6: 88–96. (in Russ.) DOI: 10.24412/2071-6168-2023-6-88-96
9. Efremova K.D., Pil'gunov V.N. Analysis of the Throttle Speed Control Efficiency in Volumetric Hydraulic Drives. *Mechanical Engineering and Computer Science*. 2019; 02: 13–33. (in Russ.) DOI: 10.24108/0219.0001455.
10. Cvetkov I.V., Kajgorodov S.YU., Pavlyuchenko E.A., Kuzhbanov A.K. Development and research of vortex hydrodiode of increased diodelectricity for special military equipment. *Military Enginry. Ser. 16. technical means of countering terrorism*. 2021; 6 (155–156): 131–142. (in Russ.)
11. Kaigorodov S. Yu. The model of working process of the boom lifting and lowering mechanism with an additional damper in the form of hydrodiode. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation Rocket and Power Engineering*. 2023; Vol. 7, No. 2: 52–57. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-2-52-57
12. Varaha P. Sarvothaman, Shekhar R. Kulkarni, Janardhanraj Subburaj, Swetha L. Hariharan, Vijay K. Velisoju, Pedro Castaño, Paolo Guida, Deoras M. Prabhudharwadkar, William L. Roberts Evaluating performance of vortex-diode based hydrodynamic cavitation device scale and pressure drop using coumarin dosimetry. *Chemical Engineering Journal*. 2024; 481. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148593>.
13. Qi Liu, Xinyang Qi, Zuchao Zhu, Yongcao Gao, Guangwu Yang, Chuancang Li, Luo Sun Investigation of cavitation characteristics in an aircraft centrifugal fuel pump. 2024. V. 96. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102521>.
14. Hafizov F.SH., Aleksandrov A.A., Sushchev S.P., Abutalipova E.M., Hafizov I.F. Simulation and Calculation Method of the Vortex Cavitation Device. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*. 2017; 1: 78–91. (in Russ.) DOI: 10.18698/1812-3368-2017-1-78-91
15. Tsutsumi K., Watanabe S., Tsuda S., Yamaguchi T. Cavitation simulation of automotive torque converter using a homogeneous cavitation model. *European Journal of Mechanics – B/Fluids*. 2017; Vol. 61. No. 2: 263–270. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2016.09.001
16. Zhang G., Zhang D., Ge M., Petkovšek M., Coutier-Delgosha O. Experimental investigation of three distinct mechanisms for the transition from sheet to cloud cavitation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022; Vol. 197. 123372. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123372
17. Gu Y., Zhang J., Yu S., Mou C., Li Z., He C., Wu D., Mou J., Ren Y. Unsteady numerical simulation method of hydrofoil surface cavitation. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2022; 228. 107490. doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107490
18. Zhang S., Qian Z., Ji B. Estimation of cavitation erosion area in unsteady cavitating flows using a modified approach. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 262. 112229. doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112229
19. Koptev A.V. How to solve the 3D Navier Stokes equations. *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences*. 2015;173. 2015: 7–15. (in Russ.)
20. Chen S., Li X. Finite volume element methods for a multi-dimensional fracture model. *J. Comput. Appl. Math.*, 2022. 406, Article 114028
21. Walters D.K., Cokljat D.A. Three-Equation Eddy-Viscosity Model for Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulations of Transitional Flows II *Journal of Fluids Engineering*. 2008; 130. No. 12: 28. 11.
22. Pandare A., Ranade V.V. Flow in vortex diodes. *Chemical Engineering Research and Design*. 2015; 102: 274–285.
23. Pavlyuchenko E.A., Grigoriev A.V., Kaigorodov S.Yu., Sokirko K.N. Aspects of the Numerical Simulation of High-Diode Vortex Hydrodiodes. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2023; Vol. 59, no. 4: 347–352. DOI: 10.1007/s10556-023-01247-9
24. Kulkarni A.A., Ranade V.V., Rajeev R. and Koganti S.B. CFD simulation of flow in vortex diodes. *AIChE J*. 2008; 54: 1139–1152. <https://doi.org/10.1002/aic.11439>
25. Matsson John E. An Introduction to Ansys Fluent 2023. Sdc Publications, 2023.
26. Yoder G.L., Jr. Vortex Diode Analysis and Testing for Fluoride Salt-Colled High-Temperature Reactors. *UT-Battelle*. 2011: 40.
27. Spiridonov E.K., Habarova D.F. Calculating model and characteristics single action valveless piston pump. *Bulletin of the South Ural State University Series «Mechanical Engineering Industry»*. 2014; 14, no. 4: 13–22. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Сокирко К.Н. Выполнение работы по систематизации материала, проведение экспериментальных исследований, написание статьи.

Павлюченко Е.А. Постановка цели, задач, проведение численного эксперимента, написание текста статьи.

Лысенко Е.А. Получение данных для анализа, анализ результатов исследования и подготовка данных, проведение экспериментальных исследований, написание текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTIONS

Sokirko K.N. Work on systematisation of material, experimental research conducting, article writing.

Pavliuchenko E.A. Purposes and tasks statement, numerical experiment conducting, the text of the article writing.

Lysenko E.A. Data for analysis obtaining, research results analysing and data preparing, experimental studies conducting, the text of the article writing.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сокирко Ксения Николаевна – аспирант, ассистент кафедры «Гидромеханика и транспортные машины» Омского государственного технического университета (644050, г. Омск, пр. Мира, д. 11.), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-4108-7645>, **SPIN-код:** 3828-6375, e-mail: gaika-94@inbox.ru

Павлюченко Евгений Александрович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Гидромеханика и транспортные машины» Омского государственного технического университета (644050, г. Омск, пр. Мира, д. 11.), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6109-7449>, **SPIN-код:** 6223-7909, **Scopus Author ID:** 55956907000, **Researcher ID:** N-4395-2013, e-mail: hystonru@mail.ru

Лысенко Евгений Алексеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Гидромеханика и транспортные машины» Омского государственного технического университета (644050, г. Омск, пр. Мира, д. 11.), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7465-3360>, **SPIN-код:** 4506-1197, **Scopus Author ID:** 57190747837, **Researcher ID:** KEI-1385-2024, e-mail: Lysenkojo@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ksenia N. Sokirko – Postgraduate student, Assistant of the Hydromechanics and Transport Machines Department, Omsk State Technical University (11, Prospekt Mira, Omsk, 644050), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-4108-7645>, **SPIN-код:** 3828-6375, e-mail: gaika-94@inbox.ru

Pavliuchenko Evgenii A. – Cand. of Sci., Associate Professor of the Hydromechanics and Transport Machines Department, Omsk State Technical University (11, Prospekt Mira, Omsk, 644050), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6109-7449>, **SPIN-код:** 6223-7909, **Scopus Author ID:** 55956907000, **Researcher ID:** N-4395-2013, e-mail: hystonru@mail.ru

Lysenko Evgeny A. – Cand. of Sci., Associate Professor of the Hydromechanics and Transport Machines Department, Omsk State Technical University (11, Prospekt Mira, Omsk, 644050), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7465-3360>, **SPIN-код:** 4506-1197, **Scopus Author ID:** 57190747837, **Researcher ID:** KEI-1385-2024, e-mail: Lysenkojo@mail.ru

Научная статья

УДК 656.1

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-580-593>

EDN: FVTFZG



ОРГАНИЗАЦИЯ РЕГУЛЯРНЫХ ПЕРЕВОЗОК ПАССАЖИРОВ С УЧЕТОМ ОБРАЩЕНИЙ ГРАЖДАН И ДИСПЕТЧЕРСКОГО КОНТРОЛЯ

Л.С. Трофимова¹ ✉, Д.В. Гаврилин¹, А.С. Кабжамитова²

¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), г. Омск, Россия

²МП г. Омска «ПП-8»

г. Омск, Россия

✉ ответственный автор
trofimova_ls@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность выполненных исследований обоснована ролью организации перевозок пассажиров для выполнения условий «Муниципальных контрактов на выполнение работ, связанных с осуществлением регулярных перевозок пассажиров и багажа автобусами по регулируемым тарифам» (далее Контракт). Неравномерность пассажиропотоков, связанная с изменчивым характером передвижения людей, воздействием совокупности вероятностных факторов приводит к отклонению плановых показателей Контракта от фактических. Цель настоящего исследования – установить взаимосвязь между функционированием системы «Инцидент Менеджмент» и диспетчерским контролем муниципальных пассажирских предприятий для выполнения условий Контракта при организации регулярных пассажирских перевозок на муниципальных маршрутах.

Материалы и методы. В настоящем исследовании применяются общепринятые методы теории пассажирских автомобильных перевозок. При достижении цели учитывалась последовательность обработки информации в системе «Инцидент Менеджмент», программных модулях «Диспетчер» и «Карты». Практическая реализация результатов исследования выполнена на примере муниципального маршрута в г. Омске.

Результаты. Предложена классификация обращений граждан, согласно которой к инцидентам по организации перевозок пассажиров отнесены обращения, связанные с изменением показателей работы автобусов, установленные Контрактом. Для формирования информации с помощью диспетчерского контроля муниципальных пассажирских предприятий предложено использовать автоматизированную навигационную систему диспетчерского управления. Разработана модель взаимосвязи между функционированием системы «Инцидент Менеджмент» и диспетчерского контроля муниципальных пассажирских предприятий для организации регулярных пассажирских перевозок на муниципальных маршрутах.

Заключение. Установленная взаимосвязь между функционированием системы «Инцидент Менеджмент» и диспетчерского контроля муниципальных пассажирских предприятий рекомендована для организации регулярных пассажирских перевозок на муниципальном маршруте № 24 в г. Омске.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система «Инцидент Менеджмент», диспетчерский контроль, регулярные пассажирские перевозки на муниципальных маршрутах, городские автобусы

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы благодарят редакционную коллегию и редакционный совет научного рецензируемого журнала «Вестник СибАДИ», анонимных рецензентов статьи, А.В. Маремуха магистрант, направление «Технология транспортных процессов», направленность «Логистика в транспортных системах», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Трофимова Л.С. – член редакционной коллегии журнала «Вестник СибАДИ». Журнал «Вестник СибАДИ» не освобождает от рецензирования рукописи ученых вне зависимости от их статуса.

Статья поступила в редакцию 28.02.2024; одобрена после рецензирования 22.05.2024; принята к публикации 14.08.2024.

© Трофимова Л.С., Гаврилин Д.В., Кабжамитова А.С., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Все 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: Трофимова Л.С., Гаврилин Д.В., Кабжамитова А.С. Организация регулярных перевозок пассажиров с учетом обращений граждан и диспетчерского контроля // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 4. С. 580-593. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-580-593>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-580-593>

EDN: FVTFZG

ORGANIZATION OF REGULAR PASSENGER TRANSPORTATION TAKEN INTO ACCOUNT OF CITIZENS' APPEALS AND DISPATCH CONTROL

Ludmila S. Trofimova¹ ✉, Denis V. Gavrilin¹, Alima S. Kabzhamitova²

¹Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),

Omsk, Russia

²MP Omsk «PP-8»,

Omsk, Russia

✉ corresponding author
trofimova_ls@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the research performed is justified by the role of organizing passenger transportation to fulfill the terms of the 'Municipal contracts for the performance of work related to the regular transportation of passengers and luggage by buses at regulated tariffs' (hereinafter referred to as the Contract). The unevenness of passenger flows associated with the changing nature of the movement of people and the influence of a combination of probabilistic factors leads to a deviation of the planned indicators of the Contract from the actual ones. The purpose of this study is to establish the relationship between the functioning of the Incident Management system and dispatch control of municipal passenger enterprises to fulfill the terms of the Contract when organizing regular passenger transportation on municipal routes.

Materials and methods. This study applies generally accepted methods from the theory of passenger road transport. When achieving the goal, the sequence of information processing in the Incident Management system, Dispatcher and Maps software modules was taken into account. The practical implementation of the research results using the example of a municipal route in the city of Omsk was carried out.

Results. A classification of citizens' appeals according to which incidents related to the organization of passenger transportation include appeals related to changes in bus performance indicators established by the Contract is proposed. To generate information using dispatch control of municipal passenger enterprises, it is proposed to use an automated navigation system for dispatch control. A model of the relationship between the functioning of the Incident Management system and dispatch control of municipal passenger enterprises has been developed for the organization of regular passenger transportation on municipal routes.

Conclusion. The established relationship between the functioning of the Incident Management system and dispatch control of municipal passenger enterprises is recommended for organizing regular passenger transportation on municipal route № 24 in the city of Omsk.

KEYWORDS: Incident Management system, dispatch control, regular passenger transportation on municipal routes, city buses

ACKNOWLEDGMENTS. The authors thank the editorial board and editorial board of the Russian Automobile and Highway Industry Journal and anonymous reviewers of the article, A. V. Maremukha, master's student, Technology of transport processes, Logistics in transport systems major, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI).

© Trofimova L.S., Gavrilin D.V., Kabzhamitova A.S., 2024



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

CONFLICT OF INTEREST: *The authors declare no conflict of interest. Trofimova L.S. member of the editorial board of the journal The Russian Automobile and Highway Industry Journal. The journal "The Russian Automobile and Highway Industry Journal" does not exempt scientists from reviewing the manuscript, regardless of their status.*

The article was submitted 28.02.2024; approved after reviewing 22.05.2024; accepted for publication 14.08.2024.

All 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. Trofimova L.S., Gavrilin D.V., Kabzhamitova A.S. Organization of regular passenger transportation taken into account of citizens' appeals and dispatch control. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2024; 21 (4): 580-593. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-580-593>

Основные положения. В статье представлен научный подход к организации регулярных пассажирских перевозок на муниципальных маршрутах, который базируется на методах теории пассажирских перевозок и учитывает современные требования «Муниципальных контрактов на выполнение работ, связанных с осуществлением регулярных перевозок пассажиров и багажа автобусами по регулируемым тарифам» (далее Контракт). Разработана модель взаимосвязи между функционированием системы «Инцидент Менеджмент» и системы диспетчерского контроля муниципальных пассажирских предприятий для организации регулярных пассажирских перевозок на муниципальных маршрутах. Алгоритм модели представляет собой последовательность этапов, позволяющих выявить маршруты, на которых наблюдаются отклонения фактических показателей от плановых, принять управленческие решения и осуществить организацию перевозок пассажиров в соответствии с Контрактом. Для практической реализации представлен пример организации регулярных пассажирских перевозок на муниципальном маршруте № 24 в г. Омске.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях наблюдается неравномерность пассажиропотоков по перигонам, направлениям и часам суток, так как передвижения людей носят изменчивый характер. Функционирование пассажирского городского транспорта осуществляется под воздействием совокупности различных факторов, которые не всегда можно учесть. Для организации регулярных пассажирских перевоз-

ок на муниципальных маршрутах исследуется вероятностная система, результаты которой зависят от множества факторов, влияющих на движение транспортного средства между перигонами на каждом конкретном маршруте^{1, 2}. В этих условиях особая роль отводится соответствию показателей организации регулярных пассажирских перевозок на муниципальных маршрутах условиям «Муниципальных контрактов на выполнение работ, связанных с осуществлением регулярных перевозок пассажиров и багажа автобусами по регулируемым тарифам» (далее Контракт).

Заказчиком выполнения Контракта является Департамент транспорта, который осуществляет деятельность в соответствии с решением городского совета. Цель деятельности Департамента транспорта – формирование и реализация муниципальной политики в области организации транспортного обслуживания населения. Система городского пассажирского транспорта включает в себя основные функциональные элементы: Департамент транспорта, который является организатором (координатором) перевозок, при этом преследует цели экономического и социального благополучия; муниципальные и частные перевозчики и потребители.

Все исполнители и заказчики заинтересованы в надлежащем исполнении своих обязанностей (Департамент транспорта – удовлетворение потребностей населения в передвижении с заданным уровнем качества; перевозчики – выполнение перевозочного процесса в соответствии с условиями Контракта; пассажиры – оплата проезда). Транспортные услуги явля-

¹ Трофимова Л.С., Гаврилин Д.В., Кабжамитова А.С. Развитие информационной системы навигации для планирования пассажирских перевозок // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, приуроченной к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий. Омск: СибАДИ, 2022. С. 235–239.

² Гаврилин Д.В. Практика планирования регулярных перевозок пассажиров по муниципальным маршрутам // Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных. матер. VII Международ. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, приуроченная к 110-летию со дня рождения Т.В. Алексеевой. Омск: СибАДИ, 2023. С. 159–163.

ются ключевым элементом функционирования городской и областной экономики.

Департамент транспорта Администрации города выполняет организацию регулярных пассажирских перевозок на муниципальных маршрутах, осуществляет выбор подвижного состава по вместимости, определяет количество автобусов на конкретных маршрутах, составляет расписание работы автобусов. Эти данные являются основой составления оперативных планов регулярных пассажирских перевозок на муниципальных маршрутах, которые разрабатывают сотрудники отдела эксплуатации муниципальных пассажирских предприятий города. Исследования практики работы муниципальных пассажирских предприятий города показали, что не всегда решения о назначении автобусов какой-либо вместимости, принятые Департаментом транспорта города, соответствуют величинам пассажиропотоков на маршрутах. Для обеспечения требуемых показателей предприятие выступает с инициативой по изменению вместимости автобусов на том или ином маршруте или графике и вносит корректировки в существующие планы работы автобусов исходя из требований Контракта. Корректировки на предприятии проводятся исходя из данных диспетчерского контроля о работе водителя на линии. Диспетчерским контролем осуществляется сравнение фактического времени прибытия автобуса на остановочный пункт со временем, определенным в графике.

Исследование практики работы департамента показало, что на сегодняшний день в Департаменте транспорта при планировании работы общественного транспорта на будущие периоды учитываются обращения граждан из социальных сетей «ВКонтакте», «Одноклассники», «Телеграмм», платформы обратной связи, телефона доверия мэра города, электронной почты или письма, отправленного почтой. В случаях значительного изменения пассажиропотока вносятся изменения в схемы движения маршрутов, расписание движения маршрута. Данные корректировки влекут за собой изменения технико-эксплуатационных показателей работы подвижного состава на муниципальном маршруте и объема работ по Контракту. В таких случаях в Контракт вносятся изменения путём заключения дополнительных соглашений к Контракту по инициативе заказчика. Финансовые ограничения и ограничения действующего законодательства

позволяют изменять объём работ в пределах 10%. Данные ограничения сказываются на оперативном реагировании при изменении условий работы на муниципальных маршрутах. Недостатком современной организации перевозок пассажиров по Контрактам является отсутствие взаимосвязи между функционированием системы «Инцидент Менеджмент» и диспетчерским контролем муниципальных пассажирских предприятий.

Цель настоящего исследования – установить настоящую взаимосвязь между функционированием системы «Инцидент Менеджмент» и диспетчерским контролем муниципальных пассажирских предприятий для выполнения условий Контракта при организации регулярных пассажирских перевозок на муниципальных маршрутах.

Задачи исследования:

- изучение ранее выполненных работ по применению системы «Инцидент Менеджмент», диспетчерского контроля муниципальных пассажирских предприятий для организации перевозок пассажиров при выполнении условий Контракта;
- определение тем обращений граждан для организации перевозок пассажиров при выполнении условий Контракта;
- разработка модели взаимосвязи между функционированием системы «Инцидент Менеджмент» и диспетчерским контролем муниципальных пассажирских предприятий для организации регулярных пассажирских перевозок на муниципальных маршрутах.

Научной новизной является то, что представлен инструмент для выполнения условий Контракта при организации регулярных пассажирских перевозок на муниципальных маршрутах за счёт установленной взаимосвязи между функционированием системы «Инцидент Менеджмент» и диспетчерским контролем муниципальных пассажирских предприятий.

Изучение ранее выполненных работ по применению системы «Инцидент Менеджмент», диспетчерского контроля муниципальных пассажирских предприятий.

Современные исследователи представляют применение системы «Инцидент Менеджмент» как:

- новую форму взаимодействия государства и общества, которая дает положительные результаты [1, 2]. Сделан вывод об эффективности данной технологии по выстраиванию доверия между властью и обществом³;

³ Путинцева Н.А. Инцидент-менеджмент в государственном управлении // Устойчивое развитие цифровой экономики, промышленности и инновационных систем: материалы Науч.-практ. конф. с зарубежным участием. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. С. 229–232. DOI 10.18720/IEP/2020.7/68

– систему быстрого реагирования на нештатные события в процессе проектного управления [3];

– инструмент общественного участия в развитии умных городов, обеспечивающий персональную коммуникацию между органами власти и горожанами [4];

– средства предупреждения дорожно-транспортных происшествий^{4, 5} [5].

О.Д. Покровская, В.И. Ульяницкая [6] предложили использовать систему «Инцидент Менеджмент» не только для устранения жалобы пассажира, но и для выработки предупреждающих и корректирующих действий.

Е.А. Макарова, А.В. Соколовский [6] сделали акцент на учете обращений граждан при вводе в эксплуатацию нового подвижного состава. Анализ обращений граждан может применяться для выявления потребностей при формировании специальных маршрутов [8]. В работах [9, 10] было предложено использовать информационную систему обращений граждан для определения показателей уровня качества услуг. Методы опроса населения применялись для формирования мнения об удовлетворенности транспортного обслуживания населения микрорайона города пассажирским транспортом [11].

Установлено, что основной функцией диспетчерского контроля при применении АСДУ является связь диспетчера с водителем транспортных средств, запись в архив переговоров, прием и обработка навигационных данных, прием и передача текстовых сообщений; контроль выполнения расписаний движения общественного транспорта, формирование оперативных справок и отчетных форм [12, 13, 14]. Наличие функций автоматического определения местоположения автобуса позволяет получать обновленные данные о работе автобуса в режиме реального времени [15].

Отечественные и зарубежные учёные работали направления применения диспетчерского контроля для:

– моделирования функционирования и развития механизмов управления предприятиями пассажирского транспорта, обеспечения усло-

вий безопасности дорожного движения [16];

– оптимального использования автобусов различной вместимости, минимизирующего время ожидания пассажиров [17, 18];

– оптимального использования резервов в ходе применения стратегии оперативного реагирования на сбои в системе пассажирского автомобильного транспорта [19];

– предотвращения скопления автобусов на остановочных пунктах [20, 21].

В работе [22] сделан вывод о необходимости развития информационных систем взаимодействия с гражданами и предприятиями для реализации концепции, подходов и технологий умного города. Ю. Тянь, А.Н. Рахмангулов, Д.С. Муравьев, С. Ван [23] предложили метод прогнозирования времени прибытия автобусов на остановочные пункты.

И.И. Любимов, Н.Н. Якунин, Н.В. Якунина [24] определили преимущества применения консолидированных систем управления моделями бизнес-процессов пассажирских автомобильных перевозок. В работах [25, 26] сделан вывод о том, что городской пассажирский транспорт является сложной динамической системой, которая требует эффективных управленческих решений, ориентированных на пассажиров, основанных на интеграции и синхронизации, координированием.

Результаты исследования научных публикаций показали, что вопросы применения системы учета обращений граждан и диспетчерского контроля решены не в полном объеме для организации перевозок пассажиров. В ранее выполненных работах функционирование систем рассматривалось изолировано. В обзоре научных исследований показано, что задачи «Инцидент Менеджмент» и диспетчерского контроля муниципальных пассажирских предприятий пересекаются и образуют точки соприкосновения в вопросах удовлетворения потребностей граждан. В ранее выполненных исследованиях не определено, через какой организационный аппарат возможно взаимодействие этих систем. Это позволяет утверждать об актуальности выполненной работы.

⁴ Лукоянов В.А., Беспалов В.В., Матвеева В.В., Воробьев И.А. Характеристика процесса «расследование дорожно-транспортных происшествий» в системе менеджмента безопасности дорожного движения автотранспортного предприятия // Прогрессивные технологии в транспортных системах: XIV Международ. науч.-практ. конф. Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2019. С. 360–363.

⁵ Чириканова Е.А., Арсланбекова У.Б. Развитие информатизации отечественных транспортных предприятий // Национальные и международные финансово-экономические проблемы автомобильного транспорта: Т. Выпуск 5. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство «Экон-Информ», 2022. С. 140–148.

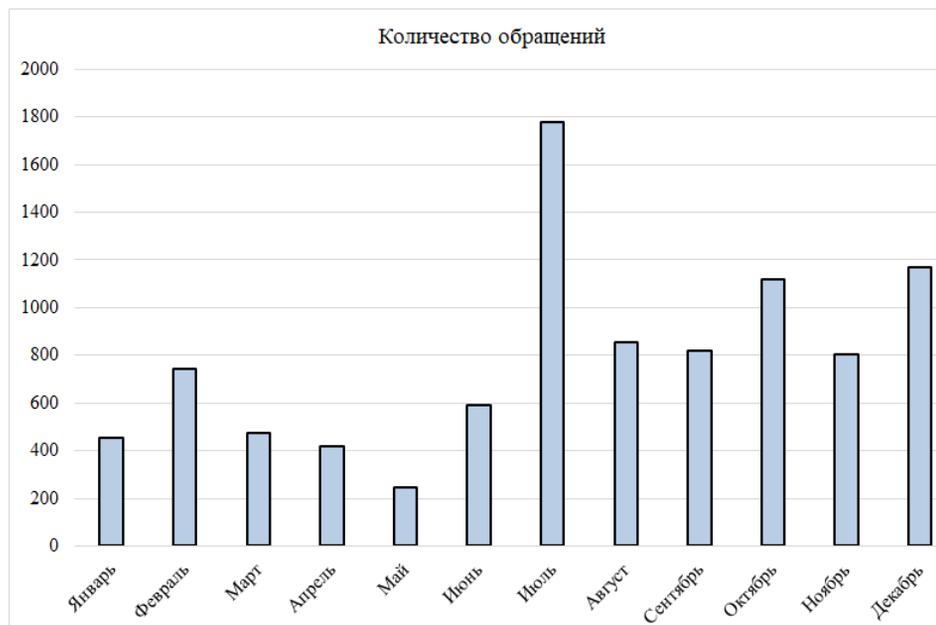


Рисунок 1 – Количество обращений, поступивших в Департамент транспорта в 2023 г.
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Number of appeals received by the Department of Transportation in 2023
Source: compiled by the authors.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Настоящее исследование выполнено с применением научных основ организации регулярных пассажирских перевозок на муниципальных маршрутах. Технично-эксплуатационные показатели работы автобусов для организации регулярных пассажирских перевозок на муниципальных маршрутах определены по существующей методике теории пассажирских перевозок. При достижении цели учитывалась последовательность обработки информации в системе «Инцидент Менеджмент».

При формировании информации с помощью диспетчерского контроля муниципальных пассажирских предприятий использовалась последовательность работы диспетчера с программными модулями «Диспетчер» и «Карты». При обосновании актуальности темы настоящей статьи применялись методы анализа современного состояния системы «Инцидент Менеджмент» и диспетчерского контроля муниципальных пассажирских предприятий для организации регулярных пассажирских перевозок на муниципальных маршрутах.

Применение разработанной модели взаимосвязи информации в системе «Инцидент Менеджмент», диспетчерского контроля муни-

ципальных пассажирских предприятий выполнено на примере муниципального маршрута в г. Омске.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате исследования практики функционирования системы «Инцидент Менеджмент» в г. Омске было определено количество обращений, поступивших в Департамент транспорта (с разбивкой по месяцам) за 2023 г. (рисунок 1).

Анализируя рисунок 1, можно сделать вывод, что население проявляет активность в социальных сетях. Например, после выхода новости об изменении ряда маршрутов произошел прирост обращений. В настоящем исследовании темы обращений граждан для организации перевозок пассажиров при выполнении условий муниципального Контракта по признакам: транспорт общего пользования; безопасность дорожного движения.

