

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



научный рецензируемый журнал

• ВЕСТНИК СИБАДИ •

The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

“Vestnik SibADI”

Том 18, № 2. 2021
Сквозной номер выпуска – 78
Vol. 18, no. 2. 2021
Continuous issue – 78

наука
science

creation
творчество

образование
education

innovations
инновации

technology
технологии

tradition
традиции

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

ВЕСТНИК СИБАДИ

THE RUSSIAN AUTOMOBILE AND HIGHWAY INDUSTRY JOURNAL

DOI 10.26518/2071-7296

**ТОМ 18, № 2. 2021. СКВОЗНОЙ НОМЕР ВЫПУСКА – 78
(VOL. 18, NO. 2. 2021. CONTINUOUS ISSUE – 78)**

Учредитель и издатель:

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

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ

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

Издается с 2004 года

Периодичность издания – 6 раз в год

Подписной индекс в каталоге

ООО «Урал-Пресс» 66000

Founder and Publisher:

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

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

EDITORIAL POSTAL ADDRESS

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

Published since 2004
by 6 issues per year

Subscription index is 66000
in the Rospechat Agency's catalog

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

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

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

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

05.05.04 – Дорожные строительные и подъёмно-транспортные машины (технические науки),
05.22.01 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки),
05.22.08 – Управление процессами перевозки (технические науки),
05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки),
05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки),
05.23.05 – Строительные материалы и изделия (технические науки),
05.23.08 – Технология и организация строительства (технические науки),
05.23.11 – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки).

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

Журнал индексируется и архивируется:

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

Журнал является членом:

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

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Подписано в печать 28.04.2021. Дата выхода в свет 11.05.2021. Формат 60×84 1/8 Гарнитура Arial. Печать оперативная.

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

Контент доступен под лицензией CC BY.

Поступившие в редакцию материалы не возвращаются.

Гонорары не выплачиваются.

Все статьи публикуются бесплатно.

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

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

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

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

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

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

05.22.10 – Operation of automobile transport (Technical Sciences),

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

05.23.05 – Building materials and products (Technical Sciences),

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

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

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

The journal is indexed and archived:

in Russian Index of Scientific Citations;

Dimensions;

EBSCO;

Ulrichsweb Global Serials Directory;

Google scholar

The European Library;

SOCIONET;

VINITI RAS;

Cyberlenika

The Journal is a member of

the Directory of Open Access Journals (DOAJ),

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

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



Signed in print on 28.04.2021. Publication date is 11.05.2021. Format is 60 × 84 1/4.

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

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

Content is available under license CC BY.

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Транспортное, горное и строительное машиностроение

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

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

Транспорт

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

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

Строительство и архитектура

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

Боровик Виталий Сергеевич, д-р техн. наук, проф., Волгоградский научно-технический центр, г. Волгоград, Россия
Scopus Author ID 57192819653, **SPIN-код** 3552-6019, **ORCID ID** 0000-0002-0292-4421

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

Горынин Глеб Леонидович, д-р физ.-мат. наук, проф., ФГБОУ ВО «СурГУХМАО-ЮГРЫ», г. Сургут, Россия
Scopus AuthorID 10040194400

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

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

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

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

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

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

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

Кортаев Дмитрий Николаевич, д-р техн. наук, доц., проф. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 6506823308

Корчагин Павел Александрович, д-р техн. наук, проф., Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 57200726308, **Researcher ID** M-8902-2017, **ORCID ID** 0000-0001-8936-5679

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

Курганов Валерий Максимович, д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», г. Тверь, Россия
ORCID ID 0000-0001-8494-2852

Леонович Сергей Николаевич, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
Scopus Author ID 55887733300, **Researcher ID** A-4757-2016, **ORCID ID** 0000-0002-2378-3947

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

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

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

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

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

Мочалин Сергей Михайлович, д-р техн. наук, проф.,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», г. Омск, Россия
Scopus Author ID 6507433262

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

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

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

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

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

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

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

Scopus Author ID 57193742928, **Researcher ID** M-3242-2017,
ORCID ID 0000-0002-7836-2242

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

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

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

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

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

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

Шаршембиев Жыргалбек Сабырбекович, д-р техн. наук, проф., Кыргызский Национальный аграрный университет имени К.И. Скрябина, г. Бишкек, Киргизская Республика

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL TEAM

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

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

Transport, mining and mechanical engineering

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

Scopus Author ID 6602305514, **Researcher ID** D-9948-2019,
ORCID ID 0000-0002-5104-7568

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

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

Transport

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

Scopus Author ID 16526820600,
ORCID ID 0000-0003-0525-5320

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

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

Construction and architecture

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

Scopus Author ID 6602369365, **Researcher ID** B-7877-2019

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

Scopus Author ID 12645632400,
ORCID ID 0000-0003-4451-2297

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Scopus Author ID 56487473100

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

Scopus Author ID 6507768437, **Researcher ID** E-4049-2015

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

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

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

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

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

Scopus Author ID 7006776195

Dmitriy N. Korotaev, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia

Scopus Author ID 6506823308

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

Scopus Author ID 57200726308, **Researcher ID** M-8902-2017,
ORCID ID 0000-0001-8936-5679

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

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

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

ORCID ID 0000-0001-8494-2852

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

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

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

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

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

ORCID ID 0000-0002-2915-982X

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

Scopus Author ID 56297305000,
ORCID ID 0000-0001-7362-0399

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

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

Sergey M. Mochalin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)", Omsk, Russia
Scopus Author ID 6507433262

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

И.А. Шарифуллин, А.Л. Носко, Е.В. Сафронов

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКОРОСТИ
ДВИЖЕНИЯ ПАЛЛЕТЫ ПО ТОРМОЗНОМУ РОЛИКУ МАГНИТНОГО ТИПА..... 148**

И.Г. Мартюченко, М.И. Зенин

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ВИНТОВОГО БУРА НА МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ..... 160**

В.В. Савинкин, И.В. Шагаев, С.В. Савинкин, В.Н. Кузнецова, А.В. Санду

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ КАТАНИЯ КОЛЕСНЫХ ПАР
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВАГОНОВ..... 168**

А.П. Щербаков, А.Е. Пушкарев, Т.В. Виноградова

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЕЙ
09Г2С И 30МНВ5 НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
РАБОЧИХ ОРГАНОВ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН 180**

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

М.Г. Бояршинов, Н.И. Кузнецов

**ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ
НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОВЕРХНОСТИ СИСТЕМЫ ВЫПУСКА
ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ..... 192**

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

И.Л. Чулкова, И.А. Селиванов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКОПА В КАЧЕСТВЕ ВЯЖУЩЕГО ВЕЩЕСТВА 204

Ю.В. Краснощеков

МОДЕЛЬ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА НА ОТРЫВ СО СКАЛЫВАНИЕМ 216

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Ildar A. Sharifullin, Andrei L. Nosko, Evgenii V. Safronov

**COMPARATIVE ANALYSIS OF CALCULATED AND EXPERIMENTAL STUDIES
OF PALLET MOVEMENT SPEED ON MAGNETIC TYPE BRAKE ROLLER 149**

Igor G. Martiuchenko, Maksim I. Zenin

**COMPARATIVE ANALYSIS OF EFFICIENCY OF USE A SCREW DRILL
ON FROZEN SOIL 161**

Vitalii V. Savinkin, Ivan V. Shagaev, Sergei V. Savinkin, Viktoria N. Kuznetsova, Andrei V. Sandu

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR RESTORATION
OF ROLLED WHEELED PAIRS OF RAILWAY WAGONS 169**

Alexandr P. Scherbakov, Alexandr E. Pushkarev, Tamara V. Vinogradova

**INFLUENCE ANALYSIS OF 09Г2С AND 30МНБ5 STEELS THERMOCYCLIC
TREATMENT ON STRENGTH CHARACTERISTICS
OF ROAD CONSTRUCTION MACHINES WORKING BODIES 181**

PART II. TRANSPORT

Mikhail G. Boiarshinov, Nikita I. Kuznetsov

**VEHICLE SPEED INFLUENCE ON EXHAUST SYSTEM
SURFACE TEMPERATURE 193**

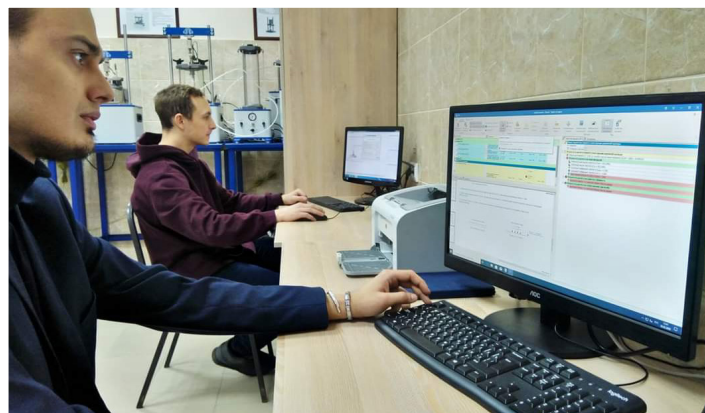
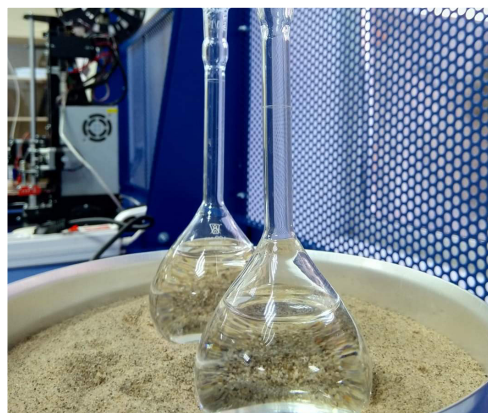
PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Irina L. Chulkova, Igor A. Selivanov

USE OF FIBRE WASTE AS A BINDER..... 205

Yuri V. Krasnoshchekov

MODEL OF SHEAR TEST FOR TEARING STRENGTH OF CONCRETE 217



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



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

УДК 621.867.61

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-148-159>

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПАЛЛЕТЫ ПО ТОРМОЗНОМУ РОЛИКУ МАГНИТНОГО ТИПА

И.А. Шарифуллин, А.Л. Носко, Е.В. Сафронов
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Повышение эффективности использования складского помещения при неизменном объеме является актуальной задачей, решение которой возможно посредством блочного или глубинного складского хранения. Одним из таких решений стало использование гравитационных стеллажей для паллет, которые позволяют сэкономить до 25% пути пройденного вилочными погрузчиками по сравнению с фронтальными стеллажами. Основным элементом безопасной эксплуатации гравитационных роликовых конвейеров, применяемых в стеллажах для паллет, является тормозной ролик. Наиболее перспективной конструкцией считается тормозной ролик магнитного (вихретокового) типа. Цель работы – проведение сравнительного анализа результатов расчетных и экспериментальных исследований по определению скорости движения паллеты по тормозному магнитному ролику.

Материалы и методы. Областью исследования является тормозной ролик магнитного типа. Представлены конструкция и описание работы ролика, результаты расчетного и экспериментального исследований коэффициента магнитной вязкости.

Результаты. Получены расчетные и экспериментальные зависимости скорости движения паллеты по тормозному магнитному ролику. Установлено, что с увеличением скорости движения паллеты по тормозному магнитному ролику погрешность математической модели возрастает, и, прежде всего, после пересечения с прямой предельной скорости эффективности вихретокового тормоза.

Заключение. Проведен сравнительный анализ результатов расчетных и экспериментальных исследований по определению скорости движения паллеты по тормозному магнитному ролику. Установлено, что разработанная конструкция тормозного магнитного ролика в рабочем диапазоне масс паллет от 100 до 600 кг с магнитами в количестве до 16, расположенными с одной стороны диска, и от 100 до 1150 кг с магнитами в количестве до 8 пар, расположенными с обеих сторон диска, обеспечивает регулирование скорости в пределах, не превышающих допустимых скоростей движения паллеты на гравитационном роликовом конвейере. Верификация математической модели показала, что среднее значение погрешности математической модели во всем диапазоне масс паллет на скоростях, не превышающих допустимых скоростей движения паллеты на гравитационном роликовом конвейере и находящихся ниже предельной скорости эффективности вихретокового тормоза, составляет не более 8,2%.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: паллета, стеллаж, гравитационный роликовый конвейер, магнитный (вихретоковый) тормозной ролик, коэффициент магнитной вязкости.