К группе «транспорт общего пользования» относятся инциденты по следующим темам (% обращений в общей структуре):

- длительное ожидание автобуса конкретного маршрута (28% обращений в общей структуре);
- изменение расписания движения автобуса (21% обращений в общей структуре);

– введение дополнительных рейсов или маршрутов (26% обращений в общей структуре);

– замена подвижного состава на более вместительный подвижной состав (25% обращений в общей структуре).

Инциденты, связанные с общественным транспортом, формируются в отдельную информационную группу и доводятся до сведения специалиста, осуществляющего организацию перевозок пассажиров. Формирование информации с помощью диспетчерского контроля муниципальных пассажирских предприятий для организации перевозок пассажиров при выполнении условий Контракта проводится с применением «Интегрированной автоматизированной навигационной системы диспетчерского управления и обеспечения безопасности перевозок наземным городским пассажирским транспортом в городе».

В системе реализуется программный модуль «Карта», который предназначен для отображения автобусов на карте местности в данный момент, истории движения за период вызова водителей на связь, передачи и приёма сообщений, просмотра архива переговоров и истории сообщений. Программный модуль «Диспетчер» является основным для реализации функций диспетчерского управления маршрутизированным движением, оперативного корректирования и изменения расписаний, а также фиксирования всех результатов работы диспетчера.

Исследования практики управления пассажирскими перевозками с применением программного модуля «Диспетчер» позволили установить, что количество воздействий с применением цифровых технологий для отдельных маршрутов изменяется до 25–28% от значений, установленных в плане¹. На основании зафиксированных нарушений формируется отчет в муниципальном предприятии.

Для организации перевозок пассажиров установлена взаимосвязь между функционированием системы «Инцидент Менеджмент» и диспетчерским контролем муниципальных пассажирских предприятий через отдел организации перевозок и контроля Департамента транспорта (рисунок 2).

Согласно алгоритму реализации модели, представленной на рисунке 2, взаимосвязь между функционированием системы «Инци-

дент Менеджмент», диспетчерского контроля муниципальных пассажирских предприятий осуществляется на этапе 6.

После поступления инцидента из социальных сетей в систему «Инцидент Менеджмент» осуществляется их автоматическая сортировка по ведомствам (этап 1). На данном этапе во вкладке «фильтр» необходимо выбрать «департамент транспорта». После сортировки по ведомствам определяется зона ответственности обращения (этап 2). Если обращение входит в зону ответственности Департамента транспорта, то оно передается специалисту, ответственному за данное направление, в противном случае обращение возвращается в Администрацию города (этап 3). На этапе 4 определяется зона ответственности отдела. В отделе организации перевозок специалист отбирает сообщения, требующие изменения в организации перевозок в связи с несоблюдением условий Контракта.

Переход на этап 8 выполняется только после того, как специалист получит информацию из отдела диспетчерского контроля пассажирского предприятия о том, что на конкретном маршруте необходима корректировка по изменению вместимости автобусов и расписанию.

В результате диспетчерского контроля выявляются маршруты, на которых необходимо выполнять корректировку по организации перевозок (этап 5П).

Изменения в организации перевозок связаны с внесением изменений в Контракт по замене классов автобусов, времени работы автобусов на том или ином маршруте при составлении нарядов (закрепление определенного автобуса, водителя и кондуктора за определенным графиком маршрута). На этапе 6 и 6П определяется необходимость изменений в организации перевозок со стороны функционирования системы «Инцидент Менеджмент» и со стороны диспетчерского управления и контроля предприятия. В случае если требуются изменения в организации перевозок, происходит переход на этап 8, в противном случае осуществляется выполнение перевозок по ранее установленным показателям Контракта. Это позволит обеспечить выполнение муниципального Контракта, своевременно реагировать на изменяющийся пассажиропоток, обеспечить качество обслуживания населения транспортом.

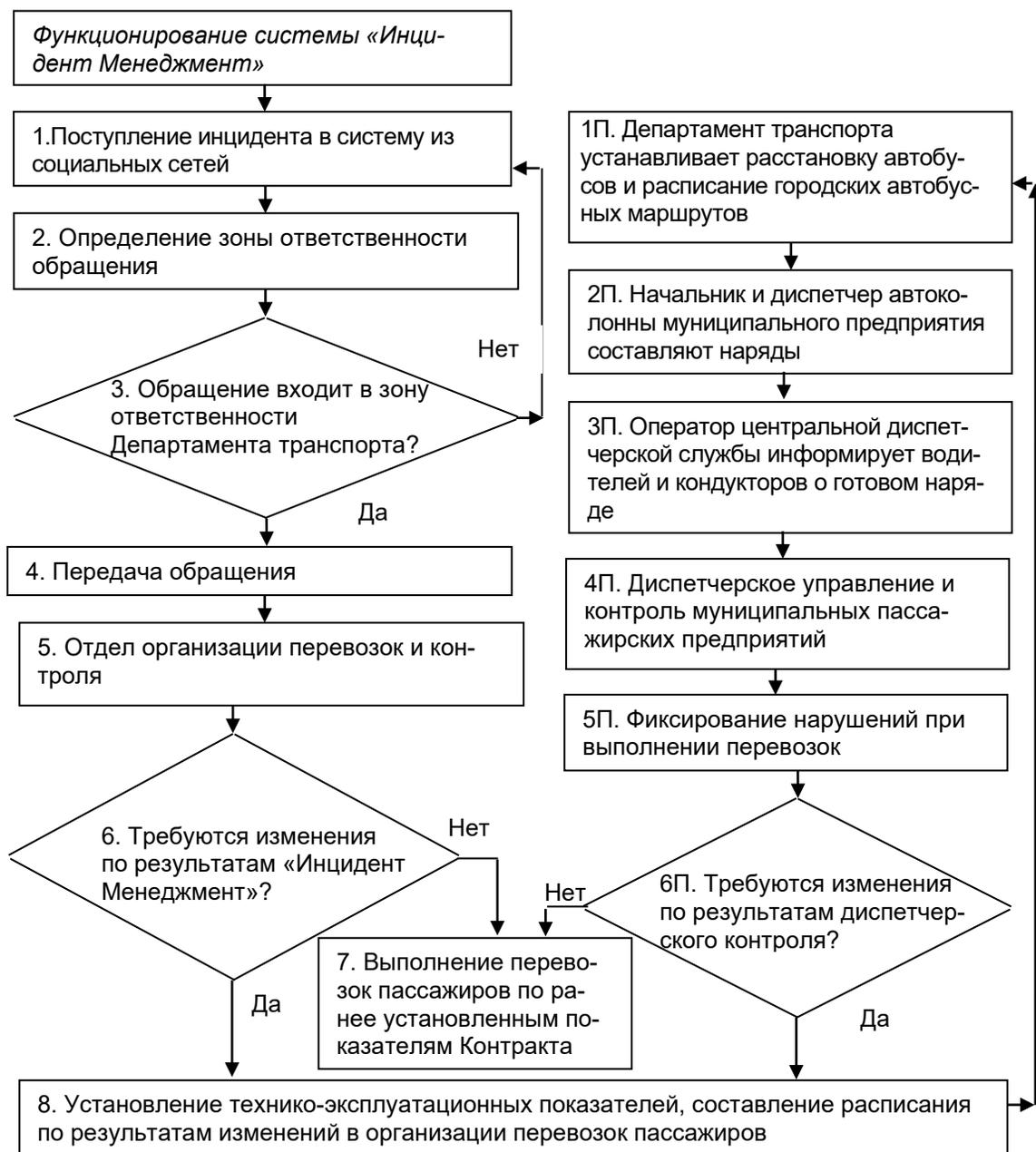


Рисунок 2 – Алгоритм реализации модели взаимосвязи между функционированием системы «Инцидент Менеджмент» и диспетчерским контролем муниципальных пассажирских предприятий для организации перевозок пассажиров
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Realization algorithm for the model of interrelation between the functioning of the system Incident Management and dispatch control of the municipal passenger enterprises for the organization of passenger transportation
Source: compiled by the authors.

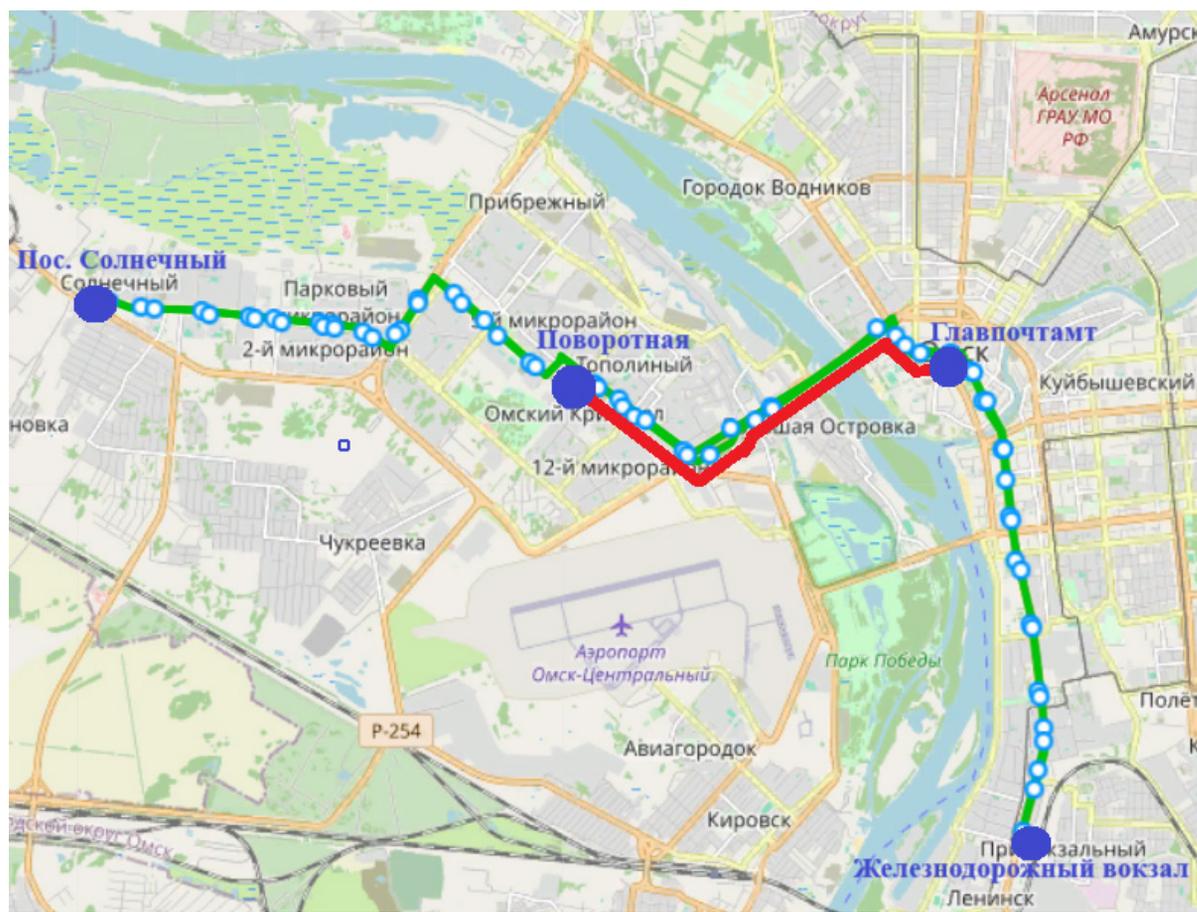


Рисунок 3 – Схема маршрута № 24 «Пос. Солнечный – Железнодорожный вокзал», где красной линией обозначен участок маршрута с наибольшим пассажиропотоком в утренний час пик
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Scheme of No. 24 Solnechnyi posielok – Railway station route, where the red line indicates the section of the route with the largest passenger flow in the morning rush hour
Source: compiled by the authors.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Организация перевозок пассажиров с учетом взаимосвязи между функционированием системы «Инцидент Менеджмент» и диспетчерского контроля муниципальных пассажирских предприятий выполнена для маршрута № 24 в г. Омске. В системе «Инцидент Менеджмент» зафиксированы обращения граждан по признаку «транспорт общего пользования» применительно к маршруту № 24. Специалист отдела организации перевозок установил обращения, которые связаны с длительным ожиданием автобуса, с пожеланиями об изменении расписания движения автобуса, введением дополнительных рейсов для автобусов

маршрута № 24, заменой подвижного состава. Имеются обращения, которые связаны с невозможностью воспользоваться автобусом № 24 маршрута в утренний час пик по причине его переполненности, а также отклонением от планового расписания движения автобуса в связи со сложной (заторовой) дорожной обстановкой на улично-дорожной сети города. На рисунке 3 представлена схема маршрута № 24 «Пос. Солнечный – Железнодорожный вокзал», красной линией обозначен участок маршрута с наибольшим пассажиропотоком в утренний час пик от микрорайона Кристалл до остановки «Главпочтамт». На этом участке маршрута зафиксированы обращения.

Таблица
Технико-эксплуатационные показатели работы автобусов и водителей
при организации перевозок пассажиров
Источник: составлено авторами.

Table
Technical and operational performance of buses and drivers
in passenger transportation organization
Source: compiled by the authors.

Показатель	Значение	
	Volgabus-6271.G2	НефАЗ-5299-30-56
Количество автобусов, ед.	22	22
Длина маршрута, км	37,1	37,1
Количество рейсов в день на маршруте, ед.	266	266
Время в линии, ч	269,5	269,5
Линейный пробег, км	4764,4	4764,4
Пассажировместимость автобуса, чел.	175	105

Обоснованием предложений по совершенствованию перевозок на рассматриваемом маршруте являются:

- отклонения фактического времени выполнения рейса от планового времени по расписанию;

- величины пассажиропотока на маршруте по часам суток, дням недели в прямом и обратном направлении (участок маршрута с наибольшим пассажиропотоком в утренний час пик представлен на рисунке 3).

В практике диспетчерского контроля муниципального пассажирского предприятия зафиксированы отклонения фактического времени выполнения рейса от планового времени по расписанию. В результате предварительно выполненных исследований по организации перевозок пассажиров предложено организовать укороченные рейсы от пос. Солнечный до остановки общественного транспорта (далее ООТ) «Главпочтамт», от ООТ «Главпочтамт» до ООТ «Поворотная» и от ООТ «Поворотная» до ООТ «Железнодорожный вокзал». Таким образом, автобус сможет вывезти наибольшее количество пассажиров на наиболее востребованном участке маршрута и встать в график. Разработано расписание маршрута № 24, согласно которому в период с 6:00 до 9:10 увеличилось количество рейсов с 26 до 35 через ООТ «Поворотная», количество автобусов не изменилось.

При организации перевозок пассажиров предложено использовать сочлененный низко-

польный газомоторный автобус Volgabus-6271.G2 в период утреннего и вечернего пика пассажирооборота. В результате выполненных исследований по определению величин пассажиропотока на маршруте по часам суток, дням недели в прямом и обратном направлении установлено, что применение сочлененного автобуса не потребует уменьшения числа рейсов и пробега. Технико-эксплуатационные показатели работы автобусов и водителей при организации перевозок пассажиров приведены в таблице.

Применение полученных технико-эксплуатационных показателей в работе автобусов устраняет выявленные нарушения на маршруте. Практическая реализация разработанной модели (см. рисунок 2) обеспечит соответствие фактического времени выполнения рейса и времени по расписанию.

Установленная взаимосвязь между функционированием системы «Инцидент Менеджмент» и диспетчерского контроля муниципальных пассажирских предприятий при организации перевозок пассажиров позволит выявлять неравномерность пассажиропотоков по перегонам, направлениям и часам суток. Применение системы «Инцидент Менеджмент» для учета обращений граждан установит факторы, которые наблюдают потребители пассажирских перевозок ежедневно на остановочных пунктах, в салоне автобусов, во время движения транспортного средства между перегонами на каждом конкретном марш-

руте. Диспетчерский контроль муниципальных пассажирских предприятий определит маршрут, на котором необходимо обеспечить соответствие показателей организации пассажирских перевозок условиям Контракта и выступит с планом по изменению вместимости автобусов на том или ином маршруте либо внесет корректировку в существующие планы работы автобусов исходя из требований Контракта.

Дальнейшее исследование будет направлено на классификацию факторов, влияющих на выполнение условий Контракта, разработку математической модели функционирования муниципального пассажирского транспорта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Камалова Г.Р. Инцидент-менеджмент как новая стратегия коммуникации власти и общества: анализ практик // Экономика и управление: научно-практический журнал. 2020. № 4(154). С. 30–33. DOI 10.34773/EU.2020.4.6.
2. Yona M., Birfir G., Kaplan S. Data science and GIS-based system analysis of transit passenger complaints to improve operations and planning. *Transport Policy*. 2021. vol. 101. p. 133–144, <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.12.009>.
3. Кондратьева М.Н., Архангельский Н.С., Свирина Д.Д. Аварийно-мобилизационная модель управления: инцидент-менеджмент // Экономика и управление: научно-практический журнал. 2022. № 2(164). С. 96–102. DOI 10.34773/EU.2022.2.17.
4. Мухаметов Д.Р. Модели платформ вовлечения граждан для создания в России умных городов нового поколения // Вопросы инновационной экономики. 2020. Т. 10, № 3. С. 1605–1622. DOI 10.18334/vines.10.3.110683.
5. Быков А.И. Некоторые перспективы использования цифровых технологий в предупреждении дорожно-транспортных происшествий // Безопасность дорожного движения. 2023. № 4. С. 30–33.
6. Покровская О.Д., Ульяницкая В.И. Система работы с обращениями пассажиров // Недропользование и транспортные системы. 2022. Т. 12, № 2. С. 4–11. <https://doi.org/10.18503/SMTS-2022-12-2-4-11>.
7. Макарова Е.А., Соколовский А.В. Методика аналитических исследований для определения целесообразности ввода в обращение пассажирских поездов с жесткой схемой состава // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2014. № 4. С. 33–38.
8. Игнатьев В.А., Петров А.И. Сбалансированность транспортного обслуживания населения городов: основные подходы // Архитектура, строительство, транспорт. 2023. № 2(104). С. 64–79. DOI 10.31660/2782-232X-2023-2-64-78.
9. Сидорчук Р.Р., Скоробогатых И.И., Лопатинская И.В. [и др.] Рекламно-техническое описание «Информационная структура методики проведения маркетинговых исследований потребителей для определения показателей воспринимаемого уровня качества услуг транспортного обслуживания населения наземным транспортом общего пользования» // Навигатор в мире науки и образования. 2017. № 3(36). С. 125.
10. Frederico C.S., Pereira A.L. S., Marte C.L., Yoshioka L.R. Mobile application for bus operations controlled by passengers: A user experience design project (UX). *Case Studies on Transport Policy*, 2021, vol. 9, № 1, p. 172–180, <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2020.11.014>
11. Рыжова А.С., Жевтун И.Ф., Карбышев А.В., Безматерных К.П. Удовлетворенность транспортного обслуживания населения микрорайона города пассажирским транспортом // Вестник Академии знаний. 2021. № 44(3). С. 189–193. DOI 10.24412/2304-6139-2021-11237.
12. Пономарев Н.А. К вопросу автоматизированного диспетчерского управления пассажирскими автомобильными перевозками // *Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык*. 2021. № 3. С. 27–43. DOI 10.51955/2312-1327_2021_3_27.
13. Шавыраа Ч.Д. Организационные преобразования в сфере городского пассажирского транспорта в малых городах // Вестник Тувинского государственного университета. № 3. Технические и физико-математические науки. 2020. № 2(62). С. 55–61. DOI 10.24411/2221-0458-2020-10035.
14. Berrebi S.J., Hans E., Chiabaut N., Laval J.A., Leclercq L., Watkins K.E. Comparing bus holding methods with and without real-time predictions, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, vol. 87, p. 197–211, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.07.012>.
15. Li S., Liu R., Yang L., Gao Z. Robust dynamic bus controls considering delay disturbances and passenger demand uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019. vol. 123. p. 88–109, <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.03.019>.
16. Дятлов В.В., Трунаев А.М. Повышение экономической эффективности предприятий пассажирского транспорта моделированием трафика // Автоматика на транспорте. 2023. Т. 9, № 3. С. 247–257. DOI 10.20295/2412-9186-2023-9-03-247-257.
17. Sadrani M., Tirachini A., Antoniou C. Vehicle dispatching plan for minimizing passenger waiting time in a corridor with buses of different sizes: Model formulation and solution approaches. *European Journal of Operational Research*. 2022. vol. 299. № 1. p. 263–282, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.07.054>.
18. Liu T., Cats O., Gkiotsalitis K. A review of public transport transfer coordination at the tactical planning phase. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2021. vol. 133, p. 103450, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103450>.
19. Wang X., J.G. Jin, Sun L. Real-time dispatching of operating buses during unplanned disruptions to urban rail transit system, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2022. vol. 139. p. 103696, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103696>.
20. Xin Q., Fu R., Yu S.S., Ukkusuri V., Jiang R. Modeling Bus Bunching and Anti-bunching Control

Accounting for Signal Control and Passenger Swapping Behavior. *Journal of Public Transportation*. 2021. vol. 23. № 1, p. 31–62. <https://doi.org/10.5038/2375-0901.23.1.3>.

21. Berrebi S.J., Crudden S.Ó., Watkins K.E. Translating research to practice: Implementing real-time control on high-frequency transit routes. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2018. vol. 111. p. 213–226. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.03.008>.

22. Антипин И.А., Власова Н.Ю. Стратегическое развитие умного города: примеры российских мегаполисов // *Московский экономический журнал*. 2022. Т. 7, № 12. DOI 10.55186/2413046X_2022_7_12_733.

23. Тянь Ю., Рахмангулов А.Н., Муравьев Д.С., Ван С. Алгоритм прогнозирования моментов времени прибытия городских пассажирских автобусов на основе Марковских цепей // *Современные проблемы транспортного комплекса России*. 2018. Т. 8, № 2. С. 29–37. DOI 10.18503/2222-9396-2018-8-2-29-37.

24. Любимов И.И., Якунин Н.Н., Якунина Н.В. Анализ моделей взаимодействия субъектов пассажирских автомобильных перевозок // *Вестник СибАДИ*. 2022;19(6):878–889. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-878-889>.

25. Колебер Ю.А., Мочалин С.М. Логистическая система городского пассажирского транспорта общего пользования // *Известия Транссиба*. 2023. № 3(55). С. 84–94.

26. Gkiotsalitis K., Cats O. At-stop control measures in public transport: Literature review and research agenda, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2021. vol. 145, p. 102176, <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102176>.

REFERENCES

1. Kamalova G.R. Incident Management as a New Communication Strategy for Government and Society: Analysis of Practices. *Ekonomika i upravlenie: nauchno-prakticheskij zhurnal*. 2020; 4(154): 30–33. DOI 10.34773/EU.2020.4.6. (in Russ.)

2. Yona M., Birfir G., Kaplan S. Data science and GIS-based system analysis of transit passenger complaints to improve operations and planning. *Transport Policy*. 2021; vol. 101: 133–144. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.12.009>.

3. Kondrat'eva M.N., Arhangel'skij N.S., Svirina D.D. Emergency-mobilization model of management: incident management. *Ekonomika i upravlenie: nauchno-prakticheskij zhurnal*. 2022; 2(164): 96–102. DOI 10.34773/EU.2022.2.17. (in Russ.)

4. Muhametov D. R. Models of citizen engagement platforms for the creation of new generation smart cities in Russia. *Voprosy innovatsionnoy ekonomiki*. 2020; Т. 10, no 3: 1605–1622. DOI 10.18334/vinec.10.3.110683. (in Russ.)

5. Bykov A.I. Some prospects for the use of digital technologies in the prevention of road accidents. *Road safety*. 2023; 4: 30–33. (in Russ.)

6. Pokrovskaya O., Ulyanitskaya V. The System of Working with Passenger Requests. *Subsurface Management and Transportation Systems*. 2022; Vol. 12, No. 2: 4–11. (in Russ.) <https://doi.org/10.18503/SMTS-2022-12-2-4-11>

7. Makarova E.A., Sokolovskij A.V. Analytical research methodology for determining the feasibility of putting into circulation passenger trains with a rigid train layout. *The Russian Railway Science Journal*. 2014; 4: 33–38. (in Russ.)

8. Ignatyugin, V.A.; Petrov, A.I. Balanced transport service for the population of cities: basic approaches. *Architecture, Construction, Transport* («*Arkhitektura, stroitel'stvo, transport*»). 2023; 2(104): 64–79. DOI 10.31660/2782-232X-2023-2-64-78.

9. Sidorchuk R.R., Skorobogatyh I.I., Lopatinskaya I.V. [i dr.] Advertisement-technical description «Information structure of the methodology of conducting marketing research of consumers to determine the indicators of the perceived level of quality of transport service quality of the population by public ground transportation». *Navigator v mire nauki i obrazovaniya*. 2017; 3(36): 125. (in Russ.)

10. Frederico C.S., Pereira A.L.S., Marte C.L., Yoshioka L. R. Mobile application for bus operations controlled by passengers: A user experience design project (UX). *Case Studies on Transport Policy*. 2021; 9, № 1: 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2020.11.014>

11. Ryzhova A. S., Zhevtun I. F., Karbyshev A. V., Bezmaternyh K. L. Satisfaction of transport service of the city microdistrict population with passenger transport. *Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2021; 44(3): 189–193. (in Russ.) DOI 10.24412/2304-6139-2021-11237.

12. Ponomarev N.A. On the issue of automated dispatching control of passenger road transport. *Crede Experto: transport, society, education, language*. 2021; 3: 27–43. (in Russ.) DOI 10.51955/2312-1327_2021_3_27.

13. SHavyraa CH.D. Organizing transformations of public transportation in small cities. *Vestnik of Tuva State University Issue 3. Technical sciences, physical and mathematical sciences*. 2020; 2(62): 55–61. (in Russ.) DOI 10.24411/2221-0458-2020-10035.

14. Berrebi S.J., Hans E., Chiabaut N., Laval J.A., Leclercq L., Watkins K.E. Comparing bus holding methods with and without real-time predictions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2018; vol. 87: 197–211. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.07.012>.

15. Li S., Liu R., Yang L., Gao Z. Robust dynamic bus controls considering delay disturbances and passenger demand uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019; vol. 123: 88–109. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.03.019>.

16. Dyatlov V.V., Trunaev A.M. Increasing the Economic Efficiency of Passenger Transport Enterprises by Traffic Modeling. *Transport automation research*. 2023; Т. 9, № 3: 247–257. (in Russ.) DOI 10.20295/2412-9186-2023-9-03-247-257.

17. Sadrani M., Tirachini A., Antoniou C. Vehicle dispatching plan for minimizing passenger waiting time in a corridor with buses of different sizes: Model formulation and solution approaches. *European Journal of Operational Research*. 2022; vol. 299, no. 1: 263–282. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.07.054>.

18. Liu T., Cats O., Gkiotsalitis K. A review of public transport transfer coordination at the tactical planning phase. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2021; vol. 133: 103450. <https://doi.org/10.1016/j.trc.103450>.

19. Wang X., J.G. Jin, Sun L. Real-time dispatching of operating buses during unplanned disruptions to urban rail transit system. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2022; vol. 139: 103696. <https://doi.org/10.1016/j.trc..103696>

20. Xin Q., Fu R., Yu S. S., Ukkusuri V., Jiang R. Modeling Bus Bunching and Anti-bunching Control Accounting for Signal Control and Passenger Swapping Behavior. *Journal of Public Transportation*. 2021; vol. 23, no. 1: 31–62. <https://doi.org/10.5038/2375-0901.23.1.3>

21. Berrebi S.J., Crudden S.Ó., Watkins K.E. Translating research to practice: Implementing real-time control on high-frequency transit routes. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2018; vol. 111: 213–226. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.03.008>

22. Antipin I. A., Vlasova N. YU. Strategic development for smart city: case of the largest russian cities. *Moscow economic journal*. 2022; T. 7, no. 12. DOI 10.55186/2413046X_2022_7_12_733

23. T'yan' YU., Rahmangulov A. N., Murav'ev D. S., Van S. Algorithm of forecasting of moments of time of arrival of city passenger buses on the basis of Markov chains. Modern problems of the transport complex of Russia. *Modern Problems of Russian Transport Complex (MPRTC)*. 2018; T. 8, no. 2: 29–37. DOI 10.18503/2222-9396-2018-8-2-29-37

24. Lyubimov I.I., Yakunin N.N., Yakunina N.V. Analysis for models of interaction between road passenger transport operators. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19(6): 878–889. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-878-889>

25. Koleber YU. A., Mochalin S. M. Logistic system of urban public passenger transportation. «*Izvestia Transsiba*» (Journal of *Transsib Railway Studies*). 2023; 3(55): 84–94. (In Russ.)