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы выражают благодарность рецензентам статьи.

Поступила 15.03.21, принята к публикации 27.04.21.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Шарифуллин И.А. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных исследований скорости движения паллеты по тормозному ролику магнитного типа / И.А. Шарифуллин, А.Л. Носко, Е.В. Сафронов. – DOI <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-148-159> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 2(78). – С. 148-159.

© Шарифуллин И.А., Носко А.Л., Сафронов Е.В., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-148-159>

COMPARATIVE ANALYSIS OF CALCULATED AND EXPERIMENTAL STUDIES OF PALLET MOVEMENT SPEED ON MAGNETIC TYPE BRAKE ROLLER

Ildar A. Sharifullin, Andrei L. Nosko, Evgenii V. Safronov
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

ABSTRACT

Introduction. Increasing the efficiency of using a warehouse with a constant volume is an urgent task, the solution of which is possible through block or deep-lane storage systems. One such solution is the pallet flow rack, which saves up to 25% of the distance travelled by a forklift compared to the single-deep racks. The main element of the safe operation of the gravity roller conveyors used in a pallet flow rack is a brake roller. The most promising design is a magnetic (eddy current) type brake roller. The purpose of the work is to carry out a comparative analysis of the results of the calculated and experimental studies to determine the speed of movement of a pallet along a magnetic brake roller.

Materials and methods. The research area is the magnetic brake roller. Its construction and description of work presented. The results of calculated and experimental study of the coefficient of magnetic viscosity presented.

Results. The calculated and experimental dependences of the pallet movement speed along the magnetic brake roller were obtained. It was found that with an increase in the speed of movement of the pallet along the magnetic brake roller, the error of the mathematical model increases, and, first of all, after crossing with the straight line of a drag peak speed.

Conclusions. A comparative analysis of the results of the calculated and experimental studies to determine the speed of movement of the pallet along the magnetic brake roller carried out. It was found that the developed design of a magnetic brake roller in the operating range of the pallet masses from 100 to 600 kg with up to 16 magnets located on one side of the disc, and from 100 to 1150 kg with up to 8 pairs of the magnets located on both sides of the disc, provides a speed control within the limits not exceeding the permissible speeds of the pallet movement on the gravitational roller conveyor. The verification of the mathematical model showed that the average value of the error of the mathematical model in the entire range of the pallet masses at speeds not exceeding the permissible speeds of pallet movement on a gravitational roller conveyor and below the drag peak speed is no more than 8.2%.

KEYWORDS: pallet, rack, gravity roller conveyor, magnetic (eddy current) brake roller, coefficient of magnetic viscosity.

ACKNOWLEDGEMENTS. Authors express their gratitude to the reviewers of the paper.

Submitted 15.03.21, revised 27.04.21

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Sharifullin I.A., Nosko A. L., Safronov E.V. Comparative analysis of calculated and experimental studies of pallet movement speed on magnetic type brake roller. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18(2): 148-159. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-148-159>

© Sharifullin I.A., Nosko A.L., Safronov E.V., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Склад – это комплекс, включающий в себя здание, стеллажные системы, подъемно-транспортные устройства, предназначенный для хранения и внутрискладской обработки поступивших товаров, от приема на хранение до подготовки к реализации и отпуска потребителю. Склады позволяют поддерживать запас и обеспечивать непрерывность сбыта готовой продукции. Их роль в логистике заключается в создании условий для оптимизации материального потока [1], что может быть достигнуто путем оптимизации использования пространства [2], уменьшения общего пройденного расстояния вилочными погрузчиками [3], использования автоматизированных систем хранения и поиска [4].

Повышение эффективности использования складского помещения при неизменном объеме является актуальной задачей, решение которой возможно посредством блочного или глубинного складского хранения [5, 6, 7]. Одним из таких решений является использование гравитационных стеллажей (рисунок 1) для паллет [8, 9], которые, как отмечено в [10], позволяют сэкономить до 25% пути пройденного вилочными погрузчиками по сравнению с фронтальными стеллажами.

Конструкцию гравитационного стеллажа для паллет можно разделить на 2 части – статическую и динамическую. Статическая часть включает стандартные элементы стеллажа, которые обеспечивают устойчивость во всех

направлениях, а также поддерживают динамические элементы. Динамическая часть включает в себя гравитационный роликовый конвейер и элементы безопасности, такие как тормозные ролики и устройства остановки и разделения паллет (далее – УОРП) [11].

Поддон с грузом (далее – паллета), движущаяся по гравитационному роликовому конвейеру (далее – ГРК) под действием собственного веса, должна иметь такую скорость, чтобы ее можно было остановить посредством УОРП без повреждений. Это достигается путем использования тормозных роликов, которые устанавливаются по длине конвейера с определенным шагом и ограничивают скорость паллеты в канале стеллажа.

По этой причине основным элементом безопасной эксплуатации ГРК являются тормозные ролики. Наиболее широкое применение в гравитационных стеллажных системах для паллет нашли центробежные фрикционные ролики [12]. Однако они имеют целый ряд недостатков, основными из которых является износ фрикционной накладки тормоза, и, как следствие, изменение тормозных характеристик ролика, а также в процессе работы центробежного фрикционного ролика в атмосферу попадают продукты износа – тормозная пыль, которая оказывает неблагоприятное воздействие на организм человека [13].

Проведенный анализ различных конструкций тормозных роликов гравитационных конвейеров для паллет¹ [14] показал, что одной из

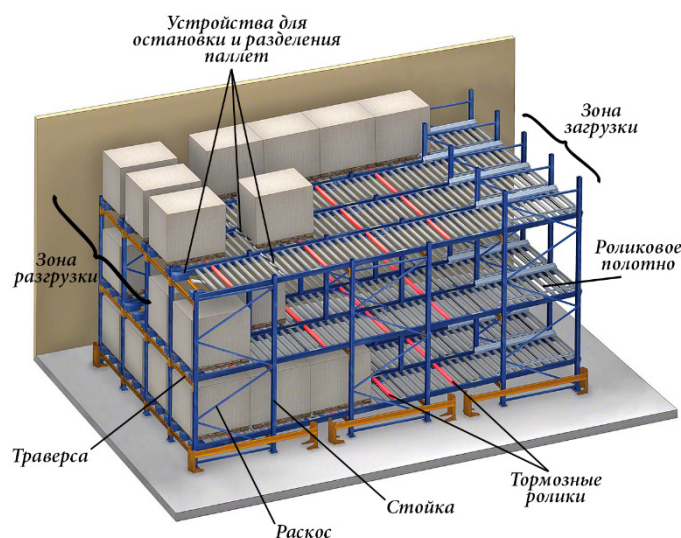


Рисунок 1 – Система паллетных гравитационных стеллажей

Figure 1 – Gravity pallet racking system

¹ Сафронов Е.В., Шарифуллин И.А., Носко А.Л. Устройства безопасной эксплуатации гравитационных роликовых конвейеров паллетного типа: монография. М.: Университетская книга, 2018. 72 с.

наиболее перспективных конструкций тормозных роликов являются тормозные ролики магнитного (вихретокового) типа (далее – ТМР), основным преимуществом которых будет бесконтактное (не фрикционное) торможение, и, соответственно, отсутствие износа фрикционной накладки тормоза ролика.

Предлагаемая работа является продолжением исследований по определению скорости движения паллеты по ТМР [15], в которой разработана математическая модель (далее – ММ) движения паллеты по ТМР и получена зависимость скорости движения паллеты от ее массы.

Цель работы – проведение сравнительного анализа результатов расчетных и экспериментальных исследований по определению скорости движения паллеты по ТМР.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Конструкция и описание работы ТМР. В МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Подъемно-транспортные системы» разработан ТМР (рисунок 2), состоящий из планетарного мультипликатора 1 и магнитного (вихретокового) тормоза 2, размещенных на оси 4 в тормозной вставке 3.

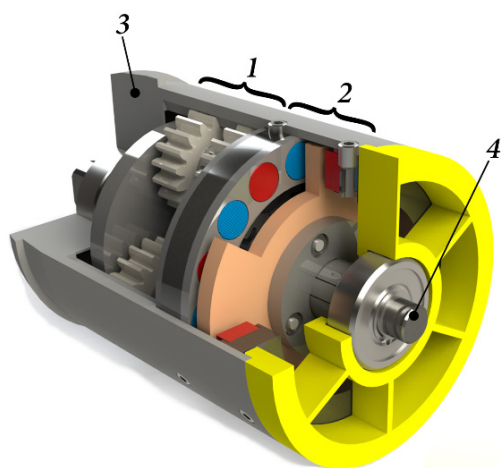


Рисунок 2 – Общий вид ТМР (3D-модель):
1 – планетарный мультипликатор; 2 – магнитный (вихретоковый) тормоз;
3 – тормозная вставка; 4 – ось

Figure 2 – General view of TMP (3D model):
1 – planetary multiplier, 2 – magnetic (eddy current) brake,
3 – brake insert, 4 – axis

Процесс торможения ТМР (рисунок 3) начинается при действии на обечайку ролика (корпус 3 тормозной вставки) крутящего момента, который через планетарный мультипликатор 1 передается на диск 5 (представлен прозрач-

ным) и приводит его во вращение в магнитном поле, создаваемым постоянными магнитами 6, расположенными с чередующейся полярностью и жестко связанными посредством переходника с тормозной вставкой 3.

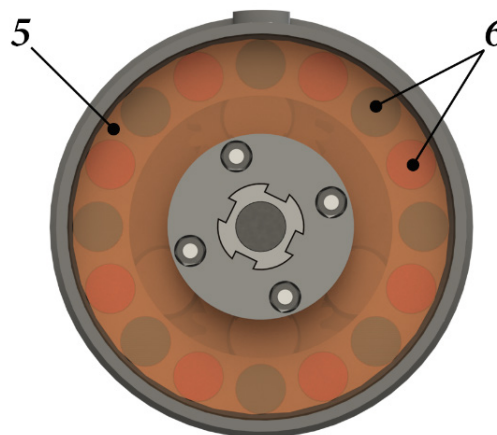


Рисунок 3 – Магнитный (вихретоковый) тормоз:
5 – диск (представлен прозрачным); 6 – постоянные магниты

Figure 3 – Magnetic (eddy current) brake:
5 – disk (transparent), 6 – permanent magnets

Диск 5 выполнен из материала, обладающего высокой удельной проводимостью, например меди или алюминия, и является проводящим телом. Согласно закону силы Лоренца на поверхности диска индуцируются вихревые токи (токи Фуко), которые создают момент сопротивления приложенной внешней нагрузке, т.е. тормозной момент. В качестве материала постоянных магнитов 6 используется соединение Nd-Fe-B (неодим–железо–бор). Такие магниты обладают наилучшими магнитными и электрическими свойствами, срок службы которых на сегодняшний день составляет 20–25 лет и более, а также имеют высокое значение коэрцитивной силы, что делает ТМР практически нечувствительным к воздействию внешних магнитных полей [16].

В конструкции ТМР величина воздушного зазора между магнитами 6 и диском 5 остается неизменной, а тормозной момент зависит от скорости их относительного вращения.

ТМР может быть выполнен в двух исполнениях: с постоянными магнитами, расположенными с чередующейся полярностью, с одной стороны диска и с обеих сторон диска.

В [15] установлено, что основным параметром, определяющим тормозные функции ТМР, а значит и скорость движения паллеты по ТМР, является коэффициент магнитной вязкости – β . Также в [15] получена расчетная

зависимость для определения скорости V движения паллеты по ТМР:

$$V = \frac{D_{MP}^2 \cdot g(\tan \alpha - w)}{D_{BT}^2 \cdot \beta \cdot (1 + u \cdot \eta_{MP})(1 + u)} \cdot M, \quad (1)$$

где M – масса паллеты, кг; V – скорость движения паллеты по ТМР, м/с; w – приведенный коэффициент сопротивления передвижению паллеты по роликовому полотну ГРК [17]; D_{MP} – диаметр ТМР, м; $D_{BT}/2$ – расстояние от оси вращения ТМР до центра постоянных магнитов, м; u – передаточное отношение мультипликатора ТМР; η_{MP} – КПД ТМР; $\alpha = 1,7 \dots 2,8^\circ$ – угол наклона ГРК.