26. Gkiotsalitis K., Cats O. At-stop control measures in public transport: Literature review and research agenda. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2021; vol. 145: 102176. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102176>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Трофимова Л.С. Постановка цели и задачи исследования; описание проблемы, с которой связано исследование; обзор литературы, связанной с исследованием; разработка алгоритма реализации модели взаимосвязи между функционированием системы «Инцидент Менеджмент» и диспетчерским контролем муниципальных пассажирских

предприятий для организации перевозок пассажиров (45%).

Гаврилин Д.В. Применение разработанной модели взаимосвязи информации в системе «Инцидент Менеджмент», диспетчерского контроля муниципальных пассажирских предприятий выполнено на примере муниципального маршрута в г. Омске (35%).

Кабжамитова А.С. Разработка алгоритма реализации модели взаимосвязи между функционированием системы «Инцидент Менеджмент» и диспетчерским контролем муниципальных пассажирских предприятий для организации перевозок пассажиров; применение разработанной модели взаимосвязи информации в системе «Инцидент Менеджмент», диспетчерского контроля муниципальных пассажирских предприятий выполнено на примере муниципального маршрута в г. Омске (20%).

CO-AUTHORS' CONTRIBUTION

Trofimova L.S. The purpose and objectives of the study statement; the problem related to the research description; literature related to the study review; development of an algorithm for implementing a model of the relationship between the functioning of the Incident Management system and dispatch control of municipal passenger enterprises for organizing passenger transportation (45%);

Gavrilin D.V. The use of the developed model of information interrelation in the Incident Management system, dispatch control of municipal passenger enterprises was carried out using the example of a municipal route in Omsk (35%);

Kabzhamitova A.S. The algorithm for implementing a model of the relationship between the functioning of the Incident Management system and dispatch control of municipal passenger enterprises for organizing passenger transportation development; the use of the developed model of information interconnection in the Incident Management system, dispatch control of municipal passenger enterprises was carried out using the example of a municipal route in Omsk (20%);

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Трофимова Людмила Семеновна – д-р техн. наук, доц., заведующая кафедрой «Организация перевозок и безопасность движения», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, д. 5), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7312-1557>, **SPIN-код:** 6711-9953, e-mail: trofimova_ls@mail.ru

Гаврилин Денис Викторович – аспирант, специальность 2.9.4 «Управление процессами перевозок», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, д. 5), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-9528-4086>, **SPIN-код:** 2403-1556, e-mail: den9230@mail.ru

Кабжамитова Алина Солтанахметовна – оператор центральной диспетчерской службы, Му-

ниципальное предприятие г. Омска пассажирское предприятие – 8 (644073, Омск, 2-я Солнечная ул., 27), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-9528-4086>, e-mail: alima-il@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Liudmila S. Trofimova – Dr. of Sci., Head of the Organization Transportation and Traffic Safety Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5 Prospekt Mira, Omsk, 644050), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7312-1557>, **SPIN-код:** 6711-9953, e-mail: trofimova_ls@mail.ru*

*Denis V. Gavrilin – Postgraduate student, Transportation Process Management major, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), (5 Prospekt Mira, Omsk, 644050), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-9528-4086>, **SPIN-cod:** 2403-1556, e-mail: den9230@mauil.ru*

*Alima S. Kabzhamitova – Operator of the central dispatch service, Municipal Enterprise of Omsk Passenger Enterprise – 8 (27 Vtoraia Solnechnaya str., Omsk, 644073.), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-9528-4086>, e-mail: alima-il@mail.ru*

Научная статья
УДК 656.089:656.9
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-594-604>
EDN: QBAZRW



ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВА ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ С УЧАСТИЕМ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ МОБИЛЬНОСТИ НА ПРИМЕРЕ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ

А.Г. Шевцова¹ ✉, С.Е. Савотченко², А.А. Юнг¹

¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия

²Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе,
г. Москва, Россия

✉ ответственный автор
shevcova-anastasiya@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Сегодня активным спросом пользуются средства индивидуальной мобильности (СИМ). По данным средств массовой информации (СМИ), особой популярностью рассматриваемые средства передвижения пользуются в южных городах, например городах Краснодарского края, в которых за период с 2018 по 2023 г. произошло 190 ДТП с участием СИМ. С целью оценки изменения ситуации в области аварийности с участием СИМ в масштабах южных городов в рамках данного исследования на примере Краснодарского края разработана модель прогнозирования количества ДТП с участием рассматриваемых средств передвижения.

Методы и материалы. Для прогнозирования количества ДТП в качестве метода исследования использованы математические методы моделирования, в частности применена наука эконометрика, которая довольно часто используется для оценки статистических показателей с математической точки зрения.

Результаты. Авторами разработана модель прогнозирования количества ДТП с участием СИМ для Краснодарского края с достоверностью 67%.

Заключение. Установлено, что увеличивающийся характер изменения рассматриваемых величин возможно описать с применением мультипликативной модели, состоящей из трех компонент – сезонной, трендовой и случайной. Расчет всех компонент дал возможность определить вид модели (), позволяющей произвести расчет количества ДТП с участием СИМ для рассматриваемого субъекта – Краснодарского края.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: средства индивидуальной мобильности, дорожно-транспортные происшествия, временные ряды, эконометрика, мультипликативная модель, прогнозирование

БЛАГОДАРНОСТИ. Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Статья поступила в редакцию 06.05.2024; одобрена после рецензирования 22.06.2024; принята к публикации 14.08.2024.

Все 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: Шевцова А.Г., Савотченко С.Е., Юнг А.А. Прогнозирование количества дорожно-транспортных происшествий с участием средств индивидуальной мобильности на примере Краснодарского края // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 4. С. 594-604. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-594-604>

© Шевцова А.Г., Савотченко С.Е., Юнг А.А., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-594-604>

EDN: QBAZRW

PREDICTING THE NUMBER OF ROAD ACCIDENTS INVOLVING PERSONAL MOBILITY AIDS ON THE EXAMPLE OF KRASNODAR KRAI

Anastasia G. Shevtsova¹ ✉, Sergei E. Savotchenko², Anastasia A. Jung¹

¹V.G. Shukhova Belgorod State Technological University,
Belgorod, Russia

²Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting Universities,
Moscow, Russia

✉ corresponding author
shevcova-anastasiya@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Nowadays personal mobility aids (SIMs) are in active demand. According to the data of the mass media, the considered means of mobility are particularly popular in southern cities, such as the cities of Krasnoyarsk region, in which 190 accidents involving SIMs occurred during the period of 2018–2023. In order to assess the changing situation in the field of accidents involving SIMs in the scale of southern cities, a model for predicting the number of accidents involving the considered means of transportation within the framework of this study using the example of Krasnodar Krai was developed.

Methods and Materials. In order to predict the number of traffic accidents, mathematical modelling methods have been used as a research method, in particular the science of econometrics has been applied, which is quite often used to evaluate statistical indicators from a mathematical point of view.

Results. The authors have developed a model for predicting the number of accidents involving SIM for Krasnodar region with a reliability of 67%.

Conclusion. It was found that the increasing nature of change in the considered quantities can be described using a multiplicative model consisting of three components – seasonal, trend and random. The calculation of all components enables to determine the type of model (\hat{y}_t), which can calculate the number of accidents involving SIM for the subject (Krasnodar Krai) under consideration.

KEYWORDS: personal mobility aids, road accidents, time series, econometrics, multiplicative model, forecasting

ACKNOWLEDGEMENTS. The work was carried out within the framework of the federal programme of Priority 2030 university support with the use of equipment on the basis of the High Technology Centre of V.G. Shukhov Belarusian State Technical University.

The article was submitted 06.05.2024; approved after reviewing 22.06.2024; accepted for publication 14.08.2024.

All 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. Shevtsova A.G., Savotchenko S.E., Jung A.A. Predicting the number of road accidents involving personal mobility aids on the example of Krasnodar krai. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (4): 594-604. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-594-604>

© Shevtsova A.G., Savotchenko S.E., Jung A.A., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Активная застройка жилыми комплексами во многих городах России способствует увеличению численности их населения, особенно это характерно для южных городов и мегаполисов, наравне с этим увеличивается и количество автомобилей, находящихся в личном пользовании. Рост автомобилизации в большинстве российских городов и в целом по стране приводит к возникновению ряда проблем, связанных в первую очередь со снижением пропускной способности городских участков дорог, за счет увеличения автомобильного транспорта, продолжительных задержек в пути, аварийности и др.

В качестве альтернативных мероприятий для улучшения ситуации во многих городах уделяют особое внимание пассажирскому транспорту за счет повышения его привлекательности, например снижением стоимости проезда или открытием новых маршрутов, а также изменением способов организации дорожного движения и выделением специализированных полос для движения общественного транспорта, что значительно снижает время движения и сокращает количество непреднамеренных остановок [1, 2, 3, 4]. Помимо этого, активным спросом начинают пользоваться средства индивидуальной мобильности (СИМ), такие как электросамокаты, гироскутеры, сигвеи и пр. [5, 6, 7, 8, 9]. Следует отметить, что данные средства передвижения обладают рядом преимуществ, которые приобрели особый статус в период пандемии COVID-19 [10]. В первую очередь данные средства передвижения позволяют обеспечить социальное дистанцирование, что являлось важным показателем во времена активного распространения инфекции. Помимо этого, данные средства передвижения могут обладать особой привлекательностью при перемещении на короткие расстояния в радиусе до 5 км за счет возможности использования для движения как пешеходной, так и транспортной инфраструктуры, что значительно сокращает время движения в сравнении с пешеходным движением, а также при использовании личного и общественного транспорта. Также данные средства передвижения относятся к экологическим видам транспорта, что в условиях крупных городов, перенасыщенных автомобильным транспортом и высокой экологической нагрузкой в связи с выбросами вредных веществ, является важным показателем.

Несмотря на ряд положительных аспектов, связанных с использованием СИМ, существу-

ет один из весомых негативных показателей, выраженный высокой степенью аварийности данных устройств [11]. Начиная с 2017 г., согласно данным научного центра по безопасности дорожного движения (НЦ БДД), а также официальным статистическим показателям, в России начинают происходить дорожно-транспортные происшествия (ДТП) с участием СИМ, в результате которых люди получают ранения и погибают. Так, например, за период с 2019 по 2022 г. в России в общей сложности зафиксировано 2 165 ДТП, в которых было ранено 2 404 чел. и погибло 53 чел.

По данным средств массовой информации (СМИ), особой популярностью рассматриваемые средства передвижения пользуются в южных городах, например городах Краснодарского края, в которых за рассматриваемый период произошло 112 ДТП с участием СИМ. Для оценки изменения аварийности с участием СИМ в масштабах южных городов выполнено исследование, целью которого является прогнозирование количества ДТП с участием средств индивидуальной мобильности. Основные задачи исследования заключаются в следующем: анализ показателей аварийности субъекта Российской Федерации – Краснодарского края; анализ показателей аварийности с участием СИМ на примере Краснодарского края; разработка модели прогнозирования количества ДТП с участием СИМ на примере Краснодарского края.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования являются показатели аварийности, в частности карточки ДТП, представленные в открытом доступе в официальной статистической базе Госавтоинспекции. Следует отметить, что во многих исследованиях данные официальной статистической базы представляют собой основной материал для анализа [12]. Структура поисковых запросов является довольно разнообразной и позволяет оценить аварийность определённого региона по множеству показателей, относящихся к одному из основных компонентов классической системы «водитель-автомобиль-дорога-среда» [13, 14].

Для прогнозирования количества ДТП в качестве метода исследования использованы математические методы, в частности применена наука эконометрика [15, 16, 17], которая довольно часто используется для оценки статистических показателей с математической точки зрения.

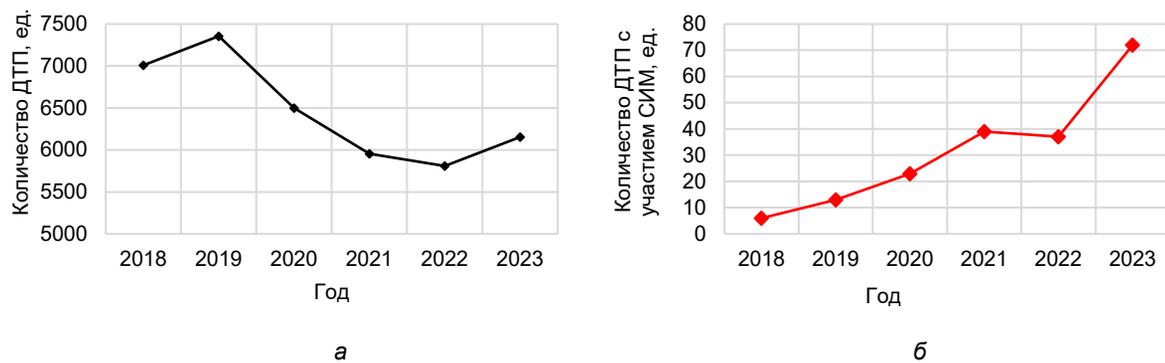


Рисунок 1 – Линейные графики изменения числа ДТП по Краснодарскому краю за 2018–2023 гг.: а – общее количество ДТП; б – количество ДТП с участием СИМ
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Line graphs of changes in the number of road accidents in Krasnodar Krai for 2018–2023. (a – total number of accidents; b – number of accidents involving SIM)
Source: compiled by the authors.

МЕТОДОЛОГИЯ

В исследуемой статистической базе существует возможность выгрузки карточек ДТП, содержащих наиболее полную информацию о происшествии, его виде, участнике, а также иной информации, которая является первичной при оформлении осмотра места происшествия. В результате выгрузки показателей по южному федеральному округу, в частности Краснодарскому краю, по периодам года – месяцам, были получены данные о числе

ДТП с участием СИМ за 2018–2023 гг. Всего за рассматриваемый период в анализируемом субъекте произошло 190 происшествий. Из представленных графиков (рисунок 1) видно, что в целом общее количество происшествий в рассматриваемом субъекте снижается, особенно в период с 2019 по 2022 г., но далее происходит небольшой рост, приблизительно на 6%, тогда как ДТП с участием СИМ в период с 2018 по 2021 г. увеличиваются с нарастающим эффектом и в 2023 г. происходит резкое увеличение числа аварий.

Таблица 1
Распределение числа ДТП с участием СИМ по месяцам года по результату анализа показателей аварийности Краснодарского края за период с 2018 по 2023 г.
Источник: составлено авторами.

Table 1
Distribution of the number of accidents involving SIM by months of the year according to the result of the analysis of accident rates of Krasnodar Krai for the period 2018–2023 years
Source: compiled by the authors.

Месяц \ Год	2018	2019	2020	2021	2022	2023
январь	0	0	1	0	0	6
февраль	1	1	0	0	1	2
март	1	0	1	3	1	1
апрель	0	0	0	2	7	2
май	0	1	0	6	6	8
июнь	1	2	1	6	7	5
июль	0	1	2	6	5	15
август	1	2	4	4	1	7
сентябрь	1	1	4	3	2	6
октябрь	1	1	6	5	5	12
ноябрь	0	3	0	3	1	6
декабрь	0	1	4	1	1	2

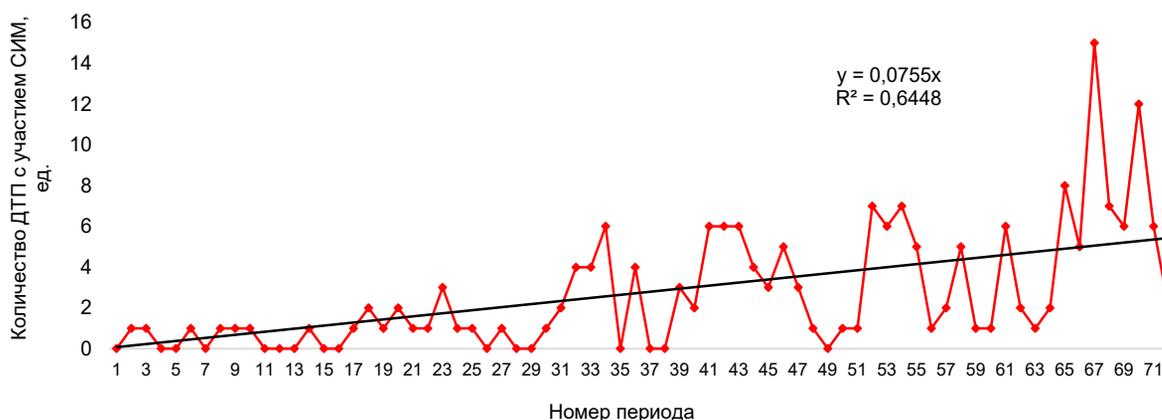


Рисунок 2 – Графическое изображение распределения количества ДТП с участием СИМ по периодам (месяцам года) для рассматриваемого субъекта Российской Федерации – Краснодарского края – в период с 2018 по 2023 г. Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Graphic representation of the distribution of the number of accidents involving SIM by periods (months of the year) for the subject of the Russian Federation (Krasnodar Krai) under consideration in the period from 2018 to 2023 years Source: compiled by the authors.

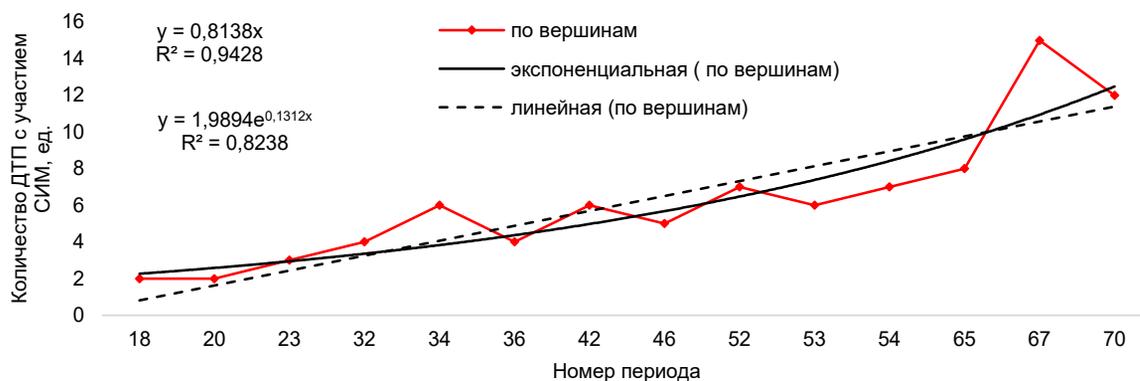


Рисунок 3 – График сглаживания количества ДТП с участием СИМ по максимальным значениям и графики экспоненциального и линейного тренда для Краснодарского края за период с 2018 по 2023 г. Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Smoothing graph of the number of accidents involving SIM based on maximum values and exponential and linear trend graphs for Krasnodar Krai for the period from 2018 to 2023 years Source: compiled by the authors.

В результате анализа данных, содержащихся в карточке ДТП, было установлено, что ДТП с участием СИМ в течение года происходят довольно часто и фиксируются во все периоды года как в зимний, так и в летний, что можно объяснить определенной климатической зоной расположения Краснодарского края, позволяющей использовать СИМ круглогодично. Несмотря на это, наибольшее число ДТП все же фиксируется в летний период (таблица 1).

Для интерпретации представленных данных (см. таблицу 1) в двухмерном виде и подбора тренда для изменения исследуемой величины количества ДТП с участием СИМ месяц каждого анализируемого года представлен как период с обозначением 1, 2...71, где 1 – соответствует периоду января 2018 г., 2 – периоду февраля 2018 г. и т.д. (рисунок 2). В результате подбора тренда установлено, что распределение ДТП с участием СИМ имеет линейный характер распределения. На данном этапе представленное распределение свидетельствует о характере увеличения рассматриваемого показателя – ДТП с участием СИМ (см. рисунок 2).

Из представленного графика (см. рисунок 2) видно, что количество ДТП с участием СИМ увеличивается при выполнении процедуры сглаживания графика по вершинам, установлено, что вид распределения с достоверностью более 80% описывается экспоненциальной функцией (рисунок 3). В данном случае, с учетом постоянно увеличивающихся показателей в качестве математической модели, для описания такого характера распределения во времени и последующего прогнозирования возможно использовать мультипликативную модель, описанную в разделе эконометрики – временные ряды [18].

В таком случае мультипликативная модель имеет вид

$$Y = T \cdot S \cdot E, \quad (1)$$

где Y – значение показателя временного ряда; T – трендовый компонент; S – сезонный компонент; E – случайный компонент.

Чтобы получить модель временного ряда мультипликативного вида, нужно определить все виды компонент. Для определения сезонной компоненты (S) необходимо осуществить выравнивание ряда методом скользящей

средней для рассматриваемых периодов временного ряда:

$$y'_t = \frac{y_1 + y_2 \dots + y_n}{n}, \quad (2)$$

где y'_t – значение скользящего среднего; y_1 – значение исследуемой величины в предыдущем периоде (день, месяц, квартал и пр.); y_2 – значение исследуемой величины в текущем периоде; y_n – значение исследуемой величины в последующем периоде; n – число периодов ($n=12$).

Далее необходимо осуществить процедуру центрирования скользящей средней (\bar{y}'_t) и выполнить расчет сезонной компоненты:

$$S_t = \bar{S}_t \cdot k_s, \quad (3)$$

где S_t – скорректированная сезонная компонента; \bar{S}_t – k_s – корректирующий коэффициент ($k_s = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \bar{S}_t$).

Расчет скорректированной сезонной компоненты (3) осуществляется с использованием формулы

$$\bar{S}_t = \frac{1}{m} \sum_{m=1}^1 \hat{S}_t, \quad (4)$$

где \bar{S}_t – средняя сезонная компонента; m – число рассматриваемых периодов.

Значение средней сезонной компоненты осуществляется с использованием формулы

$$\hat{S}_t = y_t / \bar{y}'_t, \quad (5)$$

где \hat{S}_t – оценочный сезонный компонент; y_t – значение исследуемой величины в текущем периоде; \bar{y}'_t – значение центрированной скользящей средней.

Результаты расчета средней сезонной компоненты (\bar{S}_t) и скорректированной сезонной компоненты (S_t) представлены в таблице 2.

Далее произведен расчет компонент трендовой составляющей в соответствии с видом мультипликативной модели (1). Согласно первому приближению тренда (см. рисунок 2) и построению тренда по максимальным значениям (вершинам) наиболее точно распределение описывается линейным трендом, причем во втором случае величина аппроксимации составляет 0,94, что свидетельствует о достаточно высокой степени точности в подборе тренда.

Таблица 2
Результаты расчета сезонной компоненты
Источник: составлено авторами.

Table 2
Calculation results of the seasonal component
Source: compiled by the authors.

Номер периода \ Год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2018											0,00	0,00
2019	0,00	0,10	0,00	0,00	0,08	0,14	0,07	0,13	0,06	0,06	0,16	0,05
2020	0,05	0,00	0,04	0,00	0,00	0,04	0,07	0,14	0,14	0,20	0,00	0,13
2021	0,00	0,00	0,09	0,06	0,16	0,16	0,15	0,10	0,07	0,12	0,07	0,02
2022	0,00	0,02	0,02	0,15	0,12	0,14	0,10	0,02	0,04	0,09	0,02	0,02
2023	0,11	0,03	0,02	0,03	0,13	0,08	0,24	0,11	0,09	0,18		
\bar{S}_t	0,031	0,031	0,034	0,047	0,099	0,112	0,126	0,099	0,080	0,13	0,049	0,043
S_t	0,417	0,426	0,457	0,64	1,343	1,526	1,72	1,354	1,091	1,77	0,67	0,588

$*k_s = 13,63$

В таком случае искомая компонента будет иметь вид

$$T = a \cdot t + b, \tag{6}$$

где a и b – коэффициенты, определяющие характер изменения тренда, точку пересечения и угол наклона.

Коэффициенты a и b будут определены с использованием формул:

$$a = \frac{\sum y_t \cdot S_t}{\sum t}; \tag{7}$$

$$b = \frac{\sum (y_t) \cdot \sum (S_t)}{\sum t}. \tag{8}$$

В результате расчета определены значения коэффициента $a = -0,25$ и $b = 0,08$, тогда модель трендовой компоненты имеет вид

$$T = -0,25 \cdot t + 0,08. \tag{9}$$

На заключительном этапе необходимо оценить случайную компоненту (E), которая определяется с использованием формулы

$$E = y_t - F, \tag{10}$$

где F – показатель значения временного ряда, опережаемый как произведение трендовой (T) и сезонной компоненты (S):

$$F = T \cdot S. \tag{11}$$

В данном случае величина случайной компоненты позволяет оценить величину ошибки, что будет использовано при расчете показателя достоверности.

Расчет всех необходимых компонент позволил определить вид модели прогнозирования количества ДТП с участием СИМ для Краснодарского края, которая по результату выборки данных за период с 2018 по 2023 гг. без учета случайной компоненты имеет вид

$$Q = S_t \cdot (0,08 - 0,25 \cdot t), \tag{12}$$

где Q – значение рассматриваемого показателя – количество ДТП с участием СИМ, ед.; S_t – сезонная компонента для определенного месяца (1...12); 0,08, -0,25 – коэффициенты b и a соответственно – составляющие трендового компонента; t – время, значение рассматриваемого периода.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С использованием полученной модели (12) для Краснодарского края были спрогнозированы показатели количества ДТП с участием СИМ на период 2024 г., что наглядно отражено в таблице 3.

Выполненный расчет позволил спрогнозировать 72 ДТП с участием СИМ в 2024 г. и количественно определить значение ДТП для каждого месяца, что наглядно отражено в таблице 3. Графически полученные результаты представлены на рисунке 4.

Таблица 3
 Результаты прогнозирования количества ДТП с участием СИМ
 для Краснодарского края на период 2024 г. (январь-декабрь)
 Источник: составлено авторами.

Table 3
 Results of forecasting the number of accidents involving SIM
 for Krasnodar region for the period of 2024 (January-December)
 Source: compiled by the authors.

t	Компоненты	T	S	Q
73	Январь 2024	5,50	0,42	2
74	Февраль 2024	5,58	0,43	2
75	Март 2024	5,66	0,46	3
76	Апрель 2024	5,74	0,64	4
77	Май 2024	5,81	1,34	8
78	Июнь 2024	5,89	1,53	9
79	Июль 2024	5,97	1,72	10
80	Август 2024	6,05	1,35	8
81	Сентябрь 2024	6,13	1,09	7
82	Октябрь 2024	6,21	1,77	11
83	Ноябрь 2024	6,29	0,67	4
84	Декабрь 2024	6,37	0,59	4

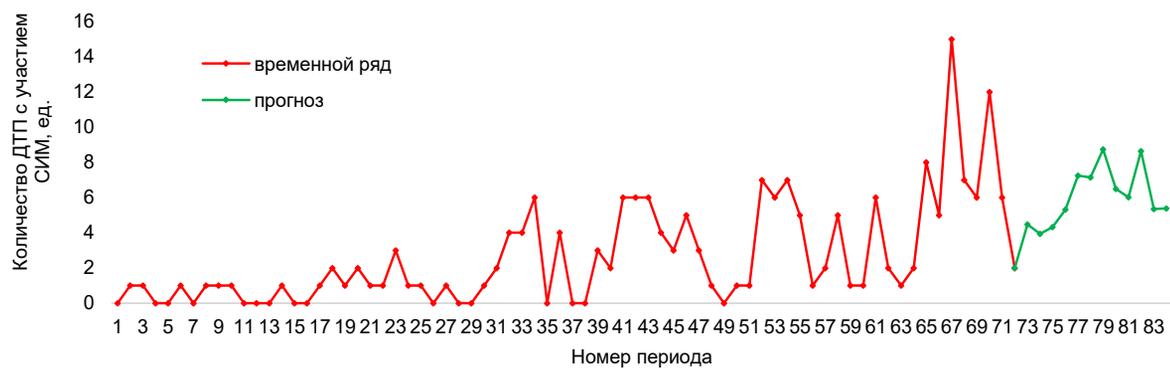


Рисунок 4 – Графическое изображение результатов прогнозирования
 с использованием полученной модели (12)
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Graphical representation of forecasting results using the obtained model (12)
 Source: compiled by the authors.