Коэффициент магнитной вязкости. Согласно [18, 19, 21] коэффициент магнитной вязкости может быть определен по формулам:

$$\beta_1 = \frac{\pi \cdot \sigma}{4} D^2 \cdot d \cdot B^2; \quad (2)$$

$$\beta = n \cdot \beta_1, \quad (3)$$

где β_1 – коэффициент магнитной вязкости одного магнита (или одной пары магнитов, расположенных с обеих сторон диска), Н·с/м; n – количество магнитов (или количество пар магнитов); σ – удельная проводимость материала проводящего тела (диск 5 на рисунке 3), См/м; B – магнитная индукция, Тл; D – диаметр поперечного сечения магнита, м; d – толщина проводящего тела (диска), м.

Однако формула (2) не учитывает влияния воздушного зазора между диском и магнитами и их положения друг относительно друга (краевого эффекта) на коэффициент магнитной вязкости β и силу торможения F_{BT} .

В таком случае коэффициент магнитной вязкости β представляет собой комплексный показатель, зависящий от ряда параметров, между которыми сложно установить теоретические зависимости, что не позволяет обоснованно подойти к выбору конструктивных параметров вихретокового тормоза ТМР.

В связи с этим в работе [22] были проведены экспериментальные исследования по определению коэффициента магнитной вязкости одного магнита (и одной пары магнитов) β_1 для условий эксплуатации ТМР в ГРК для паллет и установлено, что коэффициент магнитной вязкости β_1 :

- уменьшается с увеличением воздушного зазора между проводящим телом и посто-

янными магнитами, причем эта зависимость имеет степенной характер;

- уменьшается при увеличении частоты вращения проводящего тела;

- не зависит от изменения расстояния между центрами проводящего тела и постоянного магнита;

- уменьшается при появлении краевого эффекта в соответствии с воздушным зазором.

На основании результатов экспериментальных исследований [22] по определению коэффициента магнитной вязкости β_1 разработана конструкция ТМР, представленная на рисунке 2, которая обеспечивает максимально высокие показатели вихретокового тормоза в условиях эксплуатации ГРК для паллет, а формула (1) с учетом (2) и (3) может быть записана в виде

$$V = \frac{D_{MP}^2 \cdot g(\tan \alpha - w)}{D_{BT}^2 \cdot \beta_1 \cdot n \cdot (1 + u \cdot \eta_{MP})(1 + u)} \cdot M. \quad (4)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнительный анализ расчетной и экспериментальной зависимостей скорости движения паллеты по магнитному ролику. Экспериментальные исследования ТМР проводились для количества постоянных магнитов $n=8$, $n=16$ (расположенных с одной стороны диска) и пар магнитов $n=4$, $n=8$ (расположенных с обеих сторон диска) на экспериментальном стенде, позволяющем имитировать реальные режимы эксплуатации тормозных роликов различных конструктивных исполнений, применяемых в ГРК для паллет [23]. Как правило, диаметр ТМР D_{MP} выбирается исходя из конструктивных ограничений ГРК и гравитационного стеллажа для паллет. На практике для ТМР чаще всего используются трубы с диаметром D_{MP} , равным 80 или 89 мм с толщиной стенки 3 мм из материала Сталь 3. В разработанной конструкции (см. рисунок 2) $D_{MP} = 89$ мм, а $D_{BH} = 83$ мм, а в качестве мультипликатора на основании анализа, проведенного в работе [24], используется двухступенчатый мультипликатор с передаточным отношением $u=24$. КПД ТМР η_{MP} может быть рассчитан по аналогии с КПД центробежного фрикционного ролика [12]. Согласно экспериментальным данным [22] коэффициент магнитной вязкости для представленной конструкции ТМР (см. рисунок 2) $\beta_1=0,113$ Н·с/м (для одного магнита) и $\beta_1=0,583$ Н·с/м (для одной пары магнитов).

Исходные данные для расчета скорости V движения паллеты по ТМР по формуле (4) представлены в таблице 1.

Таблица 1
Исходные данные для расчета скорости V движения паллеты по TMP

Table 1
Initial data for calculating the speed V of the pallet movement on TMP

Параметр	Значение	Единица измерения
Масса паллеты, M	100–1300	кг
Диаметр TMP, D_{MP}	0,089	м
Длина TMP, L_{MP}	0,88	м
Расстояние от оси вращения TMP до центра постоянных магнитов, $D_{BT}/2$	0,03	м
Коэффициент магнитной вязкости β_1 – для одного магнита, – для одной пары магнитов	0,113 0,583	Н·с/м
Приведенный коэффициент сопротивления передвижению паллеты по роликовому полотну ГРК w	0,02	–
Уклон роликового полотна ГРК $\tan \alpha$	0,04	–

Погрешность теоретического расчета может быть определена по формуле

$$\varepsilon = \frac{|V_{Calc} - \tilde{V}_{Exp}|}{\tilde{V}_{Exp}} 100\%, \quad (5)$$

где V_{Calc} – расчетная скорость движения паллеты по TMP, м/с; $\tilde{V}_{Exp}$ – среднее значение экспериментальных значений скорости паллеты, м/с.

Результаты и сравнительный анализ полученных расчетных и экспериментальных исследований скорости V движения паллеты по TMP приведены в таблицах 2 и 3 и на рисунках 4 и 5.

Таблица 2
Результаты расчетных и экспериментальных исследований скорости V движения паллеты по TMP

Table 2
Results of the calculated and experimental studies of the speed V of the pallet movement along the TMP

Масса паллеты M , кг	Расчет V_{Calc}				Эксперимент $\tilde{V}_{Exp}$			
	Магниты с одной стороны диска		Магниты с обеих сторон диска		Магниты с одной стороны диска		Магниты с обеих сторон диска	
	Количество магнитов n		Количество пар магнитов n		Количество магнитов n		Количество пар магнитов n	
	8	16	4	8	8	16	4	8
100	0,102	0,051	0,039	0,019	0,109	0,049	0,043	0,021
200	0,204	0,102	0,078	0,039	0,220	0,096	0,082	0,037
300	0,305	0,153	0,118	0,059	0,330	0,143	0,119	0,054
400	0,407	0,204	0,157	0,078	0,473	0,195	0,158	0,073
500	0,509	0,255	0,197	0,098	0,630	0,252	0,201	0,091
600	0,611	0,305	0,236	0,118	0,795	0,308	0,251	0,111
700	–	0,356	0,276	0,138	–	0,389	0,298	0,128
800	–	0,407	0,315	0,157	–	0,480	0,364	0,148
900	–	0,458	0,355	0,177	–	0,585	0,437	0,165
1000	–	0,509	0,394	0,197	–	0,687	0,522	0,186
1100	–	–	–	0,217	–	–	–	0,211
1200	–	–	–	0,236	–	–	–	0,233
1300	–	–	–	0,2565	–	–	–	0,2564

Таблица 3
Сравнительный анализ результатов расчетных и экспериментальных исследований скорости V движения паллеты по ТМР

Table 3
Comparative analysis of the results of calculated and experimental studies of the speed V of the pallet movement along the TMP

Масса паллеты M , кг	Погрешность расчета, %			
	Магниты с одной стороны диска		Магниты с обеих сторон диска	
	Количество магнитов n		Количество пар магнитов n	
			4	8
100	7,3%	3,3%	8,2%	7,7%
200	7,7%	6,2%	4,2%	6,3%
300	7,7%	6,8%	0,6%	7,6%
400	13,9%	4,4%	0,4%	7,3%
500	19,2%	1,2%	1,9%	8,2%
600	23,1%	0,8%	5,8%	6,5%
700	–	8,5%	7,5%	7,1%
800	–	15,2%	13,3%	6,3%
900	–	21,6%	18,8%	7,4%
1000	–	25,8%	24,4%	5,9%
1100	–	–	–	2,7%
1200	–	–	–	1,5%
1300	–	–	–	0,04%

На рисунках 4 и 5 также представлена зависимость допустимой скорости движения паллеты от массы M паллеты на ГРК. Данная зависимость построена по методике, разработанной на базе теории удара Кокса в [25], в которой допустимая скорость движения паллеты определяется деформацией упора УОРП, при которой он не теряет своей несущей способности. В таком случае рабочий диапазон масс паллет ТМР должен обеспечивать регулирование скорости в пределах, не превышающих допустимых скоростей движения паллет на ГРК.

Сравнительный анализ результатов расчетных и экспериментальных исследований показал, что с увеличением скорости движения V паллеты массой M по ТМР погрешность MM возрастает. Это обусловлено допущениями MM , что вихретоковый тормоз ТМР представляет собой элемент линейного вязкого трения [18, 19, 21]. По этой причине скорость движения паллеты по ТМР, полученная расчетным способом, представляет собой практически линейную зависимость, что хорошо видно на рисунках 4 и 5. Однако, исходя из результатов

исследований [26], необходимо учитывать такой параметр, как «предельная скорость эффективности вихретокового тормоза», которая определяется по формуле

$$\omega_{отн} = \frac{4}{\mu \cdot \sigma \cdot d \cdot D_{BT}}, \quad (6)$$

где d – толщина проводящего тела (диска, см. рисунок 3), м; μ – магнитная проницаемость материала проводящего тела, Гн/м; σ – удельная проводимость материала проводящего тела, См/м.

Предельная скорость эффективности вихретокового тормоза – это угловая скорость проводящего тела (диска) относительно постоянных магнитов, при превышении которой вихревые токи, образующиеся на поверхности проводящего тела, не успевают достичь своих предельных значений, что приводит к снижению коэффициента магнитной вязкости β и, соответственно, к падению тормозного момента вихретокового тормоза.

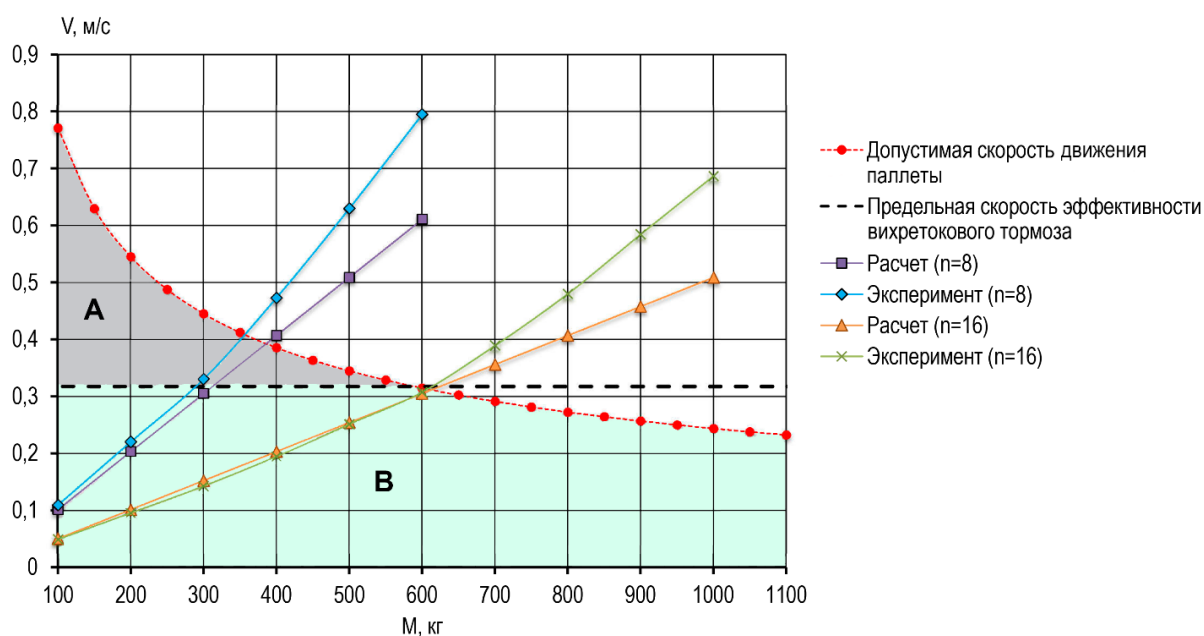


Рисунок 4 – Сравнительный анализ результатов расчетных и экспериментальных исследований скорости V движения паллеты по ТМР с магнитами, расположенными с одной стороны диска