Величина ошибки определена с использованием формулы

$$\delta = \frac{\sum e_i^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}. \quad (13)$$

В результате расчета величина ошибки составила 33, позволяет судить о 67%-й достоверности полученной модели (12).

Следует отметить, что величина ошибки в 33% в данном случае свидетельствует о наличии неучтенных факторов, которыми в данном случае могут стать такие показатели (факторы), как количество СИМ в рассматриваемом субъекте, протяженность дорожной инфраструктуры, используемой для движения СИМ, и многие иные параметры (факторы), позволяющие повысить точность прогнозирования и снизить величину ошибки, а также расширить полученную модель и представить ее как многофакторную. Ввиду отсутствия официальных баз данных по иным параметрам (факторам), которые могли бы быть включены в разрабатываемую модель прогноза, исследование выполнено с применением официального источника, что значительно ограничивает использование анализируемого информационного источника до одного параметра (фактора) – количество ДТП с участием СИМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ ДТП с участием СИМ на территории Краснодарского края позволил установить, что характер распределения исследуемых величин по месяцам рассматриваемых лет (за период с 2018 по 2023 г.) описывается временным рядом. С использованием эконометрики установлено, что увеличивающийся характер изменения рассматриваемых величин возможно описать с применением мультипликативной модели, состоящей из трех компонент – сезонной, трендовой и случайной. Расчет всех компонент позволил определить вид модели ($Q = S_t \cdot e_t \cdot (0,08 - 0,25 \cdot t)$), позволяющей произвести расчет количества ДТП с участием СИМ для рассматриваемого субъекта – Краснодарского края. Расчет с использованием полученной модели позволил определить количество ДТП с участием СИМ в 2024 г. – 72 с распределением по месяцам года, обеспечив точность прогнозирования 67%.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Новиков А.Н., Шевцова А.Г. Безопасное и эффективное управление транспортными потоками в городской транспортной системе. М.: Академия, 2022. 205 с.
- Новиков А.Н., Еремин С.В., Шевцова А.Г. Пути повышения безопасности функционирования общественного транспорта в условиях перспективного развития города. Белгород-Орел: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. 239 с.
- Кравченко П.А. Организация и безопасность дорожного движения в больших городах // Наука и техника в дорожной отрасли. 2013. № 1(64). С. 1–2.
- Нестеренко И.С., Нестеренко Г.А., Залознов И.П. К вопросу обеспечения безопасности на автомобильных дорогах // Грузовик. 2024. № 4. С. 32–34.
- Купавцев В.А., Донченко В.В. Оценка безопасной скорости движения СИМ с учетом изменения радиуса колеса // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2024. № 1(76). С. 84–90.
- Юнг А.А., Шевцова А.Г., Васильева В.В. Оценка эффективности использования СИМ в городской среде // Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 1-1(84). С. 87–93.
- Шевцова А.Г., Васильева В.В., Юнг А.А. Концепция использования средств индивидуальной мобильности как экологичного вида транспорта // Мир транспорта и технологических машин. 2023. № 4-1(83). С. 115–120.
- Волков П.А., Кеменяш Ю.В. Средства индивидуальной мобильности: вопросы теории и практики использования // Вестник Белгородского юридического института МВД России имени И.Д. Путилина. 2021. № 1. С. 51–55.
- Журавлев А.С., Янкевич Е.А. Средство индивидуальной мобильности как новый вид транспортного средства // Правоохранительные органы: теория и практика. 2023. № 2(45). С. 101–103.
- Сатышев С.Н., Муратова К.В. Мобильность в эпоху пандемии COVID-19 // Инновации. Наука. Образование. 2022. № 53. С. 1193–1196.
- Юнг А.А., Шевцова А.Г. Оценка аварийности средств индивидуальной мобильности в различных условиях движения // Современная наука. 2021. № 2. С. 31–36.
- Толстой О.В., Шевцова А.Г. Метод повышения уровня безопасности местных автомобильных дорог // Научный портал МВД России. 2024. № 1(65). С. 60–68.
- Shevtsova A., Novikov A., Evtyukov S., Marusin A. Probabilistic model for assessing accident rates // Journal of Applied Engineering Science. 2023. Vol. 21, No. 3. P. 846–852.
- Шевцова А.Г. Математический анализ определенных показателей безопасности дорожного движения в Российской Федерации // Вестник СибАДИ. 2021. Т. 18, № 6(82). С. 700–711. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-700-711>
- Сафронова Я.Д. Эконометрика: математическое моделирование в экономических исследованиях // Тенденции развития науки и образования. 2024. № 105-5. С. 109–112.

16. Шаповалов Д.А., Хабаров Д.А., Хабарова И.А., Антипова А.А. Аналитические средства: математическая экономика и эконометрика // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. 2020. № 3. С. 48.

17. Кочегуров В.А., Константинова Л.И., Гальченко В.Г. Инженерная эконометрика в задачах системного анализа // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319, № 2. С. 16–21.

18. Зоркальцев В.И., Полковская М.Н. Мультипликативная модель выделения составляющих временных рядов // Сибирский журнал вычислительной математики. 2022. Т. 25, № 2. С. 111–127.

REFERENCES

1. Novikov A.N., Shevtsova A.G. *Safe and effective management of traffic flows in the urban transportation system*. Moscow: Academia, 2022:205. (in Russ.)

2. Novikov A.N., Eremin S.V., Shevtsova A.G. *Ways to increase the safety of public transport functioning in the conditions of perspective city development*. Belgorod-Orel: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. V.G. Shukhov, 2023: 239. (in Russ.)

3. Kravchenko P.A. Organization and safety of road traffic in big cities. *International Journal «Science & Engineering for Roads»*. 2013; 1(64): 1–2. (in Russ.)

4. Nesterenko I.S., Nesterenko G.A., Zaloznov I.P. On the issue of ensuring safety on roads. *Gruzovik*. 2024; 4: 32–34. (in Russ.)

5. Kupavtsev V.A., Donchenko V.V. Estimation of the safe speed of the SIM taking into account the change of the wheel radius. *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta (MADI)*. 2024; 1(76): 84–90. (in Russ.)

6. Jung A.A., Shevtsova A.G., Vasilyeva V.V. Evaluation of the effectiveness of using sim in an urban environment. *World of transport and technological machines*. 2024; 1-1(84): 87–93. (in Russ.)

7. Shevtsova A.G., Vasilyeva V.V., Jung A.A. The concept of using means of individual mobility as an eco-friendly mode of transport. *World of transport and technological machines*. 2023; 4-1(83): 115–120. (in Russ.)

8. Volkov P.A., Kemenyash J.V. Means of individual mobility: questions of theory and practice of use. *Scientific and practical journal «Vestnik of Putilin Belgorod Law Institute of Ministry of the Interior of Russia»*. 2021; 1: 51–55. (in Russ.)

9. Zhuravlev A.S., Yankevich E.A. Means of individual mobility as a new type of vehicle. *Law enforcement agencies: theory and practice*. 2023; 2(45): 101–103. (in Russ.)

10. Satyshev S.N., Muratova K.V. Mobility in the era of COVID-19 pandemic. *Innovations. Science. Education*. 2022; 53: 1193–1196. (in Russ.)

11. Jung A.A., Shevtsova A.G. Assessment of the accident rate of personal mobility equipment in various driving conditions. *Modern Science*. 2021; 2: 31–36. (in Russ.)

12. Tolstoy O.V., Shevtsova A.G. Method of increasing the safety level of local highways. *Scientific portal of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2024; 1(65): 60–68. (in Russ.)

13. Shevtsova A., Novikov A., Evtyukov S., Marusin A. Probabilistic model for assessing accident rates. *Journal of Applied Engineering Science*. 2023; 21, No. 3: 846–852.

14. Shevtsova A.G. Mathematical analysis of certain road safety indicators in the Russian Federation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18(6): 700–711. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-700-711>

15. Safronova J.D. Econometrics: mathematical modeling in economic research. *Tendencies of science and education*. 2024; 105-5: 109–112. (in Russ.)

16. Shapovalov D.A., Khabarov D.A., Khabarova I.A., Antipova A.A. Analytical tools: mathematical economics and econometrics. *International Journal of Applied Sciences and Technologies Integral*. 2020; 3: 48. (in Russ.)

17. Kochegurov V.A., Konstantinova L. I., Galchenko V.G. Engineering econometrics in the tasks of system analysis. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2011; T. 319, no 2: 16–21. (in Russ.)

18. Zorkaltsev V.I., Polkovskaya M.N. Multiplicative model of time series components selection. *Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2022; T. 25, no 2: 11–127. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Шевцова А.Г. Постановка цели и задач исследования.

Савотченко С.Е. Алгоритм математических действий, подбор модели прогнозирования.

Юнг А.А. Сбор статических данных, выполненные расчеты.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Shevtsova A.G. Goals and objectives of the study statement.

Savotchenko S.E. Algorithm of mathematical operations, forecasting model selection.

Jung A.A. Statistical data collection, calculations performing.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шевцова Анастасия Геннадьевна – д-р техн. наук, проф. кафедры «Эксплуатация и организация движения автотранспорта» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), **ORCID**: 0000-0001-8973-9271, **SPIN-код**: 1326-7713, e-mail: shevcova-anastasiya@mail.ru

Савотченко Сергей Евгеньевич – д-р физ.-мат. наук, доц., проф. кафедры «Математики» Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе (117485, г. Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, д. 23),

ORCID: 0000-0002-7158-9145, **SPIN-код:** 2552-4344, e-mail: savotchenkose@mail.ru

Юне Анастасия Алексеевна – аспирант кафедры «Эксплуатация и организация движения автотранспорта» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), **ORCID:** 0000-0003-0691-1393, **SPIN-код:** 8392-4329, e-mail: yungnastena33@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anastasia G. Shevtsova – Dr. of Sci., Professor of the Transport Traffic Operation and Organization Department, V.G. Shukhova Belgorod State Technological University (308012, Belgorod, 46, Kostiukova

Street), **ORCID:** 0000-0001-8973-9271, **SPIN-код:** 1326-7713, e-mail: shevcova-anastasiya@mail.ru

Sergey E. Savotchenko – Dr. of Sci., Associate Professor, Professor of the Mathematics Department, Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Exploration University. (117485, Moscow, GSP-7, 23, Miklukho-Maklaya Street), **ORCID:** 0000-0002-7158-9145, **SPIN-код:** 2552-4344, e-mail: savotchenkose@mail.ru

Anastasia A. Iung – Postgraduate student, Transport Traffic Operation and Organization Department, V.G. Shukhova Belgorod State Technological University (308012, Belgorod, 46, Kostiukova Street), **ORCID:** 0000-0003-0691-1393, **SPIN-код:** 8392-4329, e-mail: yungnastena33@gmail.com

**РАЗДЕЛ III.
СТРОИТЕЛЬСТВО
И АРХИТЕКТУРА**



**PART III.
CONSTRUCTION
AND ARCHITECTURE**

Научная статья
УДК 625.711
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-606-617>
EDN: OGDUUY



МЕТОДЫ РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛЕДОВЫХ ПЕРЕПРАВ

И.С. Кузнецов ✉, В.В. Сиротюк, В.Н. Кузнецова

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет «СибАДИ»,
г. Омск, Россия

✉ ответственный автор
ilyxa_kyznetsov@vk.com

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассматривается проблема, актуальная для территории нашей страны – расчёт несущей способности ледовых переправ и автозимников. Эта проблема всё более актуализируется в связи с развитием северных территорий, увеличением грузоподъёмности автотранспорта и величины грузопотока. При этом строительство постоянных дорог и мостовых переходов требует очень больших капитальных затрат, пока недоступных для РФ.

Методы и материалы. Выполнен критический анализ методов определения расчётным путём несущей способности ледового покрова на переправах (максимальной разрешённой нагрузки на ось одиночного автомобиля или автопоезда). Рассмотрены рекомендации нормативно-методических документов по данному вопросу. Представленный анализ отечественных и зарубежных публикаций позволил дать оценку математическим моделям разного уровня сложности и детализации, с разным набором факторов, влияющих на конечный результат.

Результаты. В результате исследований составлена сводная таблица, в которой приведены формулы для расчёта несущей способности ледового покрова, параметры, которые учитываются в этих формулах, а также значения несущей способности, рассчитанной по данным формулам для двух температур: 0°C и минус 20°C.

Заключение. По результатам анализа видно, что наибольшее количество параметров учитывается в трёх зависимостях: М.М. Казанского – Р.А. Шульмана; Q. Wang; ОДМ 218.4.030–2016 «Методические рекомендации по оценке грузоподъёмности ледовых переправ». При этом величина несущей способности, рассчитанная по 11 представленным формулам, изменяется в 2-3 и более раза. Следовательно, представленные математические модели для прогнозирования несущей способности ледовых переправ требуют экспериментальной проверки на реальных объектах методом протаскивания контрольного груза (при некоторой доработке этого метода).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ледовые переправы, несущая способность ледяного покрова, физико-механические свойства льда, формулы для расчёта несущей способности

Статья поступила в редакцию 03.03.2024; одобрена после рецензирования 05.06.2024; принята к публикации 14.08.2024.

Все 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: Кузнецов И.С., Сиротюк В.В., Кузнецова В.Н. Методы расчета несущей способности ледовых переправ // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 4. С. 606-617. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-606-617>

© Кузнецов И.С., Сиротюк В.В., Кузнецова В.Н., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-606-617>

EDN: OGDUUY

METHODS FOR ICE CROSSINGS LOAD CAPACITY CALCULATION

Iliya S. Kuznetsov ✉, **Viktor V. Sirotiuk**, **Viktoriya N. Kuznetsova**
Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Russia, Omsk

✉ corresponding author
ilyxa_kuznetsov@vk.com

ABSTRACT

Introduction. The article deals with a problem relevant to the territory of our country – the calculation of the bearing capacity of ice crossings and winter roads. This problem is becoming more and more urgent in connection with the development of the northern territories, an increase in the carrying capacity of road transport and the volume of cargo traffic. At the same time, the construction of permanent roads and bridge crossings requires very large capital expenditures, which are not yet available for the Russian Federation.

Methods and materials. A critical analysis of methods for determining by calculation the bearing capacity of ice cover at crossings (the maximum permissible load on the axle of a single car or road train) was carried out. The recommendations of normative and methodological documents on this issue are considered. The presented analysis of domestic and foreign publications made it possible to evaluate mathematical models of different levels of complexity and detail, with a different set of factors influencing the final result.

Results. As a result of the research, a summary table, which contains formulas for calculating the bearing capacity of the ice cover, the parameters that are taken into account in these formulas, as well as the values of the bearing capacity calculated using these formulas for two temperatures: 0 °C and minus 20 °C has been compiled.

Conclusions. According to the results of the analysis, it can be seen that the largest number of parameters is taken into account in M.M. Kazansky-R.A. Shulman; Q. Wang; ODM 218.4.030-2016 Methodological recommendations for assessing the carrying capacity of ice crossings' dependencies. At the same time, the value of the bearing capacity, calculated according to the 11th formulas, varies by 2-3 or more times presented. Consequently, the presented mathematical models for predicting the carrying capacity of ice crossings require experimental verification on real objects by dragging the control cargo (with some refinement of this method).

KEYWORDS: ice crossings, bearing capacity of the ice sheet, physical and mechanical properties of ice, formulas for calculating the bearing capacity

The article was submitted 03.03.2024; approved after reviewing 05.06.2024; accepted for publication 14.08.2024.

All authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation. Kuznetsov I.S., Sirotiuk V.V., Kuznetsova V.N. Methods for ice crossings load capacity calculation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (4): 606-617. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-606-617>

© Kuznetsov I.S., Sirotiuk V.V., Kuznetsova V.N., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Арктика находится в поле пристального внимания руководства России. В 2020 г. был принят ряд важных документов стратегического и долгосрочного планирования, определяющих государственную политику развития Арктической зоны. Важнейшей проблемой при реализации поставленных в этих документах задач является логистика на северных территориях. На текущий период ежегодно в России официально организуются и функционируют в зимний период более 1000 ледовых автозимников и переправ общей протяжённостью, измеряемой тысячами километров [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

В ближайшей перспективе альтернативы автозимникам и ледовым переправам не прослеживается:

– воздушный транспорт очень дорог, требует строительства аэродромов и не может обеспечить необходимый грузооборот;

– водный транспорт ограничен временем навигации на северных реках в 2-4 месяца и требует дополнительной доставки грузов до объектов другими видами транспорта;

– строить постоянные дороги и мосты экономически неоправданно из-за их значительной протяжённости, неразвитости транспортной сети арктических регионов и отсутствия баз строительной индустрии; срок окупаемости подобных транспортных объектов лежит за пределами их срока службы.

Поэтому дальнейшее развитие сети временных дорог, ледовых автозимников и переправ с обоснованными методами расчёта их допустимой грузоподъёмности и безопасности движения транспортных средств является актуальной задачей.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Расчёт несущей способности ледового покрова при динамическом воздействии транспортной нагрузки является сложнейшей задачей, т.к. зависит от десятков факторов, изменяющихся в широких пределах [8, 9, 10, 11, 12, 13]. Крупные исследования в этой области начались более 100 лет назад. На сегодняшний день разработано множество теоретических и прикладных методов расчёта несущей способности ледовых переправ (рисунок 1).

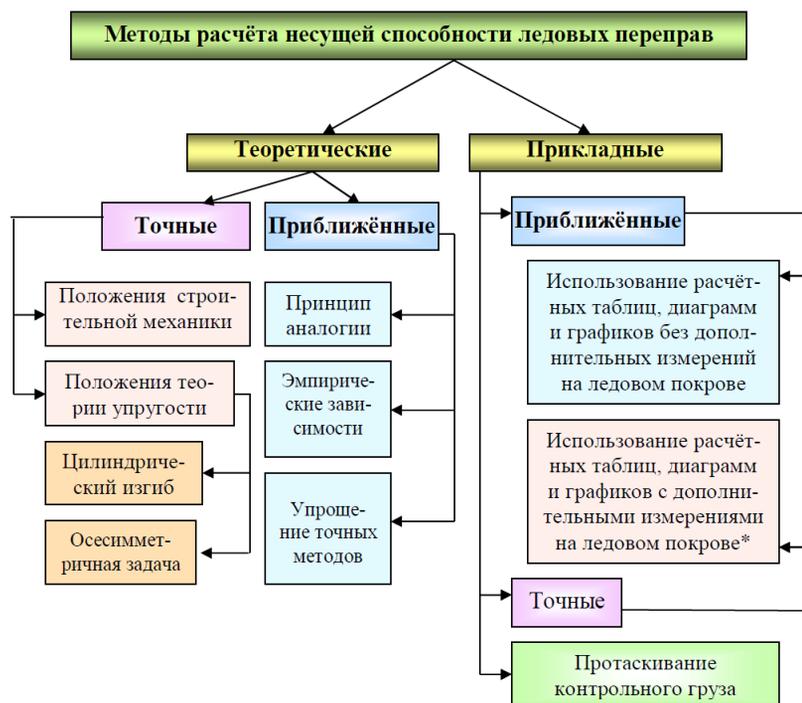


Рисунок 1 – Методы расчета ледовых переправ [14]

Figure 1 – Ice crossing calculation methods [14]

В случаях, когда необходимо быстро определить несущую способность ледового покрова, пользуются прикладными методами (таблицы, диаграммы, графики). Они, в свою очередь, подразделяются на две категории: приближённые и точные.

К приближённым относятся методы без проведения дополнительных измерений на ледовом покрове (к дополнительным измерениям не относится определение толщины ледового покрова). По температуре воздуха и толщине ледового покрова определяется допустимая нагрузка на лёд, скорость движения и дистанция между автомобилями.

К точным относятся методы с определением дополнительных параметров ледового покрова. Для этого из ледового покрова могут выпиливаться балки, они испытываются при помощи мобильных прессов (определяется предел прочности при изгибе).

Также известен способ, который рекомендуется нормативными документами¹, – протаскивание контрольного груза с массой, превышающей на 10% массу гружёного транспортного средства.

Теоретические методы тоже можно разделить на приближённые и точные. Приближённые методы рассматривают одиночную нагрузку (короткие передачи) и основываются на эмпирических зависимостях (П.И. Лебедев), принципе аналогии (М.М. Корунов) или являются упрощением точных методов (М.М. Казанский и А.Р. Шульман)².

К числу упрощённых расчётных приёмов относится метод аналогий, основанный на том, что при изгибе пластинки по цилиндрической поверхности возникающие напряжения будут равны напряжениям в бруске прямоугольного сечения высотой h , равной толщине льда, и шириной $b = 1$. Нагрузка на лёд прямо пропорциональна квадрату его толщины. По величине нагрузки и толщине льда для нормальной работы ледяного покрова можно произвести расчёт для любой толщины льда и нагрузки.

М.М. Корунов, предложивший этот метод, взял опытные данные, при которых лёд кристаллической структуры толщиной 24 см выдерживал груз массой $P = 6$ т и получил для практических расчётов следующую простейшую формулу²:

$$P = A \cdot h^2, \quad (1)$$

где P – максимальная нагрузка, кг; A – опытный коэффициент, кг/см²; h – наименьшая фактическая толщина льда без снега, см.

Метод аналогии достаточно прост и даёт для предварительных расчётов удовлетворительные результаты. Однако на практике редко бывают аналогичные условия, кроме того, несмотря на то, что толщина льда является одной из основных характеристик, её недостаточно для определения несущей способности ледового покрова.

В зарубежных публикациях используется формула (1) как Gold formula. Проведённые в 2011 г. исследования показали, что несущая способность «белого» (мутного) льда снижена на 50% по сравнению с прозрачным льдом [15]. В связи с этим данная формула претерпела изменения, в которых учитывается наличие в ледяном покрове «белого льда». Зависимость выглядит следующим образом [16]:

$$P = A \cdot h^2 \left(1 + \frac{100 - \% \text{ белого льда}}{100} \right).$$

Также в этих исследованиях рекомендуются следующие значения коэффициента A : для прозрачного ледяного покрова без трещин – 3,5 кг/см² при температуре около 0 °С; при низкой температуре A возрастает до 17,5 кг/см².

В работе [17] приведены результаты испытаний по «проламыванию» льда разной толщины (рисунок 2). Сопоставление результатов расчётов и испытаний показало, что при значении коэффициента $A = 3,5$ кг/см² вероятность проламывания ледового покрова составляет 6%, а при значении $A = 7$ кг/см² вероятность возрастает до 40%.

¹ ОДН 218.010–98. Инструкция по проектированию, строительству и эксплуатации ледовых переправ [Электронный ресурс]. Введён 1998-10-01 // Кодекс. Право / ЗАО «Информационная компания «Кодекс». СПб., 2010.

² Песчанский И.С. Ледоведение и ледотехника. 2-е изд. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 461 с.

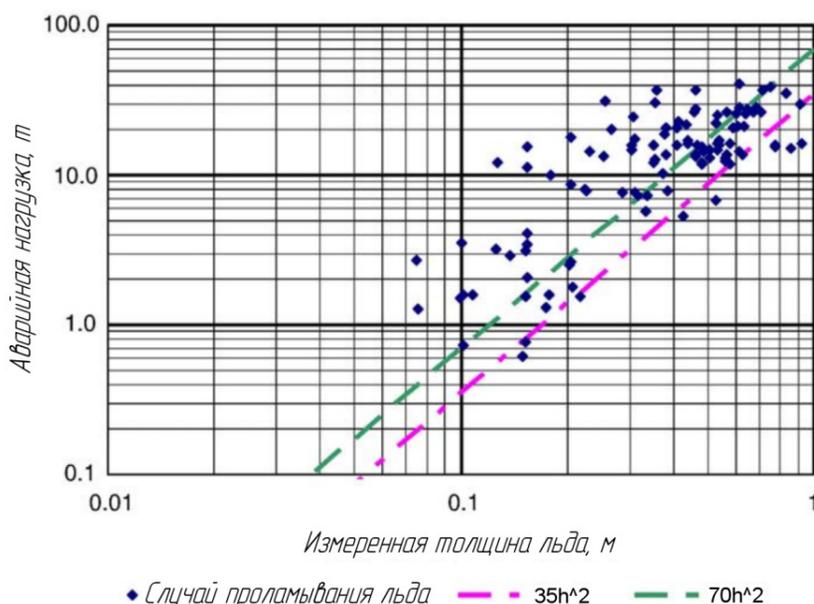


Рисунок 2 – Данные об аварийной нагрузке в зависимости от толщины льда [17]

Figure 2 – Emergency load data depending on the thickness of the ice [17]

Известна зависимость, предложенная М.М. Коруновым, основанная на методе аналогии (2)²:

$$P = \frac{h^2}{100} \tag{2}$$

Формулы (1) и (2) позволяют быстро определить несущую способность ледового покрова при одной основной характеристике – толщине льда. Однако их точность нельзя признать удовлетворительной, так как несущая способность может сильно отличаться даже при одинаковой толщине льда, при влиянии иных факторов.

Более достоверными являются формулы, полученные при решении осесимметричной задачи. Так, например, в работе приведена зависимость вида²

$$P = \frac{B}{N} h^2 K S, \tag{3}$$

где P – допускаемая нагрузка на лёд, т; B – коэффициент распределения нагрузки (100 – для колёсных грузов и 125 – для гусеничных массой до 18 т и 115 – массой более 18 т); h – наименьшая фактическая толщина

льда без снега, м; K – температурный коэффициент, определяемый по формуле

$$K = \frac{100 + \Theta}{100},$$

где Θ – температура воздуха за истекшие трое суток: при положительных температурах $K=1-0,05n_1$, где n_1 – число суток с момента появления на льду воды; N – коэффициент запаса прочности и учёта трещин (таблица 1); S – коэффициент учёта солёности (1,0 – для пресных льдов и 0,7 – для солёных).

Формула (3) более совершенна, т.к. учитывает многие факторы, влияющие на несущую способность ледового покрова.

Зная значение предела прочности льда на растяжение при изгибе, можно найти разрушающую нагрузку по зависимости (4)³:

$$P = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{и}} \cdot b \cdot h^2}{3 \cdot l}, \tag{4}$$

где $\sigma_{\text{и}}$ – предел прочности льда на растяжение при изгибе, МПа; b – ширина балки, вырезаемой из ледяного покрова, м; l – расстояние между опорами при испытании, м.

³ Телов В.И. Наплавные мосты, паромные и ледяные переправы. М.: Транспорт, 1978. 384 с.