Figure 4 – Comparative analysis of the results of calculated and experimental studies of the speed V of pallet movement along the TMP with magnets on one side of the disk

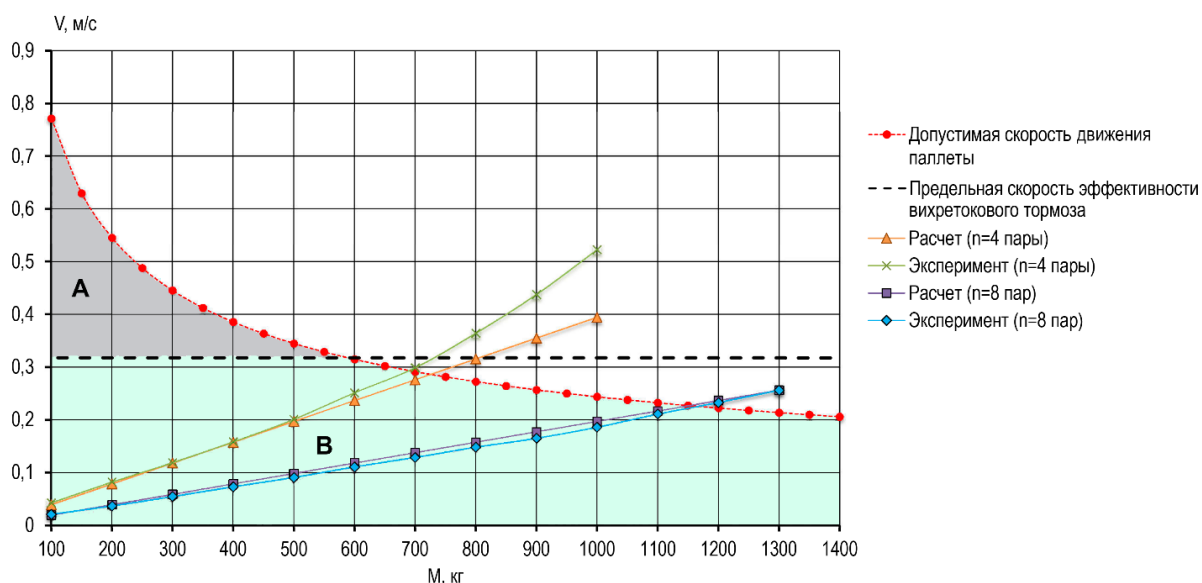


Рисунок 5 – Сравнительный анализ результатов расчетных и экспериментальных исследований скорости V движения паллеты по ТМР с магнитами, расположенными с обеих сторон диска

Figure 5 – Comparative analysis of the results of calculated and experimental studies of the speed V of pallet movement along the TMP with magnets on both sides of the disk

Для представленной на рисунке 2 конструкции ТМР угловая скорость диска относительно постоянных магнитов может быть определена по формуле

$$\omega_{\text{отн}} = \frac{2 \cdot V}{D_{\text{МР}}} (1 + u). \quad (7)$$

Приравнявая (6) и (7), получим расчетную зависимость для определения предельной скорости $[V_{\text{пс}}]$ эффективности вихретокового тормоза

$$[V_{\text{пс}}] = \frac{2 \cdot D_{\text{МР}}}{\mu \cdot \sigma \cdot d \cdot D_{\text{БТ}} (1 + u)}. \quad (8)$$

Как видно из рисунков 4 и 5, графики скорости, полученные из эксперимента, меняют свой наклон, а погрешность расчета и эксперимента начинает возрастать после пересечения с прямой предельной скорости эффективности вихретокового тормоза. Однако, принимая во внимание кривую допустимой скорости движения паллеты, графики, представленные на рисунках 4 и 5, можно разделить на области А и В.

На участке графиков выше предельной скорости эффективности вихретокового тормоза с позиции ограничения скорости паллеты в канале стеллажа наибольший практический интерес представляет область А, в которой не превышает допустимая скорость движения паллеты. Возрастание погрешности ММ в этой области хорошо согласуется с выводами работ [26, 27] и связано с тем, что угловая скорость проводящего тела (диска) ТМР относительно постоянных магнитов превышает предельную угловую скорость эффективности вихретокового тормоза, при которой вихревые токи, образующиеся на поверхности проводящего тела, не успевают достичь своих предельных значений.

Область В графиков скорости представляет собой рабочий диапазон масс паллет ТМР, в котором обеспечивается регулирование скорости в пределах, не превышающих допустимых скоростей движения паллеты на ГРК и находящихся ниже предельной скорости эффективности вихретокового тормоза. В этой области полученные расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными данными, и погрешность ММ не превышает 8,2%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен сравнительный анализ результатов расчетных и экспериментальных исследова-

ний по определению скорости движения паллеты по ТМР.

Установлено, что в рабочем диапазоне масс паллет:

- от 100 до 600 кг разработанная конструкция ТМР с магнитами в количестве до 16, расположенными с одной стороны диска, обеспечивает поддержание скорости в пределах, не превышающих допустимых скоростей движения паллеты на ГРК;

- от 100 до 1150 кг разработанная конструкция ТМР с магнитами в количестве до 8 пар, расположенными с обеих сторон диска, обеспечивает поддержание скорости в пределах, не превышающих допустимых скоростей движения паллеты на ГРК.

Верификация ММ показала, что среднее значение погрешности ММ во всем диапазоне масс паллет на скоростях, не превышающих допустимых скоростей движения паллеты на ГРК и находящихся ниже предельной скорости эффективности вихретокового тормоза, составляет не более 8,2%.

Экспериментальные исследования по определению скорости движения паллеты по ТМР показали, что при превышении предельной скорости $[V_{\text{пс}}]$ эффективности вихретокового тормоза значения коэффициента магнитной вязкости β_1 уменьшаются и требуются дополнительные экспериментальные исследования на этих скоростях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Boslovyak P. V., Lagerev A. V. Optimization of the conveyor transport cost // IFAC-PapersOnLine. 2019; 52 (25): 397-402.
2. Derhami, S., Smith, JS., Gue, KR. Optimising space utilisation in block stacking warehouses // Int J Of Prod Res. 2017; 55(21): 6436-6452.
3. Ghalekhondabi, I., Masel, DT. Storage allocation in a warehouse based on the forklifts fleet availability // Journal of Algorithms & Computational Technology. 2018; 12(2): 127-135.
4. Heragu, SS., Cai, X., Krishnamurthy, A., Malmborg, CJ. Analytical models for analysis of automated warehouse material handling systems // Int J Of Prod Res. 2011; 49(22): 6833-6861.
5. Sulirova, I., Zavodska, L., Rakyta, M., Pelantova, V. State-of-the-art approaches to material transportation, handling and warehousing // 12th International scientific conference of young scientists on sustainable, modern and safe transport, Procedia Engineering. 2017; 192: 857-862.
6. Boysen, N., Boywitz, D., Weidinger, F. Deep-lane storage of time-critical items: one-sided versus two-sided access // OR Spectrum. 2018; 40(4): 1141-1170.
7. Boywitz, D., Boysen, N. Robust storage assignment in stack- and queue-based storage

systems // *Computers & Operations Research*. 2018; 100: 189-200.

8. Accorsi, R., Baruffaldi, G., Manzini, R. Design and manage deep lane storage system layout. An iterative decision-support model // *Int J Adv Manuf Technol*. 2017; 92(1-4): 57-67.

9. Eo, J., Sonico, J., Su, A., Wang, W., Zhou, C., Zhu, Y., Wu, S., Chokshi, T. Structured comparison of pallet racks and gravity flow racks // *IIE Annual Conference and Expo*. 2015: 1971-1980.

10. Wu S., Wu Ya., Wang Ya. A structured comparison study on storage racks system // *Journal of Residuals Science & Technology*. 2016; 13(8).

11. Vujanac R., Miloradovic N., Vulovic S. Dynamic storage systems // *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara - International Journal of Engineering*. 2016; XIV: 79-82.

12. Носко А. Л., Сафронов Е. В. Методика расчета тормозного ролика центробежного типа применительно к гравитационным роликовым конвейерам для паллет // *Механизация строительства*. 2017. Том 78. № 6. С. 26–31.

13. Nosko, A.L., Tarasiuk, W., Sharifullin I.A., Safronov, E.V. Tribotechnical and Ecological Evaluation of Friction Pairs of Brake Devices in Lifting and Transport Machines // *Journal of Friction and Wear*. 2020; 41(4): 347 – 353.

14. Шарифуллин И.А., Носко А.Л., Сафронов Е.В. Математическая модель процесса движения паллеты по тормозному ролику магнитного типа // *Вестник СибАДИ*. 2020. Том 17. № 3. С. 364–373.

15. Озолин А.Ю., Скубов Д.Ю., Штукин Л.В. Способы торможения падающего лифта с помощью постоянных магнитов // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2008. № 6 (70). С. 82–86.

16. Лускань О.А. Определение скорости транспортирования штучных грузов на инерционном роликовом конвейере // *Изв. ТулГУ. Подъемно-транспортные машины и оборудование*. ТулГУ. 2003. № 4. С. 84–89.

17. E. Simeu, D. Georges. Modeling and control of an eddy current brake // *Control Engineering Practise*. 1996. Vol.4. No.1. Pp. 19-26.

18. Озолин А.Ю., Скубов Д.Ю., Штукин Л.В. Исследование вихретокового дискового тормоза // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2009. № 1 (74). С. 57–60.

19. Hollowell, Thomas Culver; Kahl, Justin Tyme; Stanczak, Matthew Don; Wang, Yizhou. Eddy Current Brake Design for Operation with Extreme Backdrivable Eddy Current Motor // *Mechanical Engineering Undergraduates*, 2010.

20. Andrew H. C. Gosline, Vincent Hayward. Eddy Current Brakes for Haptic Interfaces: Design, Identification, and Control // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2008. Vol.13. No.6. Pp. 669-677.

21. Sharifullin I., Nosko A., Safronov E., Kirillov D. Experimental study of eddy current braking applicable to gravity roller conveyor // *Fundamental and Applied*

Problems of Engineering and Technology. 2020; 342 (4-1): 106-116.

22. Sharifullin I., Safronov E., Nosko A., Potapov V. Device for resource testing of brake rollers of gravity conveyors. // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. 2018. Vol. 330. No. 4-2. Pp. 161-167.

23. L. Ghomri, Z. Sari. Mathematical modeling of the average retrieval time for flow-rack automated storage and retrieval systems // *J. Manuf. Syst*. 2017. Vol. 44. Pp. 165-178.

24. Safronov E., Nosko A. A Method to Determine Allowable Speed for a Unit Load in a Pallet Flow Rack // *Acta Mechanica et Automatica*. 2019. Vol. 13. No. 2. Pp. 80-85.

25. Thompson M.T. Permanent magnet electrodynamic brakes design principles and scaling laws // *Online Symposium for Electrical Engineers*. 2009.

26. Quan Zhou, Xuexun Guo, Gangfeng Tan, Xiaomeng Shen, Yifan Ye, Zhaohua Wang. Parameter Analysis on Torque Stabilization for the Eddy Current Brake: A Developed Model, Simulation, and Sensitive Analysis // *Mathematical Problems in Engineering*. 2015. 10 p.

REFERENCES

1. Boslovyak P. V., Lagerev A. V. Optimization of the conveyor transport cost // *IFAC-PapersOnLine*. 2019; 52 (25): 397-402.

2. Derhami, S., Smith, JS., Gue, KR. Optimising space utilisation in block stacking warehouses // *Int J Of Prod Res*. 2017; 55(21): 6436-6452.

3. Ghalekhondabi, I., Masel, DT. Storage allocation in a warehouse based on the forklifts fleet availability // *Journal of Algorithms & Computational Technology*. 2018; 12(2): 127-135.

4. Heragu, SS., Cai, X., Krishnamurthy, A., Malmberg, CJ. Analytical models for analysis of automated warehouse material handling systems // *Int J Of Prod Res*. 2011; 49(22): 6833-6861.

5. Sulirova, I., Zavodska, L., Rakyta, M., Pelantova, V. State-of-the-art approaches to material transportation, handling and warehousing // 12th International scientific conference of young scientists on sustainable, modern and safe transport, *Procedia Engineering*. 2017; 192: 857-862.

6. Boysen, N., Boywiz, D., Weidinger, F. Deep-lane storage of time-critical items: one-sided versus two-sided access // *OR Spectrum*. 2018; 40(4): 1141-1170.

7. Boywiz, D., Boysen, N. Robust storage assignment in stack- and queue-based storage systems // *Computers & Operations Research*. 2018; 100: 189-200.

8. Accorsi, R., Baruffaldi, G., Manzini, R. Design and manage deep lane storage system layout. An iterative decision-support model // *Int J Adv Manuf Technol*. 2017; 92(1-4): 57-67.

9. Eo, J., Sonico, J., Su, A., Wang, W., Zhou, C., Zhu, Y., Wu, S., Chokshi, T. Structured comparison of pallet racks and gravity flow racks // *IIE Annual Conference and Expo*. 2015: 1971-1980.

10. Wu S., Wu Ya., Wang Ya. A structured comparison study on storage racks system // *Journal of Residuals Science & Technology*. 2016; 13(8).
11. Vujanac R., Miloradovic N., Vulovic S. Dynamic storage systems // *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara - International Journal of Engineering*. 2016; XIV: 79-82.
12. Nosko A. L., Safronov E. V. Metodika rascheta tormoznogo rolika tsentrobezhnogo tipa primenitel'no k gravitatsionnym rolikovym konveyeram dlya pallet [Calculation method of the centrifugal type brake roller as applied to gravity roller conveyors for pallets]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. 2017; 78; 6: 26-31 (in Russian).
13. Nosko, A.L., Tarasiuk, W., Sharifullin I.A., Safronov, E.V. Tribotechnical and Ecological Evaluation of Friction Pairs of Brake Devices in Lifting and Transport Machines // *Journal of Friction and Wear*. 2020; 41 (4): 347 – 353.
14. Sharifullin I.A., Nosko A.L., Safronov E.V. Matematicheskaya model' processa dvizheniya pallety po tormoznomu roliku magnitnogo tipa [Mathematical model of the motion pallet process on brake magnetic type roller] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (3): 364-373. (in Russian)
15. Ozolin A.U., Skubov D.U., Shtukin L.V. Sposoby tormozheniya padayushchego lifta s pomoshch'yu postoyannykh magnetov [Methods of braking a falling elevator with the help of permanent magnets]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2008; 6 (70): 82-86 (in Russian).
16. Luskan' O.A. Opredeleniye skorosti transportirovaniya shtuchnykh грузов na inertsonnom rolikovom konveyer [Determining the speed of transportation of piece goods on an inertial roller conveyor]. *Izv. TulGU. Pod'yemno-transportnyye mashiny i oborudovaniye*. Tula: TulGU. 2003; 4: 84-89 (in Russian).
17. E. Simeu, D. Georges. Modeling and control of an eddy current brake // *Control Engineering Practise*. 1996; 4(1): 19-26.
18. Ozolin A.U., Skubov D.U., Shtukin L.V. Issledovaniye vikhretokovogo diskovogo tormoza [Research eddy current disc brake]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2009; 1 (74): 57-60 (in Russian).
19. Hollowell, Thomas Culver; Kahl, Justin Tyme; Stanczak, Matthew Don; Wang, Yizhou. Eddy Current Brake Design for Operation with Extreme Back-drivable Eddy Current Motor // *Mechanical Engineering Undergraduates*, 2010.
20. Andrew H. C. Gosline, Vincent Hayward. Eddy Current Brakes for Haptic Interfaces: Design, Identification, and Control // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2008; 13(6): 669-677.
21. Sharifullin I., Nosko A., Safronov E., Kirillov D. Experimental study of eddy current braking applicable to gravity roller conveyor // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. 2020; 342 (4-1): 106-116.
22. Sharifullin I., Safronov E., Nosko A., Potapov V. Device for resource testing of brake rollers of gravity conveyors. // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. 2018; 330 (4-2): 161-167.
23. L. Ghomri, Z. Sari. Mathematical modeling of the average retrieval time for flow-rack automated storage and retrieval systems // *J. Manuf. Syst.* 2017; 44:165-178.
24. Safronov E., Nosko A. A Method to Determine Allowable Speed for a Unit Load in a Pallet Flow Rack // *Acta Mechanica et Automatica*. 2019; 13(2): 80-85.
25. Thompson M.T. Permanent magnet electrodynamic brakes design principles and scaling laws // *Online Symposium for Electrical Engineers*. 2009.
26. Quan Zhou, Xuexun Guo, Gangfeng Tan, Xiaomeng Shen, Yifan Ye, Zhaohua Wang. Parameter Analysis on Torque Stabilization for the Eddy Current Brake: A Developed Model, Simulation, and Sensitive Analysis // *Mathematical Problems in Engineering*. 2015: 10.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Шарифуллин И.А. Участвовал в проведении экспериментальных исследований по определению скорости движения паллеты по ТМР, выполнении расчетов, анализе полученных результатов, формировании выводов, выполнил обзор литературных источников (60%).

Носко А.Л. Участвовал в формировании направления исследования, разработке плана проведения экспериментальных исследований, анализе полученных результатов (20%).

Сафронов Е.В. Участвовал в постановке задачи исследования, получении расчетных зависимостей, анализе полученных результатов, формировании выводов (20%).

AUTHORS 'CONTRIBUTION

Ildar A. Sharifullin – participation in experimental studies to determine the speed of pallet movement along the TMP, calculations, analysis of the results, performed a review of references (60%).

Andrei L. Nosko – participation in the formation of the direction of research, the development of a plan for conducting experimental research, the analysis of the results (20%).

Evgenii V. Safronov – participation in the formulation of the research problem, obtaining calculated dependencies, the analysis of the results and the formation of conclusions (20%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шарифуллин Ильдар Азатович – Scopus Author ID 57218668810, ORCID 0000-0002-1930-2602, аспирант кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, тел. (499) 263–65–92, e-mail: sharifullin@bmstu.ru).

Носко Андрей Леонидович – д-р техн. наук, доц., Scopus Author ID 6507019256, ORCID 0000-0003-

1382-4095, проф. кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, тел. (499) 263-65-92, e-mail: nosko@bmstu.ru).

Сафронов Евгений Викторович – канд. техн. наук, Scopus Author ID 36943598600, ORCID 0000-0002-4250-7147, доц. кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, тел. (499) 263-65-92, e-mail: safronov@bmstu.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ildar A. Sharifullin – Scopus Author ID 57218668810, ORCID 0000-0002-1930-2602, Postgraduate of the Lifting and Transport Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow,

2 Baumanskaia Street, 5, building 1, ph. (499) 263-65-92, e-mail: sharifullin@bmstu.ru).

Andrei L. Nosko – Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Scopus Author ID 6507019256, ORCID 0000-0003-1382-4095, Professor of the Lifting and Transport Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, 2 Baumanskaia Street, 5, building 1, ph. (499) 263-65-92, e-mail: nosko@bmstu.ru).

Evgenii V. Safronov – Cand. of Sci. (Engineering), Scopus Author ID 36943598600, ORCID 0000-0002-4250-7147, Associate Professor of the Lifting and Transport Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, 2 Baumanskaia Street, 5, building 1, ph. (499) 263-65-92, e-mail: safronov@bmstu.ru).

УДК. 624.139

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-160-167>

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИНТОВОГО БУРА НА МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

И.Г. Мартюченко, М.И. Зенин

ФГБОУ ВО «СГТУ имени Ю.А. Гагарина»

г. Саратов, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Бурение мерзлых и вечномёрзлых грунтов является одним из сложных и энергоемких процессов производства земляных работ. Буровые инструменты, используемые на мерзлых грунтах, реализуют процесс бурения грунта деформацией резания или дробящего действия. Существующие буровые инструменты недостаточно эффективны в использовании, т.к. реализуют энергоемкие процессы бурения и не всегда пригодны для различных типов грунтов. Рассматривается винтовой бур, который реализует процесс разрушения грунта деформацией сдвига и скола, что является менее энергоемким.

Материалы и методы. На основе теоретических исследований взаимодействия трех типов буровых инструментов с мерзлым грунтом был проведен сравнительный анализ для определения эффективности использования винтового бура. Сравнивали технические показатели процесса бурения. Приведена методика определения эффективности использования винтового бура на базе анализа специальных целевых функций.

Результаты. Получены результаты сравнительного анализа буровых инструментов. В зависимости от характера деформации грунта определена эффективность одного бурового инструмента над другим. В результате сравнительного анализа скорости бурения и энергоёмкости процесса бурения была установлена эффективность винтового бура.

Заключение. В ходе проведенного сравнительного анализа установлена эффективность винтового бура, реализующего деформацию сдвига и отрыва грунта, обосновывающая целесообразность проведения дальнейших исследований.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: винтовой бур, мерзлый грунт, бурение мерзлого грунта, винтовая лопасть, откол грунта, внедрение лопасти, разрушающая часть, буровой инструмент.

Поступила 05.02.21, принята к публикации 28.04.21.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Мартюченко И.Г. Сравнительный анализ эффективности использования винтового бура на мерзлых грунтах / И.Г. Мартюченко, М.И. Зенин. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-160-167> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 2(77). – С. 160-167.

© Мартюченко И.Г., Зенин М.И., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-160-167>

COMPARATIVE ANALYSIS OF EFFICIENCY OF USE A SCREW DRILL ON FROZEN SOIL

Igor G. Martiuchenko, Maksim I. Zenin
Y.A. Gagarin Saratov State Technical University
Saratov, Russia

ABSTRACT

Introduction. Drilling of frozen and permafrost soils is one of the complex and energy-intensive processes of earthworks. Drilling tools used on frozen soils implement the process of drilling the soil by deformation of cutting or crushing action. Current drilling tools are not efficient enough to use because they implement energy-intensive drilling processes and are not always suitable for various types of soils. A screw drill is considered, which implements the process of soil destruction by shear and shear deformation, which is less energy intensive.

Materials and methods. On the basis of theoretical studies of the interaction of 3 types of drilling tools with frozen soil, a comparative analysis was carried out to determine the efficiency of a screw drill use. The technical and economic indicators of the drilling process were compared. A method for determining the efficiency of the use a screw drill based on the analysis of special target functions is presented.

Results. The results of a comparative analysis of drilling tools have been obtained. Depending on the nature of soil deformation, the effectiveness of one drilling tool over another is determined. As a result of a comparative analysis of the drilling speed and the energy intensity of the drilling process, the efficiency of the screw drill was established.

Discussions and conclusion. In the course of the comparative analysis, the efficiency of the screw drill was determined, which implements shear deformation and soil separation, justifying the feasibility of further research.

KEYWORDS: screw drill, frozen soil, frozen soil drilling, screw blade, ground break, blade insertion, breaking part, drilling tool.

Submitted 05.02.21, revised 28.04.21.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Martiuchenko I.G., Zenin M.I. Comparative analysis of efficiency of use a screw drill on frozen soil. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18(2): 160-167. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-160-167>

© Martiuchenko I.G., Zenin M.I., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Более 25% всей поверхности земли занимает территория вечномёрзлых грунтов и 55% территории сезонного промерзания грунтов от районов Восточной Сибири, Северной Канады, Аляски, Гренландии до Арктики и Антарктиды. В связи с активным освоением этих территорий, в том числе добычей полезных ископаемых, возникают трудности при бурении грунтов, что обуславливается постоянным созданием новых или совершенствования существующих буровых инструментов [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Причиной этого является достаточно сложная структура мерзлых грунтов, которые характеризуются высокими прочностными свойствами [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

В настоящее время для бурения мерзлых грунтов используются различные типы буров, осуществляющих различные виды деформации. По характеру разрушения мерзлого грунта буровые долота разделяют на режущего, дробящего и режуще-дробящего действий. Каждый тип бурового инструмента имеет свои преимущества на определённых типах грунтов. Таким образом, выделяют лопастные, шарошечные и комбинированные буровые инструменты, которые наиболее часто используются при бурении скважин.