Таблица 1

Значения коэффициента запаса N для вычисления допустимых напряжений⁴

Table 1

Values of the reserve factor N for calculating permissible stresses⁴

Тип переправы	Ледовый покров			
	ненарушенный, постоянной толщины	неравномерной толщины	с сухими трещинами	со сквозными трещинами
Единовременные или периодически действующие автомобильные переправы с пропуском грузов на пределе прочности	1,0	1,20	1,25	1,6
Автотранспортные и гужевые трассы без верхнего строения, действующие периодически	1,20	1,50	1,75	2,0
Автотранспортные и гужевые трассы без верхнего строения, действующие постоянно	1,50	1,50	1,75	–
Автотранспортные и гужевые трассы с верхним строением, действующие постоянно	1,30	1,30	1,50	–
Железнодорожные переправы	2,0	2,0	2,0	–

Из формулы (4) следует, что температура льда оказывает малое влияние на его прочность⁵, хотя это не так. В среднем значение данного параметра находится в пределах от 0,7 до 3 МПа. В приведённых далее расчётах примем значение $\sigma_{и}$ равным 1,5 МПа.

Также следует выбирать определённый размер балок для проведения эксперимента. Сечение балки должно быть квадратным, а её длина должна в 7-8 раз превышать ширину. При данных условиях с использованием зависимости (4) производились исследования, представленные в работе [18].

В работе [19] показана зависимость (5), сходная с (4):

$$P = \frac{4 \cdot \sigma_{и} \cdot b \cdot h^3 \cdot d}{l^3}, \quad (5)$$

где d – расстояние до центра приложения нагрузки, м.

При проведении исследований И.С. Песчанский получил зависимость несущей способности ледового покрова (6)²:

$$P = \frac{\sigma_{и} \cdot h^{5/4}}{31(0,76 \cdot r - h^{5/4})}, \quad (6)$$

где r – радиус эквивалентной круглой грузовой площадки при фактической грузовой площадке в форме прямоугольника длиной L и шириной A , м.

И.С. Песчанский исследовал зависимость влияния температуры на предел прочности льда на растяжение при изгибе. Согласно полученным в ходе эксперимента данным, при температуре -5 °С предел прочности составляет 0,5 МПа, а при температуре -20 °С данный показатель возрастает до 1,6 МПа. В целом полученные данные согласуются с результатами аналогичных экспериментов, проведённых В.В. Лавровым и Н.Д. Шишовым [20].

Используя полученную И.С. Песчанским зависимость прочности на растяжения от температуры, можно заменить показатель $\sigma_{и}$ на температуру льда, измерение которой занимает гораздо меньше времени, чем $\sigma_{и}$. Тогда зависимость (6) будет выглядеть следующим образом:

$$P = \frac{0,5 \cdot 10^6 \cdot (0,8 + 0,11 \cdot |t_{л}|) \cdot h^{5/4}}{31(0,76 \cdot r - h^{5/4})},$$

где $t_{л}$ – температура льда, °С.

⁴ Песчанский И.С. Ледоведение и ледотехника. 2-е изд. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 461 с.

⁵ Степанюк И.А. Технологии испытаний и моделирования морского льда. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 77 с.

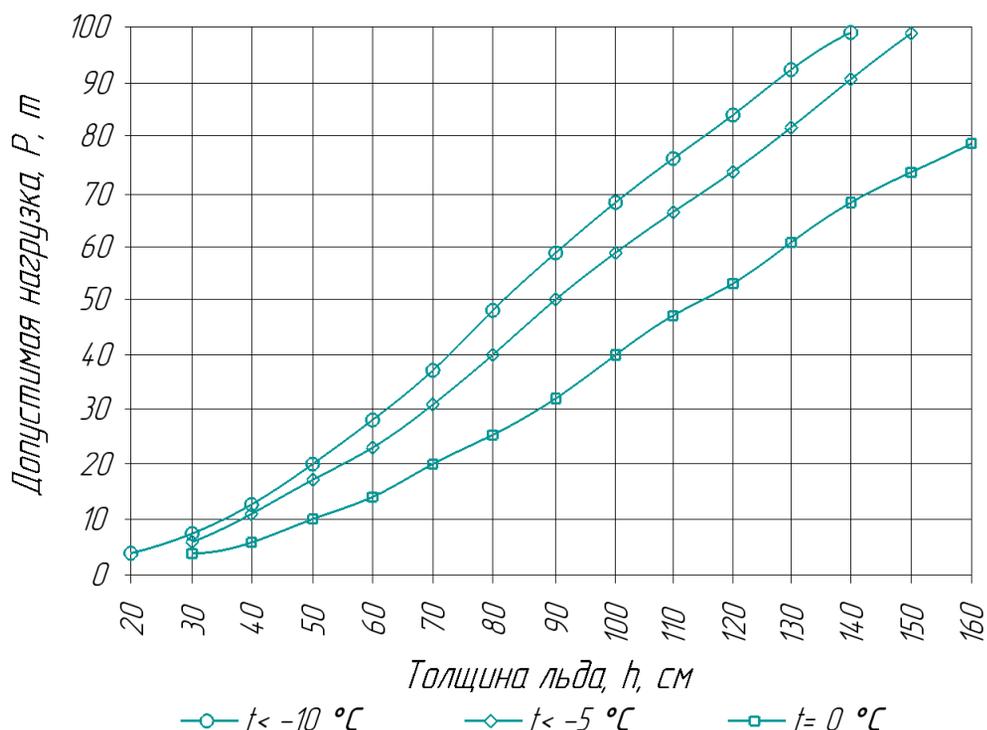


Рисунок 3 – Зависимость допустимой максимальной нагрузки от толщины льда
 Источник: ОДМ 218.4.030–2016.

Figure 3 – Dependence of permissible increased load on ice thickness
 Source: ODM 218.4.030–2016.

Основными документом, применяемыми на практике при проектировании ледовых автотрасс, являются ГОСТ Р 58948–2020, ОДМ 218.4.030–2016 и ОДН 218.010–98. В них предлагается использовать методику, в которой необходимо задать толщину льда и коэффициенты, учитывающие его структуру и наличие армирования. Зависимость выглядит следующим образом (7):

$$P = \left(\frac{h_{пр} + 0,5h_{мут}K_1}{11 \cdot n_{и}} \right)^2 K_2 K_3 K_{арм}, \quad (7)$$

где $h_{пр}$, $h_{мут}$ – толщина прозрачного и мутного льда, см; $n_{и}$ – коэффициент, учитывающий интенсивность движения транспорта; K_1 – коэффициент изменения общей структуры льда при его намораживании; K_2 – коэффициент запаса прочности при оттепелях; K_3 – коэффициент неравномерности структуры льда; $K_{арм}$ – коэффициент, учитывающий наличие армирующей прослойки из геосинтетического материала.

При необходимости можно применить график, полученный с использованием зависимости (7) (рисунок 3).

Многие авторы используют в своих работах результаты исследований Д.М. Мастерсона [17]. Им получены зависимости, из которых можно выразить максимальную величину нагрузки на ледовый покров (8):

$$P = \frac{\sigma_{и} \cdot h^2}{0,275 \cdot (1 + \mu) \cdot \log_{10} \left(\frac{Eh^3}{kb^4} \right)}, \quad (8)$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости льда, Па; k – реакция опоры, для воды 9,81 кН/м³; b – коэффициент, рассчитанный как

$$b = \begin{cases} \sqrt{1,6c^2 + h^2} - 0,675h & \text{для } c < 1,724h \\ c & \text{для } c \geq 1,724h \end{cases}$$

где c – радиус приложения нагрузки.

Согласно стандарту ISO 19906 для расчёта максимальной величины нагрузки на ледовый покров с небольшим количеством видимых трещин можно использовать зависимость (9) [21]:

$$P = \frac{\sigma_n \cdot h^2}{0,529 \cdot (1 + 0,54\mu) \left[\lg \left(\frac{Eh^3}{kb^4} \right) - 0,71 \right]}, \quad (9)$$

где b определяется по вышеприведённой формуле.

Значения максимальной величины нагрузки, полученные с использованием зависимости (9), приблизительно на 40% ниже, чем значения, полученные при использовании зависимости (8), что объясняется применимостью зависимости (9) для льда с трещинами.

Для определения максимальной нагрузки на лед авторами получена зависимость (10), которая выглядит следующим образом:

$$P = \frac{\sigma_n \cdot h^2}{0,275 \cdot (1 + \mu) \cdot \lg_{10} \left(\frac{(5 \cdot t_{\text{л}} + 53) \cdot 10^6 \cdot h^3}{kb^4} \right)}. \quad (10)$$

При невозможности экспериментального определения предела прочности на растяжение при изгибе полученная авторами зависимость (10) принимает следующий вид (11):

$$P = \frac{0,5 \cdot 10^6 (0,8 + 0,11 \cdot |t_{\text{л}}|) \cdot h^2}{0,275 \cdot (1 + \mu) \cdot \lg_{10} \left(\frac{(5 \cdot |t_{\text{л}}| + 53) \cdot 10^6 \cdot h^3}{kb^4} \right)} \cdot K_T, \quad (11)$$

K_T – коэффициент запаса прочности при наличии трещин ($K_T = 0,6$).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты определения величины несущей способности ледового покрова, определённой по вышеприведённым формулам, представлены в таблице 2. Для расчётов приняты два значения толщины льда h : 20 и 50 см.

Таблица 2
Сравнение несущей способности льда, рассчитанной по различным методикам
Источник: составлено авторами с учётом⁶

Table 2
Comparison of ice bearing capacity calculated using different methods
Source: compiled by the authors taking into account⁶

Автор формулы	Формула	Несущая способность, т, при		Учитываемые параметры				
		$t = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$t = \text{минус } 20 \text{ } ^\circ\text{C}$	вид нагрузки	наличие трещин	солёность воды	температура воздуха	прочность льда
М.М. Корунов (2)	$P = \frac{h^2}{100}$	4/25	4/25	–	–	–	–	–
М.М. Казанский и Р.А. Шульман (3)	$P = \frac{B}{N} h^2 K S$	4/25	4,8/30	+	+	+	+	–
А.В. Гастаев [14]	$P = \frac{\sigma h^2}{0,42 - 1,47 \cdot \lg \alpha} K S$	3,67/23	4,4/27,5	+	–	–	–	+
С.А. Бернштейн [14]	$P = \frac{m \cdot \sigma \cdot h^2}{3(1+m)C_\alpha}$	3,6/22,5	4,35/27,2	+	–	–	–	+
А.Р. Шульман [14]	$P = 0,375(h^2 + 7,8rE^{1/4}h^{5/4})$	2,97/19	3,6/22,5	+	–	–	–	+
Д.Ф. Панфилов [14]	$P = 0,375h^2(1 + 4,1\alpha)$	2,8/17,5	3,4/21,3	+	–	–	–	+

⁶Песчанский И.С. Ледоведение и ледотехника. 2-е изд. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 461 с.

Автор формулы	Формула	Несущая способность, т, при		Учитываемые параметры				
		$t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = \text{минус } 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	вид нагрузки	наличие трещин	солёность воды	температура воздуха	прочность льда
И.С. Песчанский (6)	$P = \frac{\sigma_n \cdot h^{5/4}}{31(0,76 \cdot r - h^{5/4})}$	3,4/13,1	3,95/15,3	+	-	-	-	+
ОДМ 218.4.030–2016 (7)	$P = \left(\frac{h_{\text{пр}} + 0,5h_{\text{мрт}}K_2}{11 \cdot n_n} \right)^2 K_3 K_4 K_{\text{арм}}$	2,3/14,4	3,3/20,6	+	+	-	+	+
Зависимость (8)	$P = \frac{\sigma_n \cdot h^2}{0,275 \cdot (1 + \mu) \cdot \log_{10} \left(\frac{Eh^3}{kb^4} \right)}$	2/9,5	2/9,5	+	-	-	-	+
Зависимость (9)	$P = \frac{\sigma_n \cdot h^2}{0,529 \cdot (1 + 0,54\mu) \cdot \left[\lg \left(\frac{Eh^3}{kb^4} \right) - 0,71 \right]}$	3,1/17,4	3,1/17,4	+	+	-	-	+
Зависимость (11)	$P = \frac{0,5 \cdot 10^6 (0,8 + 0,11 \cdot t_n) \cdot h^2}{0,275 \cdot (1 + \mu) \cdot \log_{10} \left(\frac{(5 \cdot t_n + 53) \cdot 10^6 \cdot h^3}{kb^4} \right)} \cdot K_T$	3,3/18,8	5,6/31,9	+	+	-	+	+

Примечания:
1. Для расчётов использованы усреднённые физико-механические показатели водного льда. 2. Несущая способность определена при толщине льда 20/50 см.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По результатам расчётов и анализа следует, что наибольшее количество параметров, влияющих на несущую способность ледового покрова, учитывается в трёх зависимостях: М.М. Казанского – Р.А. Шульмана; Q. Wang; ОДМ 218.4.030–2016 «Методические рекомендации по оценке грузоподъемности ледовых переправ». При этом величина несущей способности, рассчитанная по 11 представленным формулам, изменяется в 2,8 раза для толщины льда 20 см и в 3,4 раза – при 50 см. Следовательно, представленные математические модели для прогнозирования несущей способности ледовых переправ требуют экспериментальной проверки на реальных объектах.

2. Основной проблемой при сопоставлении данных по физико-механическим свойствам водного льда является отсутствие общепринятой и нормированной методики определения достоверных значений этих свойств.

3. Большинство математических моделей для прогнозирования несущей способности (прочности) ледового покрова основаны на закономерностях, полученных при испытаниях балок, призм, консолей и т.п. А фактически физическая модель ледового покрова на автомобильных переправах представляет очень сложную, неоднородную по площади и толщине пластину из упруго-пластического материала с трещинами, значительно изменяющего механические свойства от температуры и режима нагружения, лежащую на воде и берегах.

4. На несущую способность ледового покрова влияют десятки факторов, многие из которых изменяются случайным образом. Поэтому вышеприведённые формулы приемлемы для ориентировочного прогнозирования и расчётов несущей способности ледового покрова на переправах. Фактические достоверные значения этого показателя пока можно получать только доработанным методом регулярного протаскивания контрольного груза, моделирующего воздействие транспортных средств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гончарова Г.Ю., Сиротюк В.В., Якименко О.В., Орлов П.В., Долгодворов Р.Е. Повышение несущей способности и безопасности ледовых автотрасс с помощью армирования и модификации льда // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6 (94). С. 786–797. DOI 10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797
2. Сиротюк В.В., Якименко О.В., Крашенинин Е.Ю., Щербо А.Н. Строительство и испытание опытного участка ледовой переправы, армированной геосинтетическими материалами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2008. № 4(21). С. 157–165.
3. Годацкий С.В., Кокин О.В., Кузнецова О.А., Цвезинский А.С., Архипов В.В. Оценка пределов прочности льда на одноосное сжатие в Охотском море по данным измерений и расчётов // Лёд и Снег. 2021;61(4):561–570. DOI 10.31857/S2076673421040108
4. Babaei H., Barrette P. D. A computational modeling basis in support of the Canadian winter road infrastructure. – National Research Council Canada, 2020.
5. Towell K. L. T. et al. Construction and structural analysis of an arched cellulose reinforced ice bridge for transportation infrastructure in cold regions // Cold Regions Science and Technology. 2022. Т. 198. DOI 10.1016/j.coldregions.2022.103508.
6. Li C. et al. Theory and application of ice thermodynamics and mechanics for the natural sinking of gabion mattresses on a floating ice cover // Cold Regions Science and Technology. 2023. DOI 10.1016/j.coldregions.2023.103925.
7. Leppäranta M. Mechanics of Lake Ice // Freezing of Lakes and the Evolution of their Ice Cover. – Cham: Springer International Publishing, 2023. pp. 159–203. DOI 10.1007/978-3-031-25605-9_5
8. Ren D., Park J-C. Particle-based numerical simulation of continuous ice-breaking process by an icebreaker // Ocean Engineering. 2023. 270 p. DOI 10.1016/j.oceaneng.2022.113478.
9. Alan F., Willem J. Limitations of Gold's formula for predicting ice thickness requirements for heavy equipment // Canadian Geotechnical Journal. 2023. No. 61 (1), pp. 183–188. DOI 10.1139/cgj-2022-0464.
10. Ye L. Y. et al. Peridynamic solution for submarine surfacing through ice // Ships and Offshore Structures. 2020. Т. 15. no. 5. pp. 535–549. DOI 10.1080/17445302.2019.1661626.
11. Jia B. et al. Peridynamic Simulation of the Penetration of an Ice Sheet by a Vertically Ascending Cylinder // Journal of Marine Science and Engineering. 2024. Т. 12. no. 1. pp. 188. DOI 10.3390/jmse12010188
12. Tugulan C.C. et al. Flexural-Gravity Waves Generated by Different Load Sizes and Configurations on Varying Ice Cover // Water Waves. 2024. pp. 1–17. DOI 10.1007/s42286-024-00083-5
13. Q. Xie Numerical modeling of the stress-strain state of the ice beam by specified constitutive model // Material Science, Engineering and Applications. 1–8, Jun. 2022. Vol. 2, No. 1, pp. DOI 10.21595/msea.2022.22278
14. Якименко О.В. Сиротюк В.В. Усиление ледовых переправ геосинтетическими материалами: Монография. Омск: ФГБОУ ВПО «СибАДИ», 2015. 166 с. ISBN 978-5-93204-777-4.
15. Barrette P.D. A laboratory study on the flexural strength of white ice and clear ice from the Rideau Canal skateway. Can. J. Civ. Eng. 2011. 38, 1435–1439.
16. Weyhenmeyer G.A., Obertegger U., Rudebeck H. et al. Towards critical white ice conditions in lakes under global warming. Nat Commun.2022. 13, 4974. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32633-1>
17. Masterson D.M. State of the art of ice bearing capacity and ice construction. 2009. 58(3), 0–112. doi:10.1016/j.coldregions.2009.04.002
18. Коновалов С.В. Обзор физико-механических свойств льда // Вестник науки и образования. 2020. №11-1 (89). С. 34–39.
19. Ren, Di; Park, Jong-Chun; Hwang, Sung-Chul; Jeong, Seong-Yeob; Kim, Hyun-Soo Failure simulation of ice beam using a fully Lagrangian particle method. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2019. 11(2). 639–647. doi:10.1016/j.ijnaoe.2019.01.001
20. Wang Q., Li Z., Lu P., Xu Y., Li Z. Flexural and compressive strength of the landfast sea ice in the Prydz Bay // East Antarctic, The Cryosphere. 2022. 16. 1941–1961. DOI 10.5194/tc-16-1941-2022.
21. Gow A.J. Flexural Strength of Ice on Temperate Lakes: Comparative Tests of Large Cantilever and Simply Supported Beams. Cold Regions Research and Engineering Laboratory. 1978. Т. 78. №. 9.

REFERENCES

1. Goncharova G.Y., Sirotiuk V.V., Yakimenko O.V., Orlov P.V., Dolgodvorov R.E. Loadbearing capacity and safety for winter roads improvement reinforcement and ice modification. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(6): 786–797. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797>. EDN: UTSJKO
2. Sirotiuk V.V., Sirotiuk V.V., Yakimenko O.V., Krasheninina E.Yu., Shcherbo A.N. Construction and testing of a pilot section of an ice crossing reinforced with geosynthetic materials. *Journal of Construction and Architecture*. 2008; 4(21): 157–165. (In Russ.)
3. Godetsky S.V., Kokin O.V., Kuznetsova O.A., Tsvetsinsky A.S., Arhipov V.V. Estimation of ice strength limits for uniaxial compression in the Sea of Okhotsk according to measurements and calculations. *Ice and Snow*. 2021; 61(4) :561–570. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S2076673421040108>
4. Babaei H., Barrette P. D. A computational modeling basis in support of the Canadian winter road infrastructure. *National Research Council Canada*, 2020.
5. Towell K.L. T. et al. Construction and structural analysis of an arched cellulose reinforced ice bridge for transportation infrastructure in cold regions.

Cold Regions Science and Technology. 2022; T. 198. DOI 10.1016/j.coldregions.2022.103508.

6. Li C. et al. Theory and application of ice thermodynamics and mechanics for the natural sinking of gabion mattresses on a floating ice cover. *Cold Regions Science and Technology*. 2023. DOI 10.1016/j.coldregions.2023.103925.

7. Leppäranta M. Mechanics of Lake Ice. *Freezing of Lakes and the Evolution of their Ice Cover*. Cham: Springer International Publishing, 2023: 159–203. DOI 10.1007/978-3-031-25605-9_5

8. Ren D., Park J.-C. Particle-based numerical simulation of continuous ice-breaking process by an icebreaker. *Ocean Engineering*. 2023: 270. DOI 10.1016/j.oceaneng.2022.113478.

9. Alan F., Willem J. Limitations of Gold's formula for predicting ice thickness requirements for heavy equipment. *Canadian Geotechnical Journal*. 2023; 61 (1): 183–188. DOI 10.1139/cgj-2022-0464.

10. Ye L. Y. et al. Peridynamic solution for submarine surfacing through ice. *Ships and Off-shore Structures*. 2020; T. 15. no. 5: 535–549. DOI 10.1080/17445302.2019.1661626.

11. Jia B. et al. Peridynamic Simulation of the Penetration of an Ice Sheet by a Vertically Ascending Cylinder. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024; T. 12. no 1: 188. DOI 10.3390/jmse12010188

12. Tugulan C.C. et al. Flexural-Gravity Waves Generated by Different Load Sizes and Configurations on Varying Ice Cover. *Water Waves*. 2024: 1–17. DOI 10.1007/s42286-024-00083-5

13. Xie Q. Numerical modeling of the stress-strain state of the ice beam by specified constitutive model. *Material Science, Engineering and Applications*. 2022; Vol. 2, No. 1: 1–8, Jun. 2022. DOI 10.21595/msea.2022.22278

14. Yakimenko O.V., Sirotyuk V.V. Strengthening ice crossings with geosynthetic materials. Omsk, SibADI, 2015: 166. (In Russ.)

15. Barrette, P.D. A laboratory study on the flexural strength of white ice and clear ice from the Rideau Canal skateway. *Can. J. Civ. Eng.* 2011; 38: 1435–1439.

16. Weyhenmeyer G.A., Obertegger U., Rudebeck H. et al. Towards critical white ice conditions in lakes under global warming. *Nat Commun*. 2022; 13, 4974. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32633-1>

17. Masterson D.M. State of the art of ice bearing capacity and ice construction. 2009; 58(3), 0–112. doi:10.1016/j.coldregions.2009.04.002

18. Konovalov S.V. Review of physical and mechanical properties of ice. *Vestnik nauki i obrazovanija*. 2020; 11-1 (89): 157–165. (In Russ.)

19. Ren, Di; Park, Jong-Chun; Hwang, Sung-Chul; Jeong, Seong-Yeob; Kim, Hyun-Soo Failure simulation of ice beam using a fully Lagrangian particle method. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2019;11(2): 639–647. doi:10.1016/j.ijnaoe.2019.01.001

20. Wang Q., Li Z., Lu P., Xu Y., Li Z. Flexural and compressive strength of the landfast sea ice in the

Prydz Bay. *East Antarctic, The Cryosphere*. 2022; 16: 1941–1961. DOI 10.5194/tc-16-1941-2022.

21. Gow A.J. Flexural Strength of Ice on Temperate Lakes: Comparative Tests of Large Cantilever and Simply Supported Beams. *Cold Regions Research and Engineering Laboratory*. 1978; T. 78. no. 9.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Кузнецов И.С. Обозначение алгоритма аналитических исследований. Обзор и анализ публикаций по заявленной тематике. Получение новых зависимостей. Выполнение расчетов (34%).

Сиротюк В.В. Формулирование проблемы исследований. Формулировка направления и темы исследования. Постановка задач исследования. Формулировка результатов и выводов (33%).

Кузнецова В.Н. Руководство процессом разработки темы. Выбор методологии и методов исследования (33%).

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Kuznetsov I.S. Analytical research algorithm outlining. Stated topic publications review and analysis. New dependencies obtaining. Calculations (34%).

Sirotyuk V.V. Research problem statement. Research area and topics statement. Research objectives statement. Results and conclusions formulation (33%).

Kuznetsova V.N. Topic development process guiding. Research methodology and methods selection (33%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Илья Сергеевич – преподаватель кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6524-4976>, SPIN-код: 6890-3069, e-mail: ilyxa_kuznetsov@vk.com

Сиротюк Виктор Владимирович – проф., д-р техн. наук, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2254-8803>, SPIN-код: 2583-7458, e-mail: sirvv@yandex.ru

Кузнецова Виктория Николаевна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3546-0894>, SPIN-код: 1039-7546, e-mail: dissovsibadi@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ilya S. Kuznetsov – Teacher of the Oil Gas and Construction Equipment Operation Department,

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospekt Mira, Omsk, 644050), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6524-4976>, **SPIN-код:** 6890-3069, e-mail: ilyxa_kyznetsov@vk.com

Viktor V. Sirotiuk – Dr. of Sci., Professor, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospekt Mira, Omsk, 644050), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2254-8803>, **SPIN-код:** 2583-7458, e-mail: sirvv@yandex.ru

Victoria N. Kuznetsova – Dr. of Sci., Professor, Oil Gas and Construction Equipment Operation Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospekt Mira, Omsk, 644050), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3546-0894>, **SPIN-код:** 1039-7546, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru

Научная статья

УДК 624

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-618-627>

EDN: NZQOFS



РАЗРАБОТКА СНЕГОПЕРЕДУВАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ ОТ СНЕЖНЫХ ЗАНОСОВ

Д.Н. Санников, В.В. Серватинский
Сибирский Федеральный Университет,
г. Красноярск, Россия

✉ ответственный автор
brownGp2@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. На сегодняшний день существует проблема снеготаносимости ввиду расположения многих автомобильных дорог в удаленных, труднодоступных районах и сложных климатических условиях. Снежные заносы значительно увеличивают расходы на зимнее содержание автомобильных дорог, являются частичным следствием разрушения и обслуживания в летний период, а также создают серьезную угрозу безопасности, вызывая потерю контроля над транспортным средством. Для решения очистки снежных заносов с автомобильной дороги предлагается внедрение снегопередувающих конструкций. Основной задачей исследования является выполнение моделирования и выявление оптимальной скорости воздушного потока, при которой формируется снегопередувающий процесс. Цель работы – создание метода защиты автомобильных дорог от снежных заносов с помощью конструкций формирующих снегопередувание.

Методика исследования. Применение метода снегопередувания и возможности установки снегопередувающих конструкций на автомобильных дорогах для защиты от снежных заносов. Исследован процесс движения снежных частиц в условиях снежной метели и влияние данных процессов на снегопередувание.

Результаты. В работе освещены вопросы, связанные с анализом и оценкой скорости воздушного потока, погодные условия, влияющие на работу конструкций. Показаны условия работы снегопередувающих конструкций на автомобильных дорогах при различных скоростях воздушного потока. Установлено, при какой оптимальной скорости создается эффект снегопередувания.

Заключение. Смоделирован процесс снегопередувания на разработанной снегопередувающей конструкции в разных условиях. На основании рассмотренного подхода выполнен сравнительный анализ работы снегопередувающей конструкции. Внедрение снегопередувающих конструкций позволит снизить затраты на механизированную очистку автомобильных дорог. А также увеличивается социальный эффект по повышению безопасности передвижения транспортных средств.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: снеготаносимые ограждения, снеготанос, снеготаносимость, снегопередувающие ограждения, сдувание снега, снежные заносы, снежные отложения, снегопередувание, метель

Статья поступила в редакцию 11.04.2024; одобрена после рецензирования 22.07.2024; принята к публикации 14.08.2024.

Все 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: Санников Д.Н., Серватинский В.В. Разработка снегопередувающих конструкций для защиты автомобильных дорог от снежных заносов // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 4. С. 618-627. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-618-627>

© Санников Д.Н., Серватинский В.В., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-618-627>

EDN: NZQOFS

DEVELOPMENT OF SNOW-BLOWING STRUCTURES FOR PROTECTION ROADS FROM SNOW DRIFTS

Denis N. Sannikov, Vadim V. Servatinsky

Siberian Federal University,

Krasnoyarsk, Russian

✉ corresponding author

brownGp2@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The article discusses the use of the snow blowing method and the possibility of installing snow-blowing structures on highways to protect against snow drifts. The problem of snow tolerance is identified due to the location of many highways in remote, hard-to-reach areas and difficult climatic conditions. Snow drifts significantly increase the cost of winter maintenance of roads, are a partial consequence of destruction and maintenance in the summer, and also pose a serious threat to safety, causing loss of control over the vehicle.