Исследованию и развитию буровых инструментов, которые осуществляют разрушение грунта деформацией резания и истиранием, посвящены работы как отечественных ученых В.Г. Бугаева, Н.Г. Тимофеева, Р.М. Скрыбина, Б.В. Яковлева, С.А. Линькова, С.П. Ереско, Ю.П. Никифорова, В.Д. Рубцова [16, 17], так и зарубежных Li H., Liu S., De Moura J [18, 19].

Реализуемый характер деформации грунта при бурении широко используемыми типами инструментов является энергоёмким. Следует отметить повышенный износ бурового инструмента, что делает скважину с уменьшенным размером [16, 17].

К числу бурового инструмента, реализующего менее энергоёмкий процесс разрушения грунта, относятся долота шарошечного типа. Исследованиям шарошечных долот посвящены работы отечественных ученых В.Д. Буткина, А.В. Гилева, Р.М. Богомолова, В.А. Пяльниченкова, В.В. Долгушина, А.Ф. Брагина, В.Н. Виноградова, Д.Ю. Серикова, В.А. Ясашина [20, 21, 22, 23] и зарубежных авторов Darwesh A. K., Rasmussen T.M., Zhang, Jie [24, 25, 26].

При взаимодействии рабочих элементов долота с грунтом происходит вдавливание и перекачивание шарошек, осуществляется процесс деформации, соответствующий сжа-

тию, такой характер разрушения грунта менее энергоёмкий по сравнению с характером разрушения грунта, реализуемым долотами режущего типа [21, 22, 23].

К недостаткам процесса бурения, реализуемого долотами шарошечного типа, можно отнести возможность работы шарошечных долот только на мерзлых грунтах, подверженных хрупкому разрушению. На грунтах с пластичными свойствами процесс бурения неэффективен из-за того, что пластичные грунты не поддаются разрушению дроблением. Недостатком долот является также сложность конструкций и применение дорогостоящих высококачественных сталей и твердых сплавов, и, как следствие, низкая ремонтпригодность и высокая стоимость. При перекачивании с зуба на зуб шарошки возникает ударное напряжение, которое приводит к уменьшению срока службы подшипников и, соответственно, выходу из строя рабочего инструмента.

С целью реализации менее энергоёмкого способа разрушения грунта предложена конструкция винтового бура. В процессе бурения винтовым буром происходит деформация сдвига и отрыва грунта, что является новым способом разрушения грунта. Такой способ деформации мерзлого грунта является менее энергоёмким и более эффективным для процесса бурения и перспективным для дальнейших исследований [27].

Предлагаемый винтовой бур состоит из заходной и разрушающей частей. Заходная часть бура создает тяговое усилие, необходимое для работы бурового инструмента без задавливающей нагрузки, и состоит из конического сердечника с размещенной на нем винтовой лопастью переменного радиуса и постоянного шага. Разрушающая часть содержит винтовую лопасть с переменными геометрическими параметрами, которая и выполняет процесс разрушения мерзлого грунта посредством внедрения винтовой лопасти в породу и последующий ее отрыв [28].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На основе теоретических исследований взаимодействия лопастного и шарошечного долот с мерзлым грунтом [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22] и полученных теоретических исследований взаимодействия винтового бура с мерзлым грунтом был проведен сравнительный анализ для определения эффективности винтового бура по алгоритму (рисунок 1). Первым этапом происходило определение оценки эффективности бурения по способу реа-

лизации физического процесса разрушения грунта. Далее производилось определение коэффициента эффективности скорости бурения винтового бура относительно лопастного долота и следом определение коэффициента эффективности скорости бурения винтового бура относительно шарошечного долота. По-

следним этапом производилось определение коэффициента эффективности энергоемкости процесса бурения винтовым буром относительно лопастного долота и, соответственно, определение коэффициента эффективности энергоемкости процесса бурения винтовым буром относительно шарошечного долота.

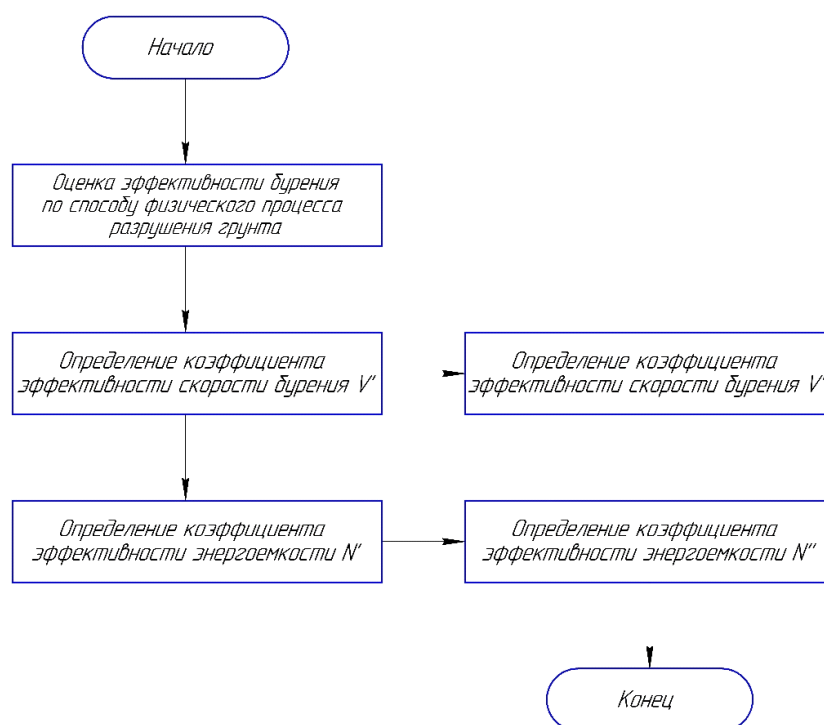


Рисунок 1 – Алгоритм сравнительного анализа для определения эффективности винтового бура

Figure 1 – Comparative analysis algorithm for determining the efficiency of a screw drill

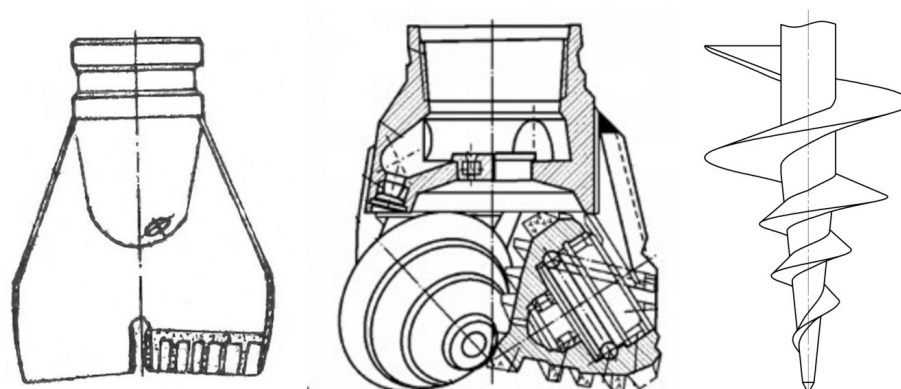


Рисунок 2 – Исследуемые буровые инструменты: лопастное долото, шарошечное долото и винтовой бур

Figure 2 – Drilling tools under study: a blade bit, a ball bit and a screw drill

Таблица 1
Относительные соотношения удельного сопротивления мерзлого грунта различным видам деформации

Table 1
Relative ratios of the specific resistance of frozen soil to various types of deformation

Характер деформации	Разрыв	Сжатие	Сдвиг	Изгиб	Резание	Вдавливание
Среднее значение относительного показателя	1	3	1,7	2	7	21

Для определения эффективности использования винтового бура на мерзлых грунтах сравнительный анализ проводился для трех типов буровых инструментов, таких как винтовой бур, лопастное долото, шарошечное долото (рисунок 2).

Исследовались такие параметры, как скорость бурения и энергоемкость при работе данных типов буровых инструментов при диаметре 150 мм. Оценка эффективности бурового инструмента производилась также по видам реализуемых деформаций с учетом относительных соотношений удельного сопротивления мерзлого грунта различным видам деформации (таблица 1).

В соответствии с рекомендациями В. И. Баловнева [29] эффективность использования бурового инструмента была оценена на базе анализа специальных целевых функций, которые представляются в виде отношения разности величин и определяются по следующей зависимости:

$$K_3 = 1 - \frac{\Phi_1}{\Phi_2}, \quad (1)$$

где Φ_1 — функция, определяющая величину, которая характеризует протекание соответствующего процесса для традиционного бурового инструмента;

Φ_2 — функция, определяющая величину, которая характеризует протекание соответствующего процесса для винтового бурового инструмента.

Выражения для определения коэффициента эффективности использования винтового бура имеют следующий вид:

Для скорости бурения

$$V = 1 - \frac{V_1}{V_2}, \quad (2)$$

где V_1 — скорость бурения мерзлого грунта существующим видом бурового инструмента;

V_2 — скорость бурения мерзлого грунта предлагаемого вида бурового инструмента.

Для энергоемкости

$$N_{y3} = 1 - \frac{N_2}{N_1}, \quad (3)$$

где N_1 — энергоемкость бурения мерзлого грунта, которая достигается существующим видом бурового инструмента;

N_2 — энергоемкость бурения мерзлого грунта, которая достигается винтовым буром.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе сравнительного анализа было установлено, что самый энергозатратный процесс бурения наблюдается при работе лопастным долотом со сплошной кромкой, что обуславливается характером разрушения мерзлого грунта. Такой характер разрушения грунта соответствует деформации резания. Усилия, затрачиваемые на процесс резания грунта, соответствуют значению 7 по критерию относительного показателя для мерзлого грунта (см. таблицу 1). Кроме того, деформация резания породы сопровождается высоким сопротивлением вдавливания породоразрушающих элементов долота в мерзлый грунт, что приводит к большим значениям осевых нагрузок. Также снижается толщина срезаемой стружки грунта, равная глубине внедрения лопасти в грунт, что, соответственно, снижает скорость бурения грунта.

Рабочий процесс, осуществляемый долотами со ступенчатыми лезвиями, является менее энергоемким по сравнению с процессом бурения, реализуемого лопастными долотами со сплошной кромкой на 25–30%. Снижение энергоемкости объясняется иным характером взаимодействия рабочих элементов с грунтом, при котором реализуются деформации резания и скалывания. Последовательное расположение резцов долота позволяет снизить сопротивление вдавливания породоразрушающих элементов в грунт, что приводит к увеличению срезаемой толщины мерзлого грунта и, соответственно, к увеличению скорости бурения до 10%.

Таблица 2
Оценка эффективности использования винтового бура

Table 2
Evaluation of the efficiency of the use a screw drill

Показатель	Тип бурового инструмента		
	Лопастное долото	Винтовой бур	Шарошечное долото
Скорость бурения, м/ч	36	95	55
Коэффициент эффективности			
Энергоемкость бурения, кВт*ч/м	54.2	20	37.5
Коэффициент эффективности	0.63		
		0.47	

Процесс бурения, производимый шарошечными долотами на мерзлых грунтах, на 45–50% менее энергозатратный в сравнении с энергозатратами бурения, реализуемого лопастными долотами. Разрушение грунта породоразрушающими элементами шарошечного долота происходит под действием деформации сжатия, ведущей к дроблению породы. Также за счет разрушения дроблением повышается скорость прохождения скважины на 20–30% по сравнению со скоростью, осуществляемой лопастными долотами.

Самая низкая энергоемкость процесса бурения была получена при работе винтового бура. Установлено, что значение энергоемкости, затрачиваемой при работе винтовым буром, меньше до 20–30%, чем при работе шарошечным, и до 65–70% ниже, чем при работе лопастным долотом. Это обуславливается тем, что разрушение грунта осуществляется деформацией сдвига и отрыва породы (см. таблицу 1).