Research methodology. The article discusses the application of the snow blowing method and the possibility of installing snow-blowing structures on roads to protect against snow drifts. The process of movement of snow particles in a snowstorm and the influence of these processes on snow blowing are considered.

Results. The paper highlights the issues related to the analysis and assessment of the speed and composition of the air flow, weather conditions affecting the operation of structures. The main purpose and working conditions of snow-blowing structures on highways have been determined. The optimum speed at which the snow blowing effect is created is determined.

Conclusion. The snow blowing process on the developed snow blowing structure in different conditions is modelled. Based on the considered approach, a comparative analysis of the operation of the snow blowing structure is performed. Based on the data obtained, the possibilities for the introduction of snow-blowing structures and refinement in real working conditions have been studied.

KEYWORDS: snow protection shields, snow transfer, snow tolerance, snow-blowing shields, snow blowing, snow drifts, snow deposits, snow blowing, blizzard

The article was submitted 11.04.2024; approved after reviewing 22.07.2024; accepted for publication 14.08.2024.

All 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. Sannikov D.N., Servatinsky V.V. Development of snow-blowing structures for protection roads from snow drifts. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (4): 618-627. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-618-627>

© Sannikov D.N., Servatinsky V.V., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Существенная площадь территории Российской Федерации расположена в отдаленных и труднодоступных регионах, со сложной погодной ситуаций в зимний период. Возникает проблема беспрепятственного передвижения транспорта. Особенностью содержания автомобильных дорог в зимний период времени является наличия обильных снежных осадков, которые образуются в результате сильных снегопадов и интенсивных метелей. Уборка снега механическим путем не всегда эффективна ввиду удалённости автомобильных дорог¹.

Опыт разных стран показал, что использование дополнительных мер защиты от метелей и снежных заносов, помимо механической снегоуборочной очистки, показал себя с положительной стороны. Исследования по защите автомобильных дорог от снежных заносов представлены как в отечественной, так и в зарубежной практике² [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. Установка снегозащитных, снегопередающих ограждений и высадка снегозащитных лесополос является эффективной мерой защиты и обслуживания автомобильных дорог в зимний период времени³.

В рамках исследования предлагается внедрение снегопередающих конструкций, основной задачей которых является передавание снежной метели через автомобильную дорогу.

Основные задачи исследования:

1. Проанализировать процесс снегопередавания на автомобильных дорогах.
2. Выполнить моделирование работы снегопередающих ограждений на автомобильных дорогах с разными скоростями воздушного потока.

Учитывая большой объем научных работ, изучающих процессы снегопереноса и снежных заносов на автомобильных дорогах, проблема уборки снежных отложений и работы снегоуборочных машин является острой. Ав-

томобильные дороги на сегодняшний день создаются многополосными и составляют большую ширину с наличием элементов дорожной инфраструктуры. Препятствия на автомобильной дороге могут привести к возможному появлению заносов и накоплению снега. Среди факторов, влияющих на снеготаносимость автомобильных дорог и магистралей, можно выделить⁴:

- метеорологические (режим метели, тип и продолжительность, скорость ветра, высота снежного покрова, объём снегопереноса и т. д.);
- дорожные (параметры дорожного полотна, дорожные конструкции и т. д.);
- естественный рельеф, наличие растительности и т. д.

Меры по борьбе со снежным заносом на дорогах рассматриваются на таких этапах, как планирование, проектирование, строительство и монтаж. Необходимо изучить соответствующие меры по борьбе со снежным заносом на каждом этапе проекта. После установки средств борьбы со снежным заносом необходимо постоянно проверять их работоспособность и вносить необходимые усовершенствования для усиления мер по борьбе со снежным заносом.

Исследования, необходимые для объектов по борьбе со снегопадом, делятся на несколько частей: схематическое обследование, базовый анализ, обследование условий. Цель каждого обследования заключается в следующем: понимание погодных условий и возможности снежных заносов зимой, всестороннее понимание степени опасности от снежной метели, изучение необходимости принятия мер по борьбе со снежным заносом, изучение предметов первой необходимости, изучение будущих мер по борьбе со снежным заносом, определение мер, которые уменьшат опасность снежного заноса.

Базовый анализ включает оценку необходимости средств борьбы со снежным заносом, изучение диапазона, охватываемого сред-

¹ Санников Д.Н., Серватинский В.В. Разработка и моделирование снегопередающего ограждения для защиты автомобильных дорог от снежных заносов // ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА, НАДЕЖНОСТЬ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА. 2023. С. 8–12.

² Степанов А.В., Винокурова Т.Г., Катаров В.К., Марков В.И. Организация строительства автомобильных дорог. Петрозаводск: ПетрГУ, 2021. 80 с.

³ Санников Д.Н., Серватинский В.В. Моделирование снегопередающей конструкции для защиты автомобильных дорог от заносов // Автомобильные дороги 1-й дорожно-климатической зоны. 2023. С. 30–34.

⁴ Бялбужеский Г.В., Дюнин А.К., Плакса Л.Н., Рудаков Л.М., Уткин Б.В.; под ред. Дюнина А.К. Зимнее содержание автомобильных дорог. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1983. 197 с.

ствами борьбы со снежным заносом, схематическое проектирование средств борьбы со снежным заносом (выбор средств борьбы со снежным заносом, определение их технических характеристик и мест установки).

Обследование проектных условий: определение расчетных значений контроля выдувания снега, понимание условий для роста на участках с лесами, на дороге и детальное проектирование средств борьбы со снежными заносами.

Метель – это сложный двухфазный поток, при котором ветер совпадает с различными видами осадков, выпадающих только при низких температурах, такими как снег, смесь снега и дождя или ледяной дождь. В умеренно-континентальном и субарктическом климате эти штормы не обязательно ограничиваются зимним сезоном, но могут возникать также поздней осенью и ранней весной.

Метель образуется, когда влажный воздух поднимается в атмосферу, создавая низкое давление у земли. Влага собирается ветром из больших водоемов, таких как большое озеро или океан. Если температура ниже нуля, 0 °C (32 °F), вблизи земли и в облаках будут выпадать осадки в виде снега, наледи, дождя и снежной смеси (мокрый снег), ледяных гранул. При метели действует эффект непрерывного обмена воздушной среды и снежных частиц с контактом земной поверхности, на которой также находится снежный покров⁵.

Виды фаз метели⁶:

- 1) поземка – перекачивание по земной поверхности крупных заносов;
- 2) сальтация – движение частиц скачками, прыжками в воздушном слое до метра;
- 3) суспензия (диффузия) – образуется из мелкодисперсных отложений.

Движение снежной метели – многофакторный процесс, в котором участвуют несколько фаз метели. Снежные частицы могут быть разных размеров и менять состояние в ходе метели. Плотность снежных частиц может меняться в зависимости от погодных условий. В

ходе метели происходит непрерывный обмен снежных частиц. Они могут сталкиваться друг с другом, нацеплять и разрушать друг друга до более мелких фракций. Также стоит отметить, что в ходе снежной метели участвуют частицы снега как выпавшие, так и поднимаемые с автомобильной дороги. Снежные массы могут менять рельеф местности, что в свою очередь влияет на скорость и объем снегопереноса⁷.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Спроектировано снегопередающее ограждение, представленное на рисунке 1, данный вид ограждения имеет отличную форму от привычных снегопередающих ограждений. За счет ряда физических экспериментов и моделирования аэродинамических процессов получена наиболее аэродинамически эффективная форма, способствующая передуванию снежных масс через автомобильную дорогу. Основная снегопередающая панель выполнена в форме полусферы, за счет такой формы воздушный поток имеет максимальное ускорение, которое будет способствовать передуванию снежных масс через автомобильную дорогу. Верхняя часть выполнена в виде крыла с зазором между основной панелью, которая способствует сжатию воздушного потока, тем самым ускоряя его. Также верхнее крыло выполняет функцию поворота конструкции за счет ветра (принцип флюгера) на 20 градусов вправо и влево относительно изначального 0 состояния, такое нововведение позволит передуть большее количество снега в отличие от стационарной конструкции. Длина и размер нижнего зазора между конструкцией и автомобильной дорогой определены в результате ряда аэродинамических экспериментов и получена оптимальная форма, которая также будет способствовать ускорению воздушного потока за счет сжатия и увеличения скорости. Отношение снегопередающей панели к нижнему зазору составляет 80:20.

⁵ Санников Д.Н., Серватинский В.В. Разработка и моделирование снегопередающего ограждения для защиты автомобильных дорог от снежных заносов // ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА, НАДЕЖНОСТЬ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА. Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск. 2023. С. 8–12.

⁶ Белостоцкий А.М. О математическом (численном) моделировании для определения расчетных снеговых нагрузок на большепролетные сооружения / А.М. Белостоцкий, П.А. Акимов, Н.А. Бритиков // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году. 2020. С. 55–60.

⁷ Building Research Department, Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization. Verification and improvement of snow control performance of windbreak fence // RESEARCH REPORT. 2018.

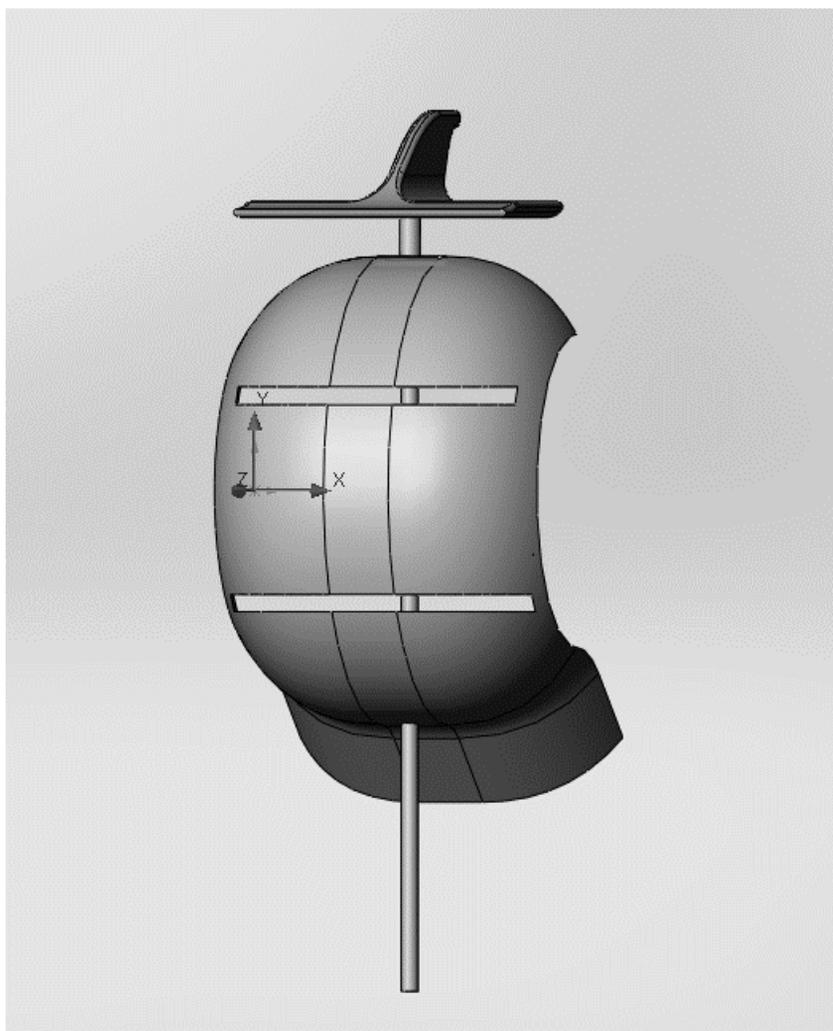


Рисунок 1 – Разработанная снегопередувающая конструкция
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Snow-blowing structure developed
Source: compiled by the authors.

Разрезы в основной снегопередувающей панели составляют просветность 0,2, что способствует снижению завихрения воздушного потока, которое отрицательно сказывается на скорости воздушного потока и ухудшении видимости⁸.

Расчет был выполнен в двумерной постановке. Для оценки использовалась k- RNG модель турбулентности. Расчет и моделирование воздушного потока выполнялось в программе ANSYS Fluent в нестационарной постановке. В прямоугольной расчетной области, представленной на рисунке 2, моделиро-

валось обтекание снегопередувающего ограждения двухфазным потоком со следующими характеристиками: материалом первичной фазы выступал воздух – плотность 1.220 кг/м^3 , вторым материалом выступал лед, изначальная плотность задавалась 150 кг/м^3 и менялась в ходе эксперимента в зависимости от снегонакопления, динамическая вязкость составляла $1.72 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м} \cdot \text{с}$, насыпная плотность вторичной фазы – 150 кг/м^3 , средний диаметр частиц – 50 мкм . Дополнительные условия: давление 101325 Па , температура окружающей среды $-20 \text{ }^\circ\text{C}$.

⁸ Санников Д.Н. Применение методов моделирования для процессов снегопередувания на автомобильных дорогах / Д.Н. Санников, В.В. Серватинский // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее. Сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск, 2023. С. 90–96.

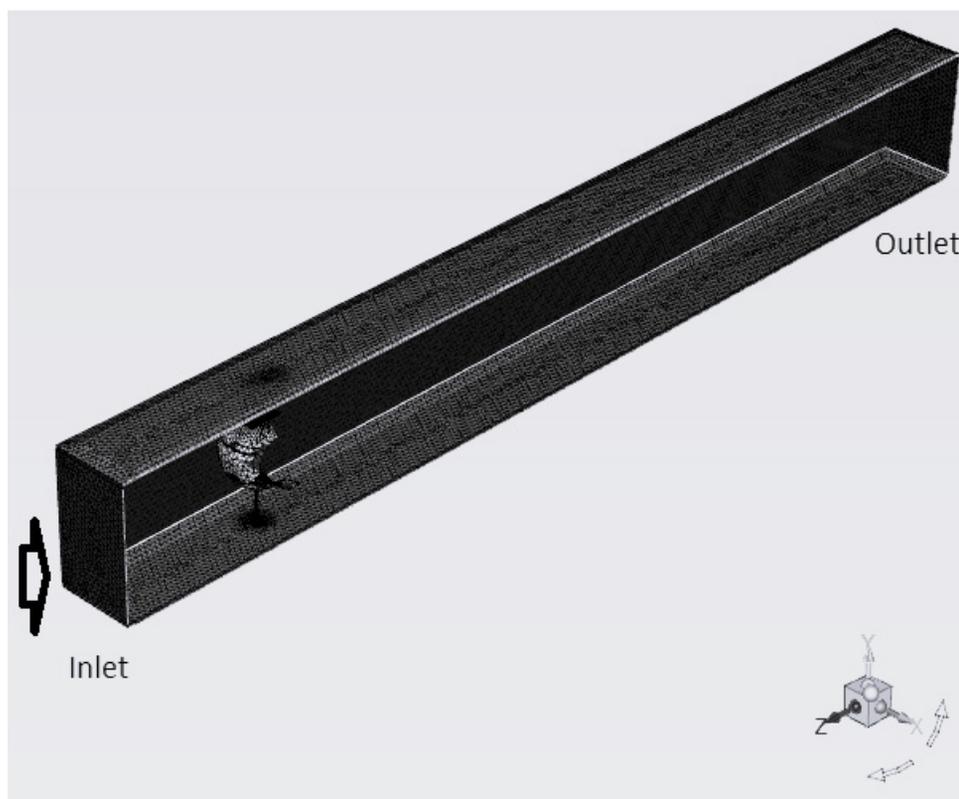


Рисунок 2 – Схема аэродинамического пространства
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Diagram of the aerodynamic space
Source: compiled by the authors.

Таблица
Начальные и граничные условия для аэродинамического пространства
Источник: составлено авторами.

Table
Initial and boundary conditions for the aerodynamic space
Source: compiled by the authors.

Зона	Inlet	Outlet	Floor	Symmetry	Box
Описание	Источник потока	Сток без обратного затекания	Поверхность выдувания и накопления снега	Стены	Снегопередающие ограждение
Граничное условие	Профиль Скорости 4 м/с, 7 м/с и 9 м/с, доля объема снега: 1e-4	Давление 0 Па			
Изменение сетки	нет	нет	да	нет	да
Условия турбулентности	Турбулентность 5%, отношение вязкости 10%				

Моделирование формы снегопередавания проводилось при помощи нестационарного расчета с использованием схем первого порядка, что дает хорошую точность для до-

стижения полученных результатов. В таблице представлены параметры для задачи моделирования. На каждый временной шаг задавалось максимум 20 итераций.

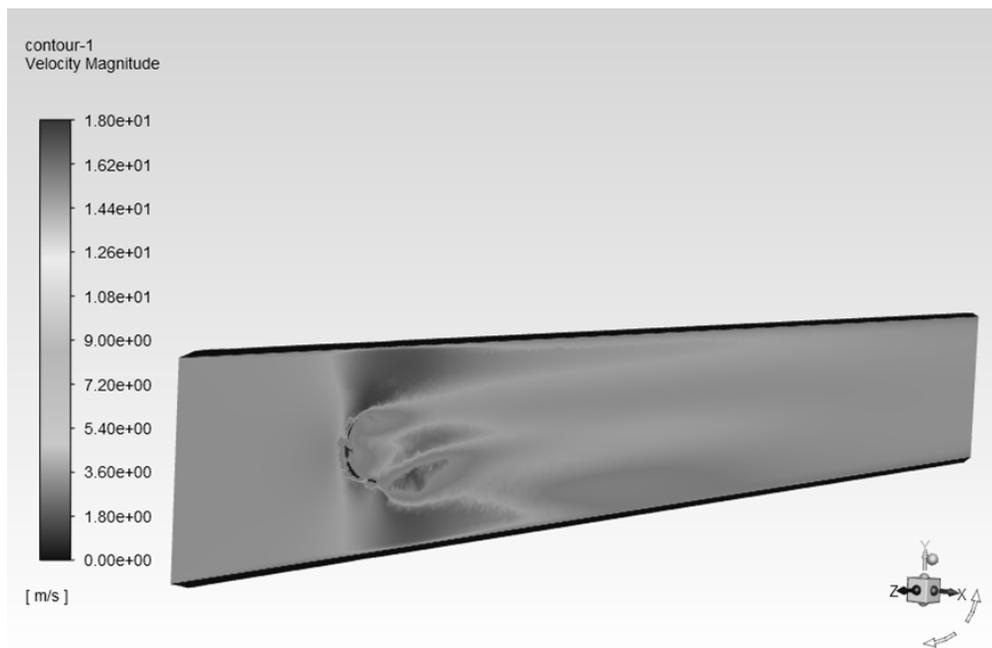


Рисунок 3 – Моделирование снегопередувающего процесса с изначальной скоростью воздушного потока 4 м/с
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Simulation of the snow-blowing process with an initial air flow velocity of 4 m/s
Source: compiled by the authors.

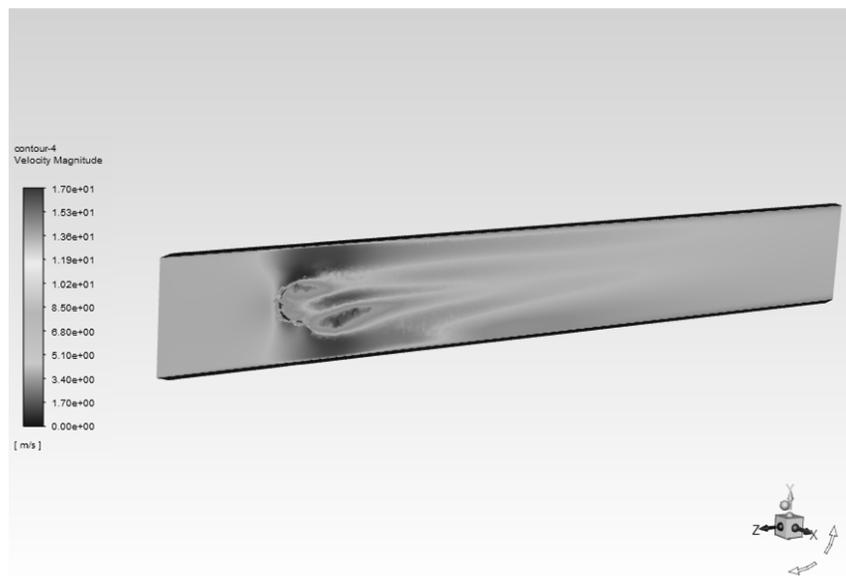


Рисунок 4 – Моделирование снегопередувающего процесса с изначальной скоростью воздушного потока 7 м/с
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Simulation of the snow-blowing process with an initial air flow velocity of 7 m/s
Source: compiled by the authors.

Проанализировав работу снегопередувающего ограждения, представленного на рисунке 3, с изначальной скоростью воздушного потока равной 4 м/с, можно сказать, что наблюдается незначительный эффект завихрения воздушных потоков за ограждением. Выду-

вание воздушных потоков происходит на минимальную дальность, основное увеличение скорости проходит на расстоянии 2,6Н высоты конструкции. Скорость воздушных потоков в нижней части и верхней части ограждения кратковременно увеличивается с 4 и до 12 м/с.

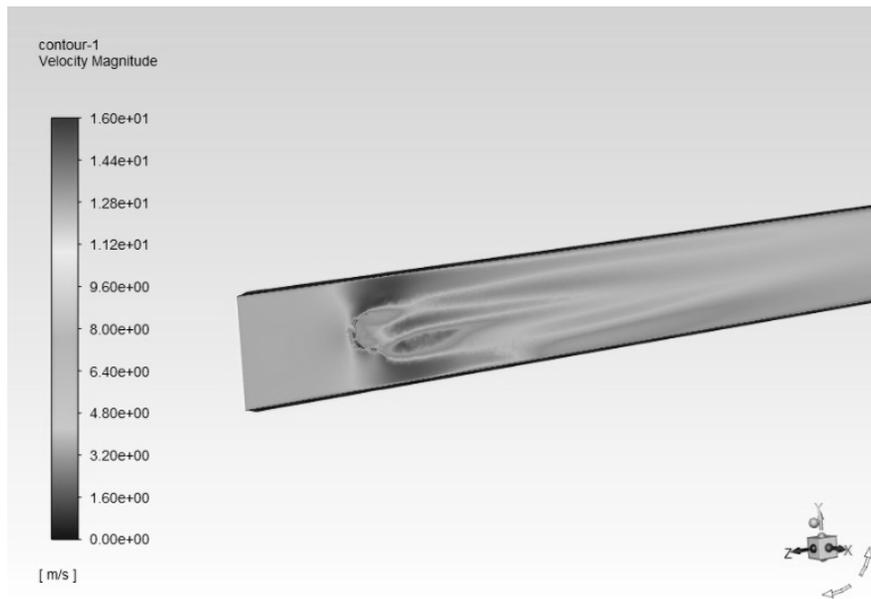


Рисунок 5 – Моделирование снегопередующего процесса с изначальной скоростью воздушного потока 9 м/с
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Simulation of the snow-blowing process with an initial air flow velocity of 9 m/s
Source: compiled by the authors.

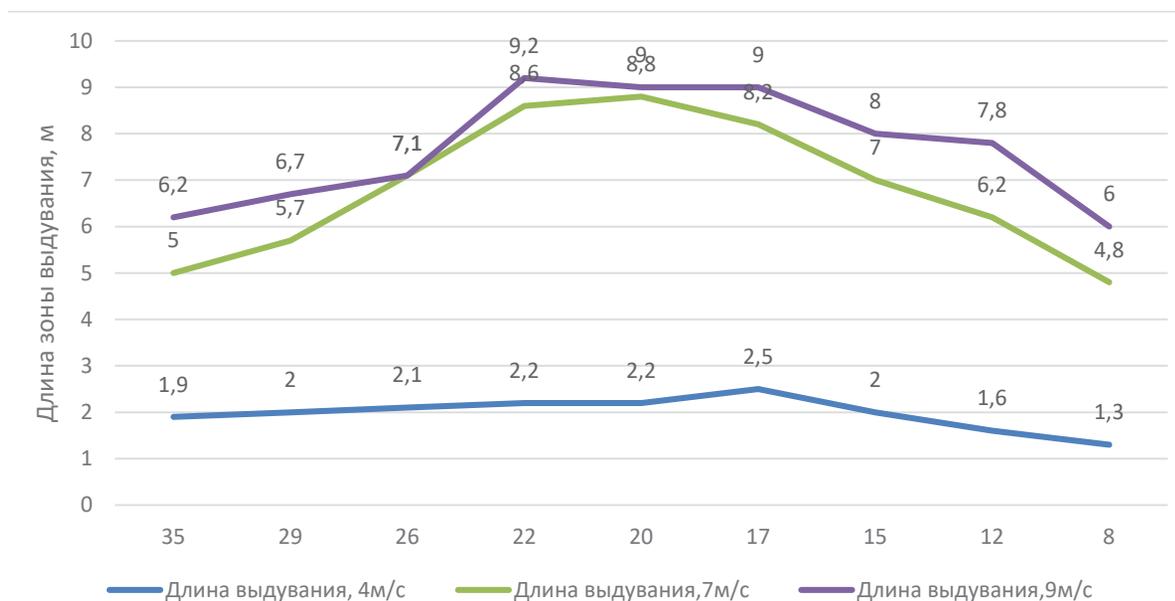


Рисунок 6 – Результаты моделирования
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Simulation results
Source: compiled by the authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Моделирование работы снегопередующей конструкции на рисунках 4 и 5 с изначальными воздушными потоками 7 и 9 м/с показало, что происходит значительное увеличение скорости воздушного потока от изначальной,

а также в отличие от моделирования со скоростью 4 м/с наблюдается значительное увеличение расстояния выдуваемого отрезка как сверху, так и снизу. За счет просветности 0,2 в основной панели наблюдается отсутствие завихрения. На рисунке 6 можно наблюдать,

что дальность выдуваемого участка с изначальной скоростью воздушного потока 7 м/с составляет 6Н. При этом дальность воздушного потока при изначальной скорости, равной 9 м/с, составляет 7Н (ограничивается аэродинамическим пространством).

Составлена математическая модель работы снегопередувающей конструкции, которая определяет параметр длины зоны выдувания L в зависимости от высоты конструкции и средней скорости воздушного потока в данной местности в зимний период:

$$L = (1,4v + 0,46p)(H - Hs) \quad (1)$$

Установка дополнительных передувующих элементов увеличивает скорость воздушного потока до 15 м/с, что соответствует кратковременному увеличению скорости воздушного потока на 100% от изначальной скорости. За счет устройства элементов снежная метель на много проще будет передуваться через автомобильную дорогу и откладываться на безопасном расстоянии от дороги. По данным компьютерного моделирования можно утверждать, что снегопередувающий эффект положителен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован процесс снегопередувания с помощью моделирования работы снегопередувающих конструкций в условиях разных скоростей воздушно-массовых потоков.

На основании поставленных задач можно сделать следующие выводы:

В ходе моделирования и анализа данных получили то, что снегопередувающий процесс, необходимый для передувания снежных масс, с использованием предложенных снегопередувающих конструкций возникает при скоростях воздушного потока свыше 6 м/с.

Выполнено моделирование работы снегопередувающей конструкции со скоростями воздушного потока 4, 7, 9 м/с.

По результатам моделирования получили, что при скорости воздушного потока 4 м/с снегопередувающий процесс практически не возникает, шлейф воздушно-массового потока составляет всего 2,6Н. При скорости воздушного потока свыше 6 м/с создаётся снегопередувающий эффект, а именно при скоростях воздушного потока 7 и 9 м/с шлейф воздушно-массового потока составляет 6Н и 7Н.