Результаты оценки эффективности использования винтового бура относительно лопастного и шарошечного долот представлены в таблице 2.

В результате оценки эффективности использования винтового бура была подтверждена перспективность направления развития конструкций винтовых буров. Было установлено, что возможно получить увеличение скорости бурения и снижение энергоемкости процесса бурения за счет реализации характера разрушения грунта деформацией сдвига отрыва.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматриваемый винтовой бур осуществляет процесс бурения за счет деформаций отрыва и сдвига грунта. Проведенный сравнительный анализ подтвердил перспективность совершенствования винтового бурового инструмента и целесообразность проведения

дальнейших исследований, направленных на определение рациональных геометрических параметров бура и режимов рабочего процесса бурения, реализующих наибольшую эффективность бурения скважин в мерзлых грунтах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lev V. E., Lev V. E., Izzy M. K. Well drilling in permafrost regions: dynamics of the thawed zone. *Polar Research*. 2019. vol. 38.
2. Shan W. et al. Resistivity Model of Frozen Soil and HighDensity Resistivity Method for Exploration *Discontinuous Permafrost. Electrical Resistivity and Conductivity*. 2017. pp. 23-52.
3. Cao P. et al. Experimental study of the drilling process in debris-rich ice. *Cold Regions Science and Technology*. 2015. vol. 120. pp. 138-144.
4. Zubrzycki S. Drilling frozen soils in Siberia. *Polarforschung*. 2012; 81(2): 151-153.
5. Arenson L. U., Springman S. M. Mathematical descriptions for the behaviour of ice-rich frozen soils at temperatures close to 0 C // *Canadian Geotechnical Journal*. – 2005; 42(2): 431-442.
6. Герасимов Д. С. [и др.]. О влиянии режима нагружения на механические свойства мерзлых грунтов // *Наземные транспортно-технологические комплексы и средства*. 2016. С. 73–77.
7. Yang Z. J., Still B., Ge X. Mechanical properties of seasonally frozen and permafrost soils at high strain rate. *Cold regions science and technology*. 2015, vol. 113, pp. 12-19.
8. Aksenov, V.I., Kal'bergenov, R.G. & Leonov, A.R. Strength Characteristics of Frozen Saline Soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2003, 40:55–59
9. Yang Y., Lai Y., Chang X. Laboratory and theoretical investigations on the deformation and strength behaviors of artificial frozen soil // *Cold regions science and technology*. – 2010; 64(1): 39-45.
10. Zhou G. et al. Laboratory investigation on tensile strength characteristics of warm frozen soils // *Cold Regions Science and Technology*. – 2015. – Т. 113. – pp. 81-90.
11. Тимофеев Н.Г., Жирков А.Н. Концепция разработки инновационного породоразрушающего инструмента для бурения скважин в условиях криолитозоны // *Евразийский союз ученых*. 2015. №4. С. 151–154.

12. Talalay P. G. Introduction to Ice Drilling Technology. *Mechanical Ice Drilling Technology*. Springer, Singapore, 2016. pp. 1-8.
13. Ивкин В.С., Алашеев М.О. Влияние физико-механических свойств грунтов на работу машин для земляных работ // Вестник УлГТУ. 2015. №3. С. 62–67.
14. Ивкин В. С., Вунберова Н. П. Малообъемные, рассредоточенные зимние земляные работы в стеснённых условиях строительства // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2018. №. 2. С. 52–55.
15. Валигура Н. С. Способы бурения неглубоких скважин // Разведка и охрана недр. 2014. №. 2. С. 27–30.
16. Тимофеев Н. Г., Скрыбин Р. М., Яковлев Б. В. Повышение эффективности работы породоразрушающего инструмента при бурении скважин в многолетнемерзлых породах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. №. 6. С. 105–113.
17. Скрыбин Р. М., Леонтьев С. Н., Тимофеев Н. Г. Бурение скважин большого диаметра пневмоударным кластером в породах высокой категории буримости // Геология и минерально-сырьевые ресурсы северо-востока России. 2017. С. 570–574.
18. Li H., Liu S., Chang H. Experimental research on the influence of working parameters on the drilling efficiency. *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2020. – Т. 95. – pp. 103-174. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103174>
19. De Moura J. et al. Widening Drilling Operation: Performance Analysis on the Application of Fixed Cutter Drill Bits in Hard Rock Formation // International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. – American Society of Mechanical Engineers, 2020. – Т. 84430. – С. V011T11A078. <https://doi.org/10.1115/OMAE2020-18836>
20. Бугаев В. Г., Ереско С. П., Бугаев И. В. Выбор рационального угла резания мерзлых грунтов при бурении строительных скважин // Строительные и дорожные машины. 2018. №. 2. С. 30–36.
21. Богомолов Р. М. [и др]. Бурение дополнительных боковых стволов долотами PDC // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2018. №. 2. С. 17–20.
22. Панин Н. М., Богомолов Р. М. Совершенствование промывки шарошечных буровых долот // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2020. №. 9. С. 11–14.
23. Сериков Д. Ю. Анализ конструкций и технологий изготовления твердосплавного вооружения шарошечных буровых долот // Сфера. Нефть и Газ. 2017. №. 1. С. 30–35.
24. Darwesh A.K., Rasmussen T.M., Al-Ansari N. Controllable drilling parameter optimization for roller cone and polycrystalline diamond bits. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2020. – Т. 10. – №. 4. – pp. 1657-1674. <https://doi.org/10.1007/s13202-019-00823-1>
25. Spurin, Jurij, et al. "The characterization of wear in roller cone drill bit by rock material–Sandstone." *Journal of Petroleum Science and Engineering* – 2019. – Т. 173. – pp. 1355-1367. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.10.090>
26. Zhang, Jie, and Yang Hu. "Mechanical behavior and sealing performance of metal sealing system in roller cone bits." *Journal of Mechanical Science and Technology* – 2019. – Т. 33. – №. 6. – pp. 2855-2862. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0533-5>
27. Мартюченко И.Г., Зенин М.И. Перспективы развития бурового инструмента для вечномёрзлых грунтов // Строительные и дорожные машины. 2019. №9. С.47–48.
28. Мартюченко И.Г., Зенин М.И. Взаимодействие винтовой лопасти бурового инструмента с мерзлым грунтом. Вестник СибАДИ. 2020;17(2):162-171. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-162-171>
29. Баловнев В. И. [и др.]. Определение оптимальных параметров транспортно-технологических машин методами теории подобных преобразований // Строительные и дорожные машины. 2019. №. 12. С. 3–11.

REFERENCES:

1. Lev V. E., Lev V. E., Izzy M. K. Well drilling in permafrost regions: dynamics of the thawed zone. *Polar Research*. 2019, 38: 1-9.
2. Shan W. et al. Resistivity Model of Frozen Soil and High-Density Resistivity Method for Exploration Discontinuous Permafrost. *Electrical Resistivity and Conductivity*. 2017: 23-52.
3. Cao P. et al. Experimental study of the drilling process in debris-rich ice. *Cold Regions Science and Technology*. 2015, 120: 138-144.
4. Zubrzycki S. Drilling frozen soils in Siberia. *Polarforschung*. 2012, vol. 81, no. 2, pp. 151-153.
5. Arenson L. U., Springman S. M. Mathematical descriptions for the behaviour of ice-rich frozen soils at temperatures close to 0 C. *Canadian Geotechnical Journal*. 2005, 42(2): 431-442.
6. Gerasimov D. S. On the influence of the loading regime on the mechanical properties of frozen soils. *Land transport and technological complexes and facilities*. 2016: 73-77.
7. Yang Z. J., Still B., Ge X. Mechanical properties of seasonally frozen and permafrost soils at high strain rate. *Cold regions science and technology*. 2015, 113: 12-19.
8. Aksenov, V.I., Kal'bergenov, R.G. & Leonov, A.R. Strength Characteristics of Frozen Saline Soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2003, 40: 55–59 (In Russian)
9. Yang Y., Lai Y., Chang X. Laboratory and theoretical investigations on the deformation and strength behaviors of artificial frozen soil. *Cold regions science and technology*. 2010, vol. 64, no. 1, pp. 39-45.
10. Zhou G. et al. Laboratory investigation on tensile strength characteristics of warm frozen soils. *Cold regions science and technology*. 2015, 113: 81-90.
11. Timofeev N.G., Zhirkov A.N. Konceptcija razrabotki innovacionnogo porodorazrushajushhego instrumenta dlja burenija skvazhin v uslovijah kriolitozony [The concept of developing an innovative rock cutting tool for drilling in cryolithozone conditions]. *Eurasian Union of Scientists*. 2015, 4: 151-154.
12. Talalay P. G. Introduction to Ice Drilling Technology. *Mechanical Ice Drilling Technology*. Springer, Singapore, 2016, pp. 1-8.
13. Ivkin V.S., Alasheev M.O. Vlijanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv gruntov na rabotu mashin dlja zemljanyh rabot [The influence of physical and mechanical proper-

ties of soils on the work of machines for earthworks]. *Bulletin of USTU*. 2015, no. 3, pp. 62-67. (In Russian)

14. Ivkin V.S., Vunberova N.P. Maloobzornnye, rassredotochennye zimnie zemljanye raboty v stesnykh usloviyakh stroitel'stva [Small, dispersed winter earthworks in cramped construction conditions]. *Vestnik of the Ulyanovsk State Technical University*. 2018, 2: 52-55. (In Russian)

15. Valigura N. S. Sposoby burenija neglubokih skvazhin [Methods of drilling shallow wells]. *Exploration and protection of the subsoil*. 2014, 2: 27-30. (In Russian)

16. Timofeev NG, Skryabin RM, Yakovlev BV Povyshenie jeffektivnosti raboty porodorazrushajushhego instrumenta pri burenii skvazhin v mnogoletnemerzlykh porodah [Improving the efficiency of rock-cutting tools when drilling wells in permafrost]. *Physical and technical problems of mining*. - 2017. 6: 105-113. (In Russian)

17. Scriabin RM, Leontiev SN, Timofeev NG Burenie skvazhin bol'shogo diametra pnevmoudarnym klasterom v porodah vysokoj kategorii burimosti [Drilling of large-diameter wells with a pneumatic impact cluster in rocks of a high drillability category]. *Geology and mineral resources of the North-East of Russia*. 2017: 570-574. (In Russian)

18. Li H., Liu S., Chang H. Experimental research on the influence of working parameters on the drilling efficiency. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020. 95: 103-174. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103174>

19. De Moura J. et al. Widening Drilling Operation: Performance Analysis on the Application of Fixed Cutter Drill Bits in Hard Rock Formation //International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. – *American Society of Mechanical Engineers*, 2020. 84430: V011T11A078. <https://doi.org/10.1115/OMAE2020-18836>

20. Bugaev VG, Eresko SP, Bugaev IV Vybor racional'nogo ugla rezanija merzlykh gruntov pri burenii stroitel'nykh skvazhin [Choice of a rational angle of cutting frozen soils when drilling construction wells]. *Stroitelnye i dorozhnye mashiny*. 2018. 2: 30-36. (In Russian)

21. Bogomolov RM et al. Burenie dopolnitel'nykh bokovykh stvolov dolotami PDC [Drilling additional side-tracks with PDC bits]. *Equipment and technologies for the oil and gas industry*. 2018 2: 17-20. (In Russian)

22. Panin N.M., Bogomolov R.M. Sovershenstvovanie promyvki sharoshechnykh burovnykh dolot [Improvement of flushing of roller cone drill bits]. *Construction of oil and gas wells on land and at sea*. 2020. 9: 11-14. (In Russian)

23. Serikov D. Yu. Analiz konstrukcij i tehnologij izgotovlenija tverdosplavnogo vooruzhenija sharoshechnykh burovnykh dolot [Analysis of structures and manufacturing technologies of carbide weapons for roller-cutter drill bits]. *Sfera. Oil and gas*. 2017. 1: 30-35. (In Russian)

24. Darwesh A.K., Rasmussen T.M., Al-Ansari N. Controllable drilling parameter optimization for roller cone and polycrystalline diamond bits. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2020. 10. (4): 1657-1674. <https://doi.org/10.1007/s13202-019-00823-1>

25. Spurin, Jurij, et al. "The characterization of wear in roller cone drill bit by rock material–Sandstone." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 2019. 173: 1355-1367. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.10.090>

26. Zhang, Jie, and Yang Hu. "Mechanical behavior and sealing performance of metal sealing system in roller cone bits." *Journal of Mechanical Science and Tech-*

nology 2019. 33(6): 2855-2862. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0533-5>

27. Martyuchenko I.G., Zenin M.I. Perspektivy razvitiya burovogo instrumenta dlja vechnomerzlykh gruntov [Prospects for the development of drilling tools for permafrost]. *Construction and road machines*. 2019. 9: 47-48. (In Russian)

28. Martyuchenko I.G., Zenin M.I. Vzaimodejstvie vintovoj lopasti burovogo instrumenta s merzlym gruntom [Interaction of a screw blade of a drilling tool with frozen soil. Scientific peer-reviewed] *The Russian Automobile and Highway Industry Journal* 2020; 17 (2): 162-171. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-162-171> (In Russian)

29. Balovnev VI et al. Opredelenie optimal'nykh parametrov transportno-tehnologicheskikh mashin metodami teorii podobnykh preobrazovanij [Determination of the optimal parameters of transport and technological machines by methods of the theory of similar transformations]. *Construction and road machines*. 2019; 12: 3-11. (In Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Мартюченко И.Г. Формулирование проблемы исследований, постановка задач исследования, обозначение алгоритма сравнительного анализа (50%).