Внедрение и устройство снегопередувающих конструкций, способствующих передуванию снежной метели с устойчивым ветром со скоростью свыше 6 м/с, позволят снизить за-

траты на механизированную уборку снега с автомобильных дорог, увеличить безопасность движения транспортных средств. Особенно актуально внедрение снегопередувающих конструкций в удаленных и труднодоступных районах, в которых время реагирования специальной техники занимает существенный промежуток времени.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Белостоцкий А.М., Бритиков Н.А., Горячевский О.С. Comparison of determination of snow loads for roofs in building codes of various countries // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Т. 17, №. 3. С. 39–47.
2. Степанов А.В., Винокурова Т.Г. Целесообразность устройства снегозадерживающих и снегопередувающих экранов, заборов на автомобильных дорогах общего пользования регионального и межмуниципального значения Мурманской области // Инженерный вестник Дона. 2021. № 12. Режим доступа: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7366
3. Ушаков В.В., Корнеева Д.Ю. Совершенствование конструкций снегозадерживающих устройств на основе моделирования их работы // Наука и техника в дорожной отрасли. 2015. № 4 (74). С. 7–10.
4. Численное моделирование вариантов расположения снегозащитных экранов в придорожной полосе автомобильных дорог / Л.В. Янковский, А.В. Кочетков, М.Г. Бояршинов [и др.] // Дороги и мосты. 2018. № 2(40). С. 120–130.
5. Натурное аэродинамическое моделирование геометрических параметров элементов обустройства автомобильных дорог при их зимнем содержании / А.В. Кочетков, Л.В. Янковский, М.Г. Бояршинов [и др.] // Дороги и мосты. 2019. № 1(41). С. 55–71.
6. Кузахметова Э.К., Николаевский В.Е., Пономарев Я.О. Проектирование автомобильных дорог в сложных условиях и его методическое обеспечение // Автомобильные дороги. 2019. № 5. С. 105–109.
7. Лескин А.И., Алексиков С.В., Гофман Д.И., Катаонов М.В. Повышение эффективности снегозащиты автомобильных дорог (на примере Вологодской области) // Вестник Вологодского государственного архитектурно-строительного института. Сер: Строительство и архитектура. 2019. № 3. С. 73–80.
8. Самодурова Т.В., Гладышева О.В. Моделирование процесса отложения снега на автомагистралях в программе FLOWVISION // Научный журнал строительства и архитектуры. 2020. № 2 (58). С. 72–83.
9. Пассек В.В., Селезнёв А.В. Особенности учета снегоотложений на железных и автомобильных дорогах Арктики // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 11. С. 7–12.
10. Борисова У.Д. Снегозадерживающий щит // Молодой ученый. 2023. № 1 (448). С. 131–133.

11. Ma, W., Li F., Sun Y., Li J., Zhou X. Field measurement and numerical simulation of snow deposition on an embankment in snowdrift // *Wind and Structures*. 2021. T.32. №5. P.453–469.

12. Tabler R.D. Controlling blowing and drifting snow with snow fence // *Government Engineering*, July-Aug. 2005. pp. 30–32.

13. Building Research Department, Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization. Verification and improvement of snow control performance of windbreak fence // *RESEARCH REPORT*. 2018.

14. Zhao Q.Q., Zhang H.T., Fediuk R.S. Freeze-thaw damage model for cement pavements in seasonal frost regions // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. №4 (104). p. 10406–10406.

REFERENCES

Belostotsky A.M., Britikov N.A., Goryachevsky O.S. Comparison of determination of snow loads for roofs in building codes of various countries. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021; vol. 17. No. 3: 39–47

15. Stepanov A.V., Vinokurova T.G., The expediency of installing snow-retaining and snow-blowing screens, fences on public roads of regional and inter-municipal significance in the Murmansk region. *Engineering journal of Don*. 2021; 12. (in Russ.)

16. Ushakov V.V., Korneeva D.Yu. Improving the designs of snow-retaining devices based on modeling their operation. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2015; 4 (74): 7–10. (in Russ.)

17. Yankovskiy L.V., Kochetkov A.V., Boyarshinov M.G., Schegoleva N.V., Shashkov I.G. Computational modeling of variants of snow fences positioning at roadside. *Dorogi i mosty*. 2018; 2(40): 120–130. (in Russ.)

Kochetkov A.V., Yankovskiy L.V., Boyarshinov M.G., Schegoleva N.V., Shashkov I.G. Full-scale aerodynamic modeling of road facilities geometry during winter maintenance. *Dorogi i mosty*. 2019; 1(41): 55–71. (in Russ.)

18. Kuzakhmetova E.K., Nikolaevsky V.E., Ponomarev Ya.O. Designing highways in difficult conditions and its methodological support. *Avtomobil'nye dorogi*. 2019; 5: 105–109. (in Russ.)

19. Leskin A.I., Aleksikov S.V. Gofman D.I., Katsanov M.V. Improving the efficiency of snow protection of roads (on the example of Volgograd region). *Vestnik Vologodskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo instituta. Ser: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2019; 3: 73–80. (in Russ.)

20. Samodurova T.V., Gladysheva O.V. Modeling the snow deposit process on the highways in the flowvision. *Russian journal of building construction and architecture*. 2020; 2 (58): 72–83.

21. Passek V.V., Seleznev A.V. Features of accounting for snow deposition on railways and highways of the Arctic. *Put' i putevoe hozjajstvo*. 2020; 11: 7–12. (in Russ.)

22. Borisova, U.D. Snow-retaining shield. *Molodoj uchenyj*. 2023;1 (448): 131–133. (in Russ.)

23. Ma, W., Li F., Sun Y., Li J., Zhou X. Field measurement and numerical simulation of snow deposition on an embankment in snowdrift. *Wind and Structures*. 2021; 32. №5: 453–469.

24. Tabler R.D. Controlling blowing and drifting snow with snow fence. *Government Engineering*, July-Aug. 2005: 30–32.

25. Building Research Department, Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization. Verification and improvement of snow control performance of windbreak fence. *RESEARCH REPORT*. 2018.

26. Zhao Q.Q., Zhang H.T., Fediuk R.S. Freeze-thaw damage model for cement pavements in seasonal frost regions. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 4 (104): 10406–10406.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Санников Д.Н. Организация и проведение моделирования, обработка экспериментальных данных, подготовка материала для статьи

Серватинский В.В. Формулирование цели и задач исследования, разработка методики проведения исследования

CO-AUTHORS' CONTRIBUTION

Sannikov D.N. Organization and conduct of modeling, processing of experimental data, preparation of material for the article.

Servatinsky V.V. Formulation of research goals and objectives, development of research methodology.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Санников Денис Николаевич – аспирант кафедры «Автомобильные дороги и городские сооружения» Сибирский федеральный университет (660041, г. Красноярск, пр-т Свободный, 79), **ORCID**: <https://orcid.org/0009-0009-3732-7641>, e-mail: brownGp2@yandex.ru

Серватинский Вадим Вячеславович – канд. техн. наук, заведующий кафедры «Автомобильные дороги и городские сооружения» Сибирский федеральный университет (660041, г. Красноярск, пр-т Свободный, 79), **ORCID**: <https://orcid.org/0000-0003-2419-1000>, e-mail: vservatinsky@sfu-kras.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Denis N. Sannikov. Postgraduate student, Roads and Urban Structures Department, Siberian Federal University (79, Prospekt Svobodnyi, Krasnoyarsk, 660041), **ORCID**: <https://orcid.org/0009-0009-3732-7641>, e-mail: brownGp2@yandex.ru

Vadim V. Servatinskii. Cand. of Sci., Head of the Roads and Urban Structures Department, Siberian Federal University (79, Prospekt Svobodnyi, Krasnoyarsk, 660041), **ORCID**: <https://orcid.org/0000-0003-2419-1000>, e-mail: vservatinsky@sfu-kras.ru

Научная статья
УДК 691.32
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-628-638>
EDN: SOXLQT



УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДИАГНОСТИКА ДЕСТРУКЦИИ БЕТОНА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ АГРЕССИВНЫХ СРЕД

Н.М. Толыпина, Д.Ю. Данилов ✉

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия

✉ ответственный автор
dimadan31@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Современные методы исследования коррозионного повреждения бетона достаточно длительные и трудоемкие, что затрудняет их применение. Это вызывает необходимость поиска новых подходов для исследования деструкции бетона под воздействием агрессивных сред. В настоящее время эффективно используется метод ультразвуковой диагностики для выявления различных структурных дефектов, однако возможность его применения для исследований коррозии бетона малоизученна. Восполнению этого пробела посвящена данная работа.

Материалы и методы. Использовали образцы бетона размером 2,5х2,5х10 см и 2,5х2,5х16 см различного состава (цемент: заполнитель=1:9, 1:7, 1:5). Контрольные образцы твердели в нормальных условиях, испытываемые образцы хранили в различных агрессивных средах. Образцы всех сред хранения подвергали периодическим испытаниям на приборе ультразвуковой диагностики «Пульсар-2.2». Параллельно определяли прочностные показатели, полученные разрушающим методом на гидравлическом прессе ПГМ-100МГ4, а также коэффициент стойкости.

Результаты. Установлена взаимосвязь между периодами роста, экстремумами и скачкообразными изменениями скорости прохождения ультразвуковых волн и этапами набора прочности, условиями твердения образцов, временными факторами. Показано, что ультразвуковая диагностика достаточно чувствительна к процессам, вызванным коррозионной деструкцией бетона, и позволяет получать достоверные данные, при этом прочность и коэффициент стойкости не всегда адекватно отражают развитие коррозионных процессов. Установлено, что применение ультразвуковой диагностики дает возможность повысить достоверность результатов исследований коррозии бетона.

Заключение. Использование метода УЗ-диагностики позволяет получить новые данные о процессах деструкции бетона под воздействием агрессивных сред, что дает возможность повысить достоверность результатов исследований коррозии бетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ультразвуковая диагностика, коррозия бетона, агрессивная среда, скорость ультразвуковых волн, коррозионная стойкость, коэффициент стойкости, бетон

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

Статья поступила в редакцию 19.06.2024; одобрена после рецензирования 27.07.2024; принята к публикации 14.08.2024.

Все 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: Толыпина Н.М., Данилов Д.Ю. Ультразвуковая диагностика деструкции бетона под воздействием агрессивных сред // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 4. С. 628-638. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-628-638>

© Толыпина Н.М., Данилов Д.Ю., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-2-4-628-638>

EDN: SOXLQT

ULTRASONIC DIAGNOSTICS OF CONCRETE DESTRUCTION UNDER INFLUENCE OF CORROSION ENVIRONMENT

Natalia M. Tolypina, Dmitrii Yu. Danilov ✉

V.G. Shukhov Belgorod State Technological University
Belgorod, Russia

✉ corresponding author
dimadan31@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. Modern methods of studying the corrosion damage of concrete are quite lengthy and time-consuming, which makes their use difficult. This necessitates the search for new approaches to study the destruction of concrete under the influence of aggressive media. Currently, the ultrasound diagnostic method is effectively used to identify various structural defects, but the possibility of its use for concrete corrosion studies is poorly understood. This work is devoted to filling this gap.

The methods of research. Concrete samples of 2.5x2.5x10 cm and 2.5x2.5x16 cm of various composition (cement: placeholder = 1:9, 1:7, 1:5). The control samples hardened under normal conditions, the test samples were stored in various aggressive environments. The samples of all storage media were subjected to periodic tests on the Pulsar-2.2 ultrasound diagnostic device. In parallel, the strength parameters obtained by the destructive method on the PGM-100MG4 hydraulic press, as well as the resistance coefficient, were determined.

Results. The relationship between the growth periods, extremes and abrupt changes in the velocity of passage of ultrasonic waves and the stages of strength gain, the conditions of hardening of samples, and time factors has been established. It is shown that ultrasound diagnostics is quite sensitive to the processes caused by the corrosion destruction of concrete and allows us to obtain reliable data, while the strength and coefficient of resistance do not always adequately reflect the development of corrosion processes. It has been established that the use of ultrasound diagnostics makes it possible to increase the reliability of the results of concrete corrosion studies.

Conclusion. The use of the ultrasound diagnostic method enables to obtain new data on the processes of concrete destruction under the influence of aggressive media, which makes it possible to increase the reliability of the results of concrete corrosion studies.

KEYWORDS: ultrasound diagnostics, concrete corrosion, corrosion environment, the speed of ultrasonic waves, corrosion resistance, the coefficient of durability, concrete

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

The article was submitted 19.06.2024; approved after reviewing .07.2024; accepted for publication 14.08.2024.

All 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. Tolypina N.M., Danilov D.Yu. Ultrasonic diagnostics of concrete destruction under the influence of corrosion environment. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (4): 628-638. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-628-638>

© Tolypina N.M., Danilov D.Yu., 2024



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

ВВЕДЕНИЕ

Существующие методы исследований коррозионного повреждения бетона достаточно длительные и трудоемкие, они проводятся в лабораторных условиях с использованием большого количества испытуемых образцов, больших объемов периодически сменяемых агрессивных растворов [1, 2], что создает определенные трудности при проведении исследований. Это в свою очередь вызывает необходимость разработки и применения новых подходов к диагностике деструкции бетона при взаимодействии с агрессивной средой. Для определения разного рода показателей бетона используются весьма эффективно методы ультразвуковой диагностики¹ [3, 4, 5]. Они применяются для контроля прочности бетона [6, 7, 8], морозостойкости², определения структурных дефектов [9, 10, 11], трещинообразования [12, 13], деструкции бетона после пожара [14], водонепроницаемости [15, 16] и т.д. Основаны они на измерении времени, затрачиваемом ультразвуковыми волнами на прохождение пути от излучателя к приемнику. По изменению скорости прохождения УЗ-сигнала через бетон можно проследить за структурными изменениями, с ростом микродефектов в материале скорость УЗ-волн снижается. Большим достоинством УЗ-диагностики является возможность использования ультразвука непосредственно на исследуемых конструкциях без риска повредить их [6, 9]. Однако к настоящему времени вопрос о проведении исследований коррозии бетона с помощью ультразвукового метода малоизучен.

В этой связи целью работы является исследование возможности применения метода УЗ-диагностики для оценки деструкции бетона под воздействием агрессивных сред.

Задачи исследования:

1. При помощи метода ультразвуковой диагностики исследовать динамику набора прочности контрольных образцов бетона различного состава водного твердения.

2. Исследовать деструкцию бетона различного состава в агрессивных растворах сульфатов магния и натрия методом УЗ-диагностики.

3. Исследовать коррозионную стойкость бетона при воздействии агрессивных сред с

использованием показателей прочности и коэффициента стойкости.

4. Дать обоснование возможности применения УЗ-диагностики для исследования деструкции бетона при воздействии агрессивных сред.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для исследования коррозионной стойкости бетона были изготовлены образцы составов 1:9, 1:7, 1:5. Использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н ЗАО «Осколцемент» ($t_{н.схв} = 230$ мин; НГ=26%, $C_3S=61,59\%$, $C_2S=14,2\%$, $C_3A=6,83\%$, $C_4AF=3,73\%$); гранитный щебень фракции 3–8 мм, верхний предел ограничен размерами образцов 2,5x2,5x10 см (ГОСТ 10180–2012); кварцевый песок производителя ООО «Пулмаркет» ($SiO_2=95\%$, $Mkr=2,15$, ГОСТ 8736–2014). Водоцементное отношение соответствовало нормальной консистенции по ГОСТ 310.4–81. Изготавливали балочки размером 2,5x2,5x10 см для испытаний на прочность разрушающим методом на лабораторном прессе ПГМ-100МГ4 и балочки 2,5x2,5x16 см для испытаний ультразвуковым методом с помощью измерителя времени и скорости распространения ультразвука «Пульсар-2.2», база прозвучивания 12 см. Образцы после 1 сут твердения расформовывали и помещали на 14 сут в камеру нормального хранения, после чего испытывали на прочность [2]. Затем образцы каждого состава делили на три группы: одну часть помещали в 1,5%-й раствор $MgSO_4$, вторую – в 1,5%-й раствор Na_2SO_4 ; третья группа – контрольные образцы, твердели в водопроводной воде. Образцы 2,5x2,5x10 см испытывали на прессе через 1, 3, 6 и 12 мес хранения в различных средах, в то время как образцы 2,5x2,5x16 см регулярно через каждые 2 недели диагностировались на приборе «Пульсар-2.2». Перед каждым испытанием образцы подвергали визуальному осмотру.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Проводились периодические испытания образцов методом ультразвуковой диагностики. На рисунке 1 представлены графики скорости прохождения УЗ-импульса в образцах различного состава, твердевших в воде. Составы бетона с разным соотношением цемент:заполнитель представлены в таблице 1.

¹ Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение. 1981. 240 с.

² Мирский К.В., Панчина А.А., Мирский В.А., Терешкин И.П. Скорость ультразвука как критерий морозостойкости цементного бетона // XLVI Огарёвские чтения: материалы научной конференции: В 3-х частях, Саранск, 6–13 декабря 2017 года. Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2018. С. 184–191.

Таблица 1

Составы бетона

Источник: составлено авторами.

Table 1

Concrete compositions

Source: compiled by the authors.

№	Цемент: заполнитель	Цемент, кг/м ³	Щебень, кг/м ³	Песок, кг/м ³	Вода, л	В/Ц
1	1:9	220	1100	880	154	0,7
2	1:7	275	962,5	962,5	192,5	0,7
3	1:5	365	917,5	917,5	198	0,54

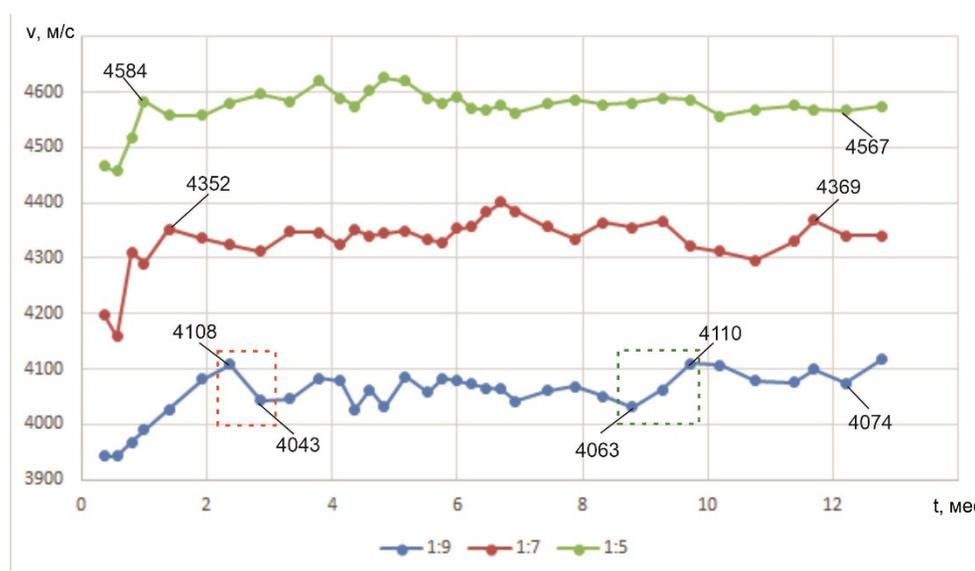


Рисунок 1 – Скорость прохождения УЗ-импульса в образцах бетона различного состава, твердевших в нормальных условиях
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The rate of passage of the ultrasonic pulse in concrete samples of various compositions, hardened under normal conditions
Source: compiled by the authors

Интенсивный рост скорости прохождения УЗ-импульса через образец состава 1:9 с минимальным расходом цемента продолжался в течение первых двух месяцев. После 2 мес твердения наблюдался спад скорости от 4108 до 4043 м/с, затем скачкообразные изменения скорости с большой амплитудой вплоть до 6 мес. Весь последующий период твердения амплитуда колебаний скорости и интервал между ними уменьшался, заметный подъем скорости до максимального уровня наблюдался к 10 мес (4110 м/с), однако не превышал значения, достигнутого на начальной стадии твердения.

После 10 мес твердения скорость УЗ-сигнала стабилизировалась.

Рост скорости прохождения УЗ-импульса через образец состава 1:7 на начальном этапе твердения наблюдался в течение 1,5 мес, в дальнейшем скорость почти не изменялась и разброс значений скорости находился в узком диапазоне вплоть до 6 мес. После 6 мес наблюдались колебания с тремя пиками в пределах 4300–4400 м/с с достаточно широким интервалом около 2 мес. Максимальное значение скорости УЗ (4401 м/с) было зафиксировано через 7 мес.

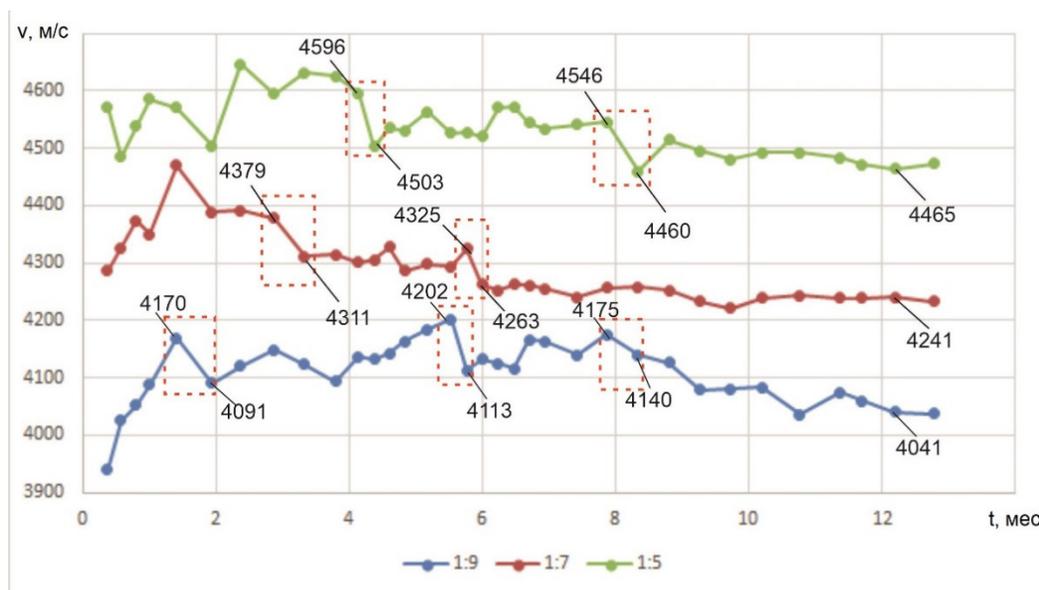


Рисунок 2 – Изменение скорости прохождения УЗ-импульса в образцах бетона различного состава, твердевших в 1,5%-м р-ре $MgSO_4$
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – The change in the velocity of the ultrasonic pulse in concrete samples of various compositions solidified in 1.5% $MgSO_4$ solution
Source: compiled by the authors.

Самый быстрый рост скорости прохождения УЗ-импульса (в течение ≈ 1 мес) через образец наблюдался у состава 1:5 с наибольшим расходом вяжущего по сравнению с составами 1:9 и 1:7 (рисунок 1). Затем в интервале 4 и 6 мес наблюдались два слабых пика, колебания фиксировались от 4570 до 4620 м/с. Максимальное значение скорости УЗ-сигнала установлено в возрасте 5 мес (4626 м/с).

Сопоставляя данные, приведенные на рисунке 1, четко прослеживается зависимость амплитуды и частоты колебаний УЗ-сигнала в образцах от расхода цемента. Наиболее интенсивные колебания скорости УЗ-сигнала, а соответственно прочности, наблюдались у образца состава 1:9 с малым расходом вяжущего. С ростом содержания цемента от 1:9 к 1:5 амплитуда и частота колебаний затухают. Это свидетельствует о том, что в бетонах оп-

тимальных структур изменение амплитудных составляющих происходит менее интенсивно. У образцов с наибольшим содержанием вяжущего (1:5) колебания затухают раньше – после 6 мес твердения, со снижением расхода вяжущего период чередующихся скачков «подъем-падение» длится вдвое дольше. Следует отметить, что скачкообразный рост прочности бетонов является закономерным следствием непрекращающихся процессов гидратации, рекристаллизации, массопереноса и т.д. [17]. Интенсивность сбросов зависит от состава бетона, расхода цемента, В/Ц, условий твердения и др. Со временем интервалы между скачками увеличиваются, что связано с замедлением структурных и физико-химических процессов. Разброс значений прочности может достигать 15–20%³ [17].

³ Бабков В.В., Сахибгареев Р.Р. Потенциал структурообразования и самозалечивания цементных систем на поздних стадиях твердения // Наука и инновации в строительстве: сб. тр. Международного конгресса SIB-2008. Воронеж: ВГАСУ, 2008. Т. 1, кн. 2. С. 463–469.

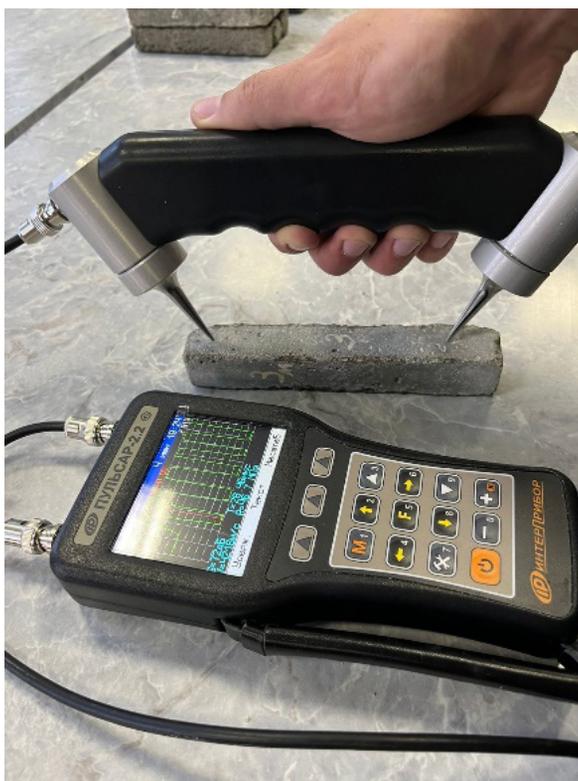


Рисунок 3 – Диагностика корродированного образца состава 1:5, твердевшего 13 мес в 1,5%-м р-ре $MgSO_4$.
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Diagnosis of a corroded sample of 1:5 composition, hardened for 13 months in 1.5% $MgSO_4$ solution
Source: compiled by the authors.

Наибольший интерес представляют графики изменения скорости УЗ-импульса в образцах, хранившихся в агрессивных средах. На графике скорости прохождения УЗ-импульса через образец состава 1:9, твердевшего в растворе сульфата магния (рисунок 2), можно выделить несколько этапов с характерным скачкообразным изменением скорости. Сначала до 1,5 мес образцы активно набирали прочность, что в полной мере прослеживается по росту скорости УЗ-сигнала. После прекращения набора прочности (2 мес) произошел резкий сброс скорости – с 4170 до 4091 м/с, который затем сменился подъемом скорости УЗ-сигнала, продолжавшимся до 6 мес и достиганием максимального значения 4202 м/с. Затем отмечается два заметных сброса скорости УЗ-сигнала в 6 и 8 мес на фоне постепенного снижения вплоть до 13 мес.

На графике скорости прохождения УЗ-сигнала через образец состава 1:7 (см. рисунок 2) прослеживается иная зависимость. После

набора прочности до 1,5 мес происходит ступенчатое снижение скорости с заметными спадами через 3 мес (с 4379 до 4311 м/с) и 6 мес (с 4325 до 4263 м/с). После 6 мес скорость стабилизируется, достигая к 12 мес 4241 м/с, что является самым низким значением за исследуемый период и отражает общую тенденцию к снижению. Максимальное значение было зафиксировано в возрасте 1,5 мес (4470 м/с), что свидетельствует о преобладании позитивных структурирующих процессов над деструктивными на начальной стадии твердения.

График скорости прохождения УЗ-сигнала в образце состава 1:5 (см. рисунок 2) с максимальным содержанием цемента показывает скачкообразное изменение скорости на начальном этапе (до 3 мес), а затем ступенчатое снижение со сбросами в 4 мес (с 4596 до 4503 м/с) и 8 мес (с 4546 до 4460 м/с), после чего скорость стабилизировалась. Набор прочности длился примерно месяц, как и в воде. Максимальное значение (4647 м/с) зафиксировано в возрасте 2,5 мес. Проведение диагностики образца УЗ-прозвучиванием показано на рисунке 3.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что метод УЗ-диагностики проявляет достаточную чувствительность к изменениям структуры корродированных образцов, твердевших в растворе сульфата магния. Вид графиков скорости прохождения УЗ-сигнала в корродированных образцах отличается от аналогичных у образцов нормального твердения тем, что на фоне скачкообразных колебаний значений скорости УЗ происходит ступенчатое снижение, в то время как при твердении в воде колебания скорости УЗ-сигнала остаются на уровне, достигнутом на начальной стадии твердения.

Большое влияние на коррозионную стойкость оказывает проницаемость бетона. С повышением проницаемости бетона при снижении расхода вяжущего, скорость коррозии и деструкция бетона возрастают, что хорошо коррелируется с данными ультразвуковой диагностики в составах 1:5, 1:7, 1:9 (см. рисунок 2). В растворе сульфата магния коррозия развивается по механизму магниезиальной и сульфатной, деструкция бетона при этом обусловлена образованием продуктов: гипса, этtringита, брусита. Малорастворимые продукты гипс и этtringит кристаллизуются с увеличением объема твердой фазы, что сопровождается образованием трещин и разрушением структуры цементного камня.

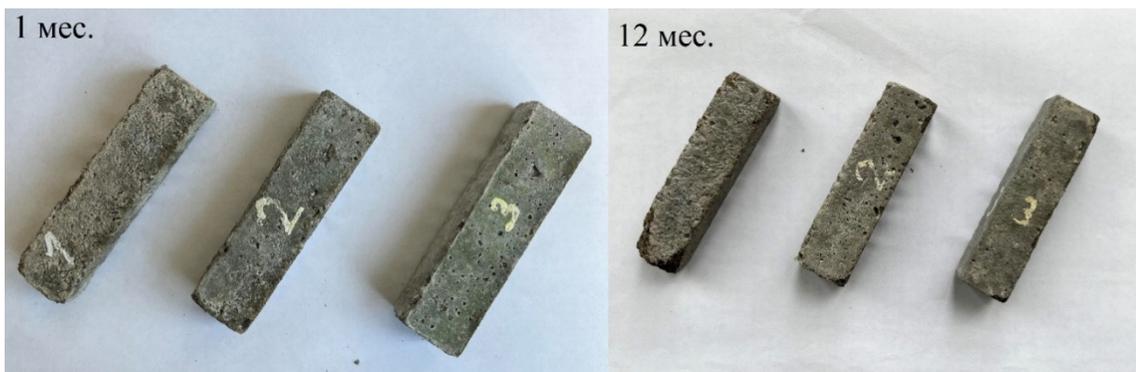


Рисунок 4 – Внешний вид образцов, твердевших в 1,5%-м р-ре $MgSO_4$ 1 и 12 мес.
 Состав: 1 – 1:9, 2 – 1:7, 3 – 1:5
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – The appearance of the samples solidified in 1.5% $MgSO_4$ solution for 1 and 12 months
 Composition: 1 – 1:9, 2 – 1:7, 3 – 1:5
 Source: compiled by the authors.

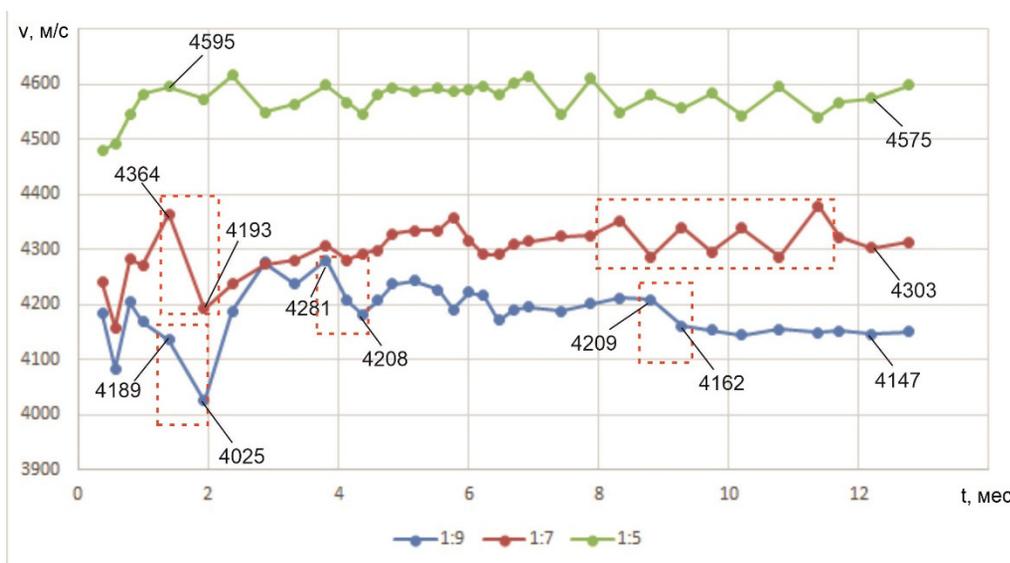


Рисунок 5 – Изменение скорости прохождения УЗ-импульса в образцах бетона различного состава, твердевших в 1,5%-м р-ре Na_2SO_4
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – The change in the velocity of the ultrasonic pulse in concrete samples of various compositions solidified in 1.5% Na_2SO_4 solution
 Source: compiled by the authors.

Поступление ионов магния из раствора приводит к образованию МН и М-S-H фазы, что отрицательно влияет на устойчивость гидросиликатов кальция и усиливает сульфатное воздействие.

Внешний вид образцов (рисунок 4) подтверждает приведенные экспериментальные данные. На поверхности образцов после 12 мес испытаний наблюдаются признаки разрушения:

выкрашивание углов и ребер балочек, особенно у образца 1:9 – появление каверн на гранях.

Растворы сульфата натрия менее агрессивны по отношению к бетону, процессы протекают по механизму сульфатной коррозии с образованием гипса и этtringита. Процессы деструкции бетона и, соответственно, показатели ультразвуковой диагностики имеют свои особенности.



Рисунок 6 – Внешний вид образцов, твердевших в 1,5%-м р-ре Na_2SO_4 1 и 12 мес.
 Состав: 1 – 1:9, 2 – 1:7, 3 – 1:5
 Источник: составлено авторами.

Figure 6 – The appearance of the samples solidified in 1.5% Na_2SO_4 solution for 1 and 12 months
 Composition: 1 – 1:9, 2 – 1:7, 3 – 1:5
 Source: compiled by the authors.

У образца бетона состава 1:9, твердевшего в растворе Na_2SO_4 (рисунок 5), наблюдалось несколько спадов скорости УЗ-сигнала: первый – через 1 мес, разница составила 164 м/с (с 4189 до 4025 м/с), следующий спустя 4 мес – с 4281 м/с (что является максимальным за год значением) до 4208 м/с, последний через 9 мес – с 4209 м/с до 4162 м/с. Как видно, после первого спада скорости наблюдался дальнейший рост, но после 4 мес можно отметить устойчивую тенденцию к снижению скорости УЗ, что отражает преобладающее развитие деструктивных процессов в бетоне.

У образца состава 1:7 (см. рисунок 5) после спада скорости УЗ-сигнала через 1 мес твердения наблюдался непрерывный рост до 6 мес, в возрасте с 8 до 11 мес каждые две недели происходили циклические изменения показаний скорости УЗ, с колебаниями значений от 4280 до 4380 м/с, после чего скорость стабилизировалась примерно на уровне 4300 м/с. Скорость к 12 мес зафиксирована ниже величины, достигнутой в начале твердения.

У образца бетона состава 1:5 с максимальным содержанием вяжущего на графике скорости УЗ-импульса не наблюдается каких-либо резких скачков показаний, скорость поддерживается на стабильном уровне после первого месяца пребывания в агрессивном растворе. Несмотря на то, что с 7 по 11 мес присутствуют циклические изменения показателей, величина этих колебаний незначительна – максимальный перепад составил 60 м/с. Набор прочности продолжался 1 мес, как при твердении в воде.

Полученные данные скорости УЗ-импульса свидетельствуют о начавшихся процессах деструкции в образце состава 1:9 практически после 4–6 мес хранения в агрессивной среде и коррозионной устойчивости образцов составов 1:7 и 1:5, которые не продемонстрировали заметного снижения скорости. Это согласуется с известными положениями о влиянии вида агрессивной среды и проницаемости бетона на коррозионную устойчивость. Видимых признаков разрушения образцов (рисунок 6) не обнаружено.

Таким образом, результаты, полученные при помощи метода УЗ-диагностики, показали, что скорость прохождения УЗ-сигнала в образцах достаточно чувствительна к процессам деструкции, происходящим в бетоне под воздействием агрессивных сред, что довольно точно отражается количественными показателями. Данные скорости УЗ-сигнала адекватно отражают деструкцию бетона различного состава при смене вида агрессивного носителя, что хорошо согласуется с закономерностями физико-химических процессов отдельных видов коррозии.

Количественные показатели прочности образцов всех сред хранения приведены в таблице 2. Образцы бетона, помещенные в раствор сульфата натрия, набирали прочность до 6 мес с момента погружения в агрессивную среду, к 12 мес этот показатель снизился. В растворе сульфата магния у образцов составов 1:7 и 1:5 прочность начала снижаться уже к 6 мес, у образца состава 1:9 мало изменилась. К 12 мес все образцы показали снижение прочностных показателей.

Таблица 2
Прочность на сжатие образцов бетона различного состава и сред хранения
Источник: составлено авторами.

Table 2
Compressive strength of concrete samples of various compositions and storage media
Source: compiled by the authors.

Состав	Среда	Прочность на сжатие, МПа, в сроки твердения					Кст
		14 сут перед погружением	1 мес	3 мес	6 мес	12 мес	
1:9	вода	10,30	8,07	10,20	12,61	14,73	1
1:9	1,5%-й р-р MgSO ₄		8,67	6,80	11,91	10,43	0,71
1:9	1,5%-й р-р Na ₂ SO ₄		6,06	11,46	14,08	11,49	0,78
1:7	вода	17,26	22,50	20,05	22,23	22,80	1
1:7	1,5%-й р-р MgSO ₄		20,75	26,60	21,38	18,04	0,79
1:7	1,5%-й р-р Na ₂ SO ₄		21,66	18,69	19,86	19,46	0,85
1:5	вода	34,73	35,75	37,60	35,84	40,14	1
1:5	1,5%-й р-р MgSO ₄		35,57	32,05	30,64	25,21	0,63
1:7	1,5%-й р-р Na ₂ SO ₄		33,62	29,55	34,52	32,77	0,82

В качестве количественной характеристики кроме прочности использовали коэффициент стойкости (Кст), на основании которого можно судить об относительном изменении прочности образцов

$$K_{ст} = \frac{R_{сж.агр.ср.}}{R_{сж.вод.}}$$

где $R_{сж.агр.ср.}$ – прочность на сжатие образцов, твердевших в агрессивной среде; $R_{сж.вод.}$ – прочность на сжатие образцов, твердевших в воде.

$K_{ст}$ находился в пределах от 0,63 до 0,85, значения ниже 0,8 свидетельствуют о низкой коррозионной стойкости образцов бетона. Коэффициент стойкости образцов бетона всех исследуемых составов в растворе сульфата магния был ниже, чем в растворе сульфата натрия, что является аутентичным. Однако четкой корреляции между содержанием вяжущего и величиной $K_{ст}$ не прослеживается, хотя известно, что коррозионная стойкость бетона в большой степени определяется его проницаемостью, которая увеличивается по мере увеличения содержания заполнителя в бетонной смеси. Вызывает вопрос значение коэффициента стойкости $K_{ст}=0,63$ у бетона с наибольшим расходом вяжущего, состава 1:5. При этом приведенные на рисунке 3 данные не показывают резкого

снижения скорости прохождения УЗ-сигнала у образца данного состава, а следовательно, прочности к 12 мес испытаний в агрессивной среде. Полученные результаты в очередной раз подтверждают, что прочность и коэффициент стойкости не всегда позволяют адекватно судить о развитии коррозии. В этой связи применение параллельно со стандартными методами способа ультразвуковой диагностики при исследовании коррозии позволит повысить достоверность результатов исследований.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана взаимосвязь скорости, амплитуды и частоты колебаний УЗ-сигнала в образцах бетона в зависимости от состава и условий твердения. У образцов нормального твердения наблюдалось скачкообразное изменение скорости прохождения УЗ-сигнала через образец в течение всего срока испытаний, при этом сохранялся средний уровень значений скорости, достигнутый на начальной стадии твердения. С увеличением количества вяжущего в бетоне амплитуда и частота колебаний затухают, что является закономерным следствием протекающих физико-химических и структурирующих процессов в цементном камне.

Установлено, что показания скорости прохождения УЗ-сигнала реагируют на изменения структуры корродированных образцов, твердевших в агрессивных растворах сульфатов магния и натрия. Графики скорости прохождения УЗ-сигнала в образцах всех составов, твердевших в растворе сульфата магния, демонстрируют ступенчатое снижение на фоне скачкообразных колебаний. При воздействии менее агрессивного раствора сульфата натрия процессы деструкции бетона протекают по другому механизму, что фиксировалось данными скорости прохождения УЗ-сигнала. Полученные данные методом УЗ-диагностики адекватно отражают известные положения о влиянии вида агрессивной среды и проницаемости бетона на коррозионную стойкость.

Прочность и коэффициент стойкости не всегда могут демонстрировать реальное развитие коррозионного повреждения бетона, так как испытание в периоды сброса прочности может дать ошибочный результат, поэтому применять их следует с осторожностью. В этой связи целесообразно использовать наряду со стандартными методами испытаний коррозионной стойкости бетона метод ультразвуковой диагностики, который позволяет учитывать динамику развития прочности и давать обоснованную оценку конкретных внешних воздействий, что позволит повысить достоверность результатов исследований.

Использование метода УЗ позволяет получить новые данные о процессах микротрещинообразования при деструкции бетона под воздействием агрессивных сред. Его применение позволило зафиксировать колебания скорости (прочности), наблюдаемые через небольшие интервалы времени, которые не диагностируются при разрушающих методах исследования, применяемых эпизодически. Это обуславливает целесообразность дальнейшей проработки данной методики, чтобы наряду с традиционными методами на основе механических испытаний бетонных образцов получать достоверные данные о развитии сложных многостадийных процессах преждевременного разрушения бетона. Относительная простота, быстрота и достаточная точность делают рассмотренный метод весьма перспективным при проведении исследовательских работ по коррозии бетона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Толыпин Д.А. Сравнительная стойкость бетонов с заполнителем различных размеров и без него // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 11. С. 43–47. DOI 10.12737/article_5a001aaf2319e6.57195740.
2. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М. Методы оценки коррозионной стойкости цементных композитов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 3. С. 23–24.
3. Зубков В.А. Совершенствование ультразвукового метода определения прочности бетона // Бетон и железобетон. 1997. № 4. С. 21–23.
4. Popovics, S. Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship. *Materials Evaluation*. 2001; 59(2): 123–130.
5. Смирнов В.В., Назаров М.А. Ультразвуковой контроль подвижности бетонной смеси // Фундаментальные исследования. 2013. № 10-12. С. 2630–2633.
6. Варламов А.А., Новиков М.А., Курбангалеева М.Р. Исследования бетона неразрушающими методами // Современное промышленное и гражданское строительство. 2021. Т. 17, № 3. С. 147–156.
7. Lin Y, Lai, C.P. and Yen, T. Prediction of Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) in concrete. *ACI Materials Journal*. 2003; 100(1): 21–28.
8. Trtnik, G., Kavcic, F. and Turk, G. Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. *Ultrasonics*. 2009; 49(1): 53–60.
9. Сериков Я.А. Информационно-измерительная система для исследования структуры монолитного бетона ультразвуковым методом // Территория науки. 2017. № 3. С. 96–100.
10. Штенгель В.Г. Ультразвуковой контроль структуры бетона // В мире неразрушающего контроля. 2004. № 1. С. 4.
11. Antonaci, P. et al. Nonlinear ultrasonic evaluation of load effects on discontinuities in concrete. *Cement and Concrete Research*. 2010; 40(2): 340–346.
12. Знайченко П.А. Определение глубины трещин ультразвуковым методом в обделке транспортных тоннелей большого сечения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 1. С. 34–37.
13. Ismail M.P. Selection of suitable NDT methods for building inspection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017; 271:012085.
14. Флегонтов Д.В., Акулова М.В., Петров А.В. Термический анализ как способ установления скрытых повреждений // Пожарная и аварийная безопасность. 2019. № 2(13). С. 11–15.
15. Семененко С.Я., Марченко С.С., Арьков Д.П. Тарировочная зависимость при ультразвуковом контроле коэффициента фильтрации бетона // Аграрный научный журнал. 2018. № 10. С. 62–66. DOI 10.28983/asj.v0i10.456.
16. Browne, Terence M. et al. Underwater Bridge Inspection, FHWA-NHI-10-027, Office of Bridge Technology, FHWA, 2010
17. Пшеничный Г.Н. О пилообразности твердения цементных бетонов // Техника и технология силикатов. 2015. Т. 22, № 2. С. 9–14.

REFERENCES

- Rahimbaev Sh.M., Tolykina N.M., Tolykin D.A. Comparative durability of concretes with and without filler of various sizes. *Bulletin of belgorod state technological university named after. V.G. Shukhov*. 2017; 11: 43–47. DOI 10.12737/article_5a001aaf2319e6.57195740. (in Russ.)
- Rahimbaev Sh.M., Tolykina N.M. Methods for assessing the corrosion resistance of cement composites. *Bulletin of belgorod state technological university named after. V.G. Shukhov*. 2012; 3: 23–24. (in Russ.)
- Zubkov V.A. Improvement of the ultrasonic method for determining the strength of concrete. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1997; 4: 21–23. (in Russ.)
- Popovics S. Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship. *Materials Evaluation*. 2001; 59(2): 123–130.
- Smirnov V.V., Nazarov M.A. Ultrasonic examination of concrete consistency. *Fundamental research*. 2013; 10–12: 2630–2633. (in Russ.)
- Varlamov A.A., Novikov M.A., Kurbangaleeva M.R. Research of concrete by non-destructive methods. *Modern Industrial and Civil Construction*. 2021; 17(3): 147–156. (in Russ.)
- Lin Y, Lai, C.P. and Yen, T. Prediction of Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) in concrete. *ACI Materials Journal*. 2003;100(1):21–28. (in Russ.)
- Trtnik G., Kavcic F., Turk G. Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. *Ultrasonics*. 2009; 49(1): 53–60.
- Serikov Ya. A. Information and measurement system for studying the structure of monolithic concrete by ultrasonic method. *Territoriya nauki*. 2017; 3: 96–100. (in Russ.)
- Shtengel' V. G. Ultrasonic inspection of the concrete structure. *Ndt world*. 2004;1:4. (in Russ.)
- Antonaci P. et al. Nonlinear ultrasonic evaluation of load effects on discontinuities in concrete. *Cement and Concrete Research*. 2010; 40(2): 340–346.
- Znaychenko P.A. The determination of crack depth by ultrasonic method in the lining of transport tunnels of large cross section. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2006; 1: 34–37. (in Russ.)
- Ismail M.P. Selection of suitable NDT methods for building inspection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017; 271:012085.
- Flegontov D.V., Akulova M.V., Petrov A.V. Thermal analysis as a method of establishing hidden damages. *Pozharnaya i avarijnaya bezopasnost'*. 2019; 2(13): 11–15. (in Russ.)
- Semenenko S.Ya., Marchenko S.S., Arkov D.P. The calibration relationship by ultrasound filtration coefficient of concrete. *The Agrarian Scientific Journal*. 2018; 10: 62–66. DOI 10.28983/asj.v0i10.456. (in Russ.)
- Browne, Terence M. Underwater Bridge Inspection, FHWA-NHI-10-027. *Office of Bridge Technology*, FHWA, 2010
- Pshenichnyy G.N. On the sawtooth hardening of cement concrete. *Technique and technology of silicates*. 2015; 22(2): 9–14. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Толыпина Н.М. Постановка задач исследования. Выбор методологии и методов. Обобщение результатов работы, формулирование выводов. Редактирование статьи.

Данилов Д.Ю. Выполнение экспериментальных исследований, обработка результатов. Оформление статьи.

CONTRIBUTION OF AUTHORS

Tolykina N.M. Setting research objectives. The choice of methodology and methods. Summarizing the results of the work, formulating conclusions. Editing the article.

Danilov D.Yu. Performing experimental studies, processing the results. The design of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Толыпина Наталья Максимовна – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Строительное материаловедение изделий и конструкций» Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5788-8520>, **SPIN-код:** 4650-2537, **Scopus Author ID:** 56568225500, **Researcher ID:** I-8523-2018, e-mail: tolykina.n@yandex.ru

Данилов Дмитрий Юрьевич – аспирант кафедры «Строительное материаловедение изделий и конструкций» Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2891-961X>, **SPIN-код:** 6472-1850, **Researcher ID:** HGB-3766-2022, e-mail: dimadan31@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Natalia M. Tolykina. Dr. of Sci., Associate Professor, Construction Materials Science, Products and Structures Department, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University (46, Kostiuikova Street, Belgorod, 308012), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5788-8520>, **SPIN-код:** 4650-2537, **Scopus Author ID:** 56568225500, **Researcher ID:** I-8523-2018, e-mail: tolykina.n@yandex.ru

Dmitrii Yu. Danilov. Graduate student, Construction Materials Science, Products and Structures Department, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University (46, Kostiuikova Street, Belgorod, 308012), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2891-961X>, **SPIN-код:** 6472-1850, **Researcher ID:** HGB-3766-2022, e-mail: dimadan31@gmail.com

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 <https://translit.ru>, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи обычным шрифтом (размер шрифта 12 пт.).

4. Аннотация. Аннотация включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе научная статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению, объем от 200 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Приводится на русском и английском языках. Начинается словом «Аннотация» с прописной буквы (шрифт полужирный, курсив, 10 пт); точка; затем с прописной буквы текст (курсив, 10 пт).

5. Ключевые слова служат ориентиром для читателя и используются для поиска статей в электронных базах, поэтому должны отражать дисциплину (область науки, в рамках которой написана статья), тему, цель и объект исследования. Рекомендуемое количество ключевых слов – 10–12, количество слов внутри ключевой фразы – не более трех. Размещаются после аннотации, на русском и английском языках.

6. Благодарности. Раздел включен в требования всеми крупными издательствами. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

7. Основные положения. Отражают ключевые результаты исследования, основное содержание статьи, изложенные тезисно и оформленные в виде 3–5 пунктов маркированного списка.

8. Основной текст статьи излагается на русском или английском языках, в электронном и бумажном виде (шрифт «Arial» (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный), в следующей последовательности:

Введение (1–4 стр.) В этом разделе описываются общая тема исследования, цели и задачи планируемой работы, теоретическая и практическая значимость, приводятся наиболее известные и авторитетные публикации по изучаемой теме, обозначаются нерешенные проблемы. Данный раздел должен содержать обоснование необходимости и актуальности исследования. Информация во Введении должна быть организована по принципу «от общего к частному».

Подразделы введения представлены на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Методы и материалы (от 2 стр. и более) В этом разделе в деталях описываются методы, которые использовались для получения результатов. Обычно сначала дается общая схема экспериментов/исследования, затем они представляются настолько подробно и с таким количеством деталей, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, организационных или структурных диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. Если было получено много похожих зависимостей, представляемых в виде графиков, то приведите только один типичный график, а данные об имеющихся количественных отличиях между ними, представьте в таблице.

Способы представления результатов представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Обсуждение и заключение. Раздел содержит интерпретацию полученных результатов исследования, предположения о полученных фактах, сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

9. Список источников (References)

В список источников включаются только те источники, которые автор использовал при подготовке статьи. Оформление библиографического списка регламентируется ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 20–40 источников, но не более 50. Из них за последние 3 года – рекомендуется указать не менее 20, иностранных – не менее 15. Важно правильно оформить ссылку на источник.

Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет.

Источники указываются в конце статьи в алфавитном порядке либо в порядке упоминания в тексте статьи.

Приводится на русском языке и в латинице по образцу, представленному на сайте журнала.

Аффилиация. Фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, ORCID i, Scopus Author ID, ResearcherID, далее указать все места работы, должность, название организации, служебный адрес, электронная почта, телефон, e-mail. Приводится на русском и английском языках.

Технические требования к оформлению.

Формат А4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом упоминании должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подрисовочной подписью, и отдельными файлами с расширением (JPEG, GIF, BMP). Должны быть пронумерованы (Таблица 1 – Заголовок, Рисунок 1 – Наименование), озаглавлены (таблицы должны иметь заглавие, выравнивание по левому краю, а иллюстрации – подрисовочные подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы предоставляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

Общий порядок опубликования

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятыми редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

– с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;

– согласие на обработку персональных данных в научном периодическом издании;

При регистрации присваивается дата поступления и регистрационный номер статьи. Статьи регистрируются через электронную редакцию. Регистрация осуществляется бесплатно.

Первичная экспертиза на соответствие требованиям и профилю журнала (модерация). Зарегистрированные рукописи статей проходят первичную экспертизу на соответствие требованиям и профилю журнала. Началом для экспертизы рукописи статьи редакцией является дата регистрации статьи. Редакция журнала оставляет за собой право отбора присылаемых материалов. Только прошедшие первичную экспертизу рукописи статей, полностью соответствующие требованиям редакции журнала, соответствующие профилю журнала, получают статус «Принята к рассмотрению». Для них отдельно регистрируется дата приема рукописи статьи к рассмотрению.

Рецензирование. Принятые к рассмотрению рукописи статей направляются на слепое рецензирование для оценки их научного содержания нескольким специалистам соответствующего профиля, членам редакционной коллегии и/или редакционного совета. Экспертиза и рецензирование осуществляются бесплатно.

Решение о принятии к публикации основывается на поступивших рекомендациях рецензентов журнала. Если принято решение «рекомендовать с учетом исправления отмеченных недостатков», то автору направляются рекомендации и вопросы для исправления. Рукопись статьи, скорректированная автором, повторно направляется на рецензирование. Рукописи статей, не рекомендованные к публикации, повторно не рассматриваются. Автору рукописи направляется мотивированный отказ в публикации.

Редакционная подготовка. Рукописи статей, принятые к публикации, проходят редакционную подготовку к публикации – литературное редактирование и сверку данных, корректуру, форматирование, макетирование. Общий срок редакционной подготовки статьи, успешно прошедшей рецензирование, составляет 2 месяца в соответствии с периодичностью и графиком публикации выпусков. Корректуря статей авторам не высылается, тем не менее вопросы, возникающие в процессе редактирования высылаются авторам для согласования.

Окончательный вариант макета статьи высылается по электронной почте автору на утверждение. На рассмотрение отводится три дня, по истечении которых в случае неполучения ответа от автора, макет автоматически считается автором одобренным и в представленном виде направляется в печать.

Публикация. Подготовленный к публикации макет тиражируется в типографии СибАДИ и размещается на сайте журнала в открытом бесплатном доступе. Публикация всех статей одного выпуска осуществляется единой датой.

Метаданные опубликованных статей выпуска регистрируются в РИНЦ, размещаются в библиографических сервисах и базах данных в сроки, установленные соответствующими договорами, распространяются по подписке.