Зенин М.И. Проведение сравнительного анализа буровых инструментов, анализ полученных результатов, выполнение обзора литературных источников (50%).

AUTHORS' CONTRIBUTION

Igor G. Martiuchenko – research problem statement, research tasks statement, comparative analysis algorithm determination (50%).

Maksim I. Zenin – conducting a comparative analysis of drilling tools, analyzing the results obtained, bibliography review (50%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мартюченко Игорь Гаврилович – д-р техн. наук, проф., ORCID: 0000-0001-7067-6530 проф. кафедры «Транспортное строительство» ФГБОУ ВО «СГТУ имени Гагарина» (410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, e-mail: rosdortex_sstu@rambler.ru).

Зенин Максим Иванович – ассистент кафедры «Транспортное строительство» ФГБОУ ВО «СГТУ имени Гагарина» ORCID: 0000-0001-5296-6841 (410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, e-mail: zenin-1995@mail.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor G. Martyuchenko – Dr. of Sci., Professor, ORCID: 0000-0001-7067-6530, the Professor of the Transport Construction Department, Y.A.Gagarin Saratov State Technical University (410054, Saratov, Politechnicheskaya Street, 77 e-mail: rosdortex_sstu@rambler.ru)

Maksim I. Zenin – ORCID: 0000-0001-7067-6530, Assistant of the Transport Construction Department, Y.A.Gagarin Saratov State Technical University (410054, Saratov, Politechnicheskaya Street, 77 e-mail: zenin-1995@mail.ru).

УДК 629.488.2

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-168-179>

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ КАТАНИЯ КОЛЕСНЫХ ПАР ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВАГОНОВ

¹ В.В. Савинкин, ¹ И.В. Шагаев, ² С.В. Савинкин, ³ В.Н. Кузнецова, ⁴ А.В. Санду¹ НАО «Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева»,
г. Петропавловск, Казахстан² ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС)»,
г. Омск, Россия³ ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»,
г. Омск, Россия⁴ «Технический университет Георге Асачи в Яссах»,
г. Яссы, Румыния

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема дефицита энергоэффективных технологий восстановления ставит первоочередной задачей разработку нового технологического оборудования для восстановления поверхностей катания железнодорожных колес с применением высококонцентрированных источников энергии. В настоящее время в практике ремонтного ДПО выбраковываемые безбондажные колеса все чаще заменяются новыми, но их ресурсный потенциал высок при эксплуатации. Такой подход технически и экономически не целесообразен.

Материалы и методы. В данной статье приведены результаты прочностного расчета основных моментов сил и динамических нагрузок, приходящихся на колесную пару. Сформулирована проблема эксплуатации ремонтного оборудования, связанная с отсутствием самостоятельных мобильных комплексов, обеспечивающих оперативное прибытие на место работ и высокое качество восстановления проектной геометрии поверхности катания колеса.

Результаты. Для решения данной проблемы был спроектирован и разработан мобильный комплекс, который позволяет восстанавливать проектную геометрию и обеспечивает высокие физико-механические свойства поверхности катания с оптимальными напряжениями в фазовой структуре основы колеса.

Обсуждение и заключение. Результаты проведенных исследований рекомендуется использовать для проектирования, создания и производства высокотехнологичного ремонтного оборудования.

КЛЮЧЕВЫЕ слова: мобильный комплекс, поверхность катания, восстановление, эффективность, железнодорожная колесная пара.

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы благодарят за работу редакцию научного рецензируемого журнала «Вестник СибАДИ», а также рецензентов статьи.

Поступила 09.04.21, принята к публикации 28.02.21.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Разработка технологического оборудования для восстановления поверхностей катания колесных пар железнодорожных вагонов / В.В. Савинкин, И.В. Шагаев, С.В. Савинкин, В.Н. Кузнецова, А.В. Санду. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-168-179> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 2(78). – С. 168-179.

© Савинкин В.В., Шагаев И.В., Савинкин С.В., Кузнецова В.Н., Санду А.В., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-168-179>

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR RESTORATION OF ROLLED WHEELED PAIRS OF RAILWAY WAGONS

¹ Vitalii V. Savinkin, ¹ Ivan V. Shagaev, ² Sergei V. Savinkin,

³ Viktoria N. Kuznetsova, ⁴ Andrei V. Sandu

¹M. Kozybaiev North Kazakhstan University, Kazakhstan, Petropavlovsk,

²Omsk State University of Railways and Communications, Russia, Omsk,

³Siberian State Automobile and Highway University, Russia, Omsk,

⁴Gheorghe Asachi Technical University in Iasi, Romania, Iasi

ABSTRACT

Introduction. The problem of the shortage of energy-efficient restoration technologies makes it a priority to develop new technological equipment for the restoration of the rolling surfaces of railway wheels using highly concentrated energy sources. Currently, in the practice of repair DPO, discarded non-bonded wheels are increasingly replaced with new ones, but their resource potential is high during the operation. This approach is not technically and economically feasible.

Materials and methods. This article presents the results of the strength calculation of the main moments of forces and dynamic loads per wheel pair. The problem of repair equipment related to the lack of the independent mobile complexes that ensure prompt arrival at the work site and high quality restoration of the design geometry of the wheel surface is formulated.

Results. To solve this problem, a mobile complex was designed and developed, which allows to restore the design geometry and modify the high physical and mechanical properties of the riding surface with optimal stresses in the phase structure of the wheel base.

Discussion and conclusion. It is recommended to use the results of the research carried out for the design, creation and production of high-tech repair equipment.

KEYWORDS: mobile complex, rolling surface, recovery, efficiency, railway wheel set.

Submitted 09.04.21 , revised 28.04.21

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Savinkin V.V., Shagaev I.V., Savinkin S.V., Kuznetsova V.N., Andrei V. Sandu. Development of technological equipment for restoration of rolled wheeled pairs of railway wagons. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18(2): 168-179. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-168-179>

© Savinkin V.V., Shagaev I.V., Savinkin S.V., Kuznetsova V.N., Sandu A.V., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Железнодорожный транспорт является основным для большого количества основных и смежных отраслей народного хозяйства, обеспечивая их эффективное функционирование и развитие. Роль железнодорожного транспорта трудно переоценить для строительного и машиностроительного производства с точки зрения обеспечения доставки строительных материалов, сырья, оборудования, инструментов, топлива.

Основной проблемой при эксплуатации железнодорожного транспорта является интенсивное изнашивание рельсов и поверхностей катания колесных пар. Причем такой вид изнашивания имеет место быть не только на горных перевальных участках железных дорог с подъемами и спусками, но и на железных дорогах, проложенных на равнинных участках местности [1, 2, 3, 4]. Основными причинами возникновения износа колесных пар и рельсов являются перегрузка и неравномерная нагрузка вагонов; ударные нагрузки; нарушение рессорного подвешивания; нарушение технологии формирования колесных пар; статическая развеска колесных пар; естественный износ при взаимодействии колесных пар и рельсового пути [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

В мировой практике изношенные колесные пары выбраковываются и заменяются на новые, что экономически нецелесообразно [14, 15, 16, 17, 18]. Поэтому возникает необходимость в разработке и создании технологического оборудования для ремонта беговых дорожек колесных пар, способного оперативно и своевременно решить задачу восстановления их исправного и работоспособного состояния. Это позволит существенно снизить негативные последствия поломок и отказов колесных пар и повысить безопасность движения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На основе проведенного анализа доступного оборудования для восстановления поверхностей катания железнодорожного колеса было установлено, что в большинстве случаев оно стационарное и требует доставки колесной пары (с выкаткой из под вагона) или вагона на специально оборудованные площадки [19, 20]. Патентный поиск показал, что мобильных ремонтных комплексов, обеспечивающих

оперативное прибытие на место работ и высокое качество восстановления проектной геометрии гребня практически не существует, а имеющиеся аналоги крайне ограничены в функциональных возможностях.

Поверхность катания колеса вагона, контактирующая с рельсовым покрытием малой поверхностью (около 2,5 см²) испытывает постоянные и переменные статические и динамические нагрузки [20, 21, 22]. Основные силы и нагрузки, приходящиеся на колесную пару, могут быть определены по следующей методике¹. Расчетные схемы для определения основных параметров динамики изнашивания колеса приведены ниже на рисунках 1–8.

При расчете вертикальной статической нагрузки груженного вагона (брутто) необходимо учитывать коэффициент использования его грузоподъемности. Нагрузка, действующая на шейку оси вагона, вычисляется из зависимости

$$P_{\text{ст}} = \frac{1+\lambda}{2} \cdot \frac{m_{\text{бр}} - m_0 \cdot m_{\text{кп}} + 2m_0 \cdot m_{\text{кч}}}{2m_0} g, \quad (1)$$

где $m_{\text{бр}}$ – масса вагона брутто, т; m_0 – количество колесных пар в вагоне; $m_{\text{кп}}$ – масса колесной пары, т; $m_{\text{кч}}$ – масса консольной части оси (от торца оси до плоскости круга катания колеса), т; λ – средняя величина коэффициента использования грузоподъемности.

$$P_{\text{ст}} = \frac{1+1}{2} \cdot \frac{94 - 4 \cdot 1,3 + 2 \cdot 4 \cdot 0,08}{2 \cdot 4} \cdot 9,81 = 109,5 \text{ кН.}$$

Динамическая нагрузка, действующая на шейку оси вагона

$$P_{\text{д}} = P_{\text{ст}} \cdot k_{\text{дв}}, \quad (2)$$

где $k_{\text{дв}}$ – коэффициент вертикальной динамики.

$$P_{\text{д}} = 109,5 \cdot 0,3 = 32,8 \text{ кН.}$$

Вертикальная нагрузка, действующая от центробежной силы, загружающей одну шейку и разгружающей другую, составляет

¹ РД 32 ЦВ 058–2016 Методика выполнения измерений при освидетельствовании колесных пар вагонов колеи 1520 мм. М., 2016.

$$P_{\text{ц}} = H_{\text{ц}} \cdot \frac{h_{\text{ц}}}{2b_2}, \quad (3)$$

где $h_{\text{ц}}$ – высота центра массы вагона от оси колесной пары, м; $2b_2$ – расстояние между серединами шеек осей, м; $H_{\text{ц}}$ – центробежная сила, приходящаяся на одну колесную пару, кН.

Величина центробежной силы (см. рисунок 1) определяется по следующей зависимости:

$$H_{\text{ц}} = 2P_{\text{ст}} \cdot \eta_{\text{ц}}, \quad (4)$$

где $\eta_{\text{ц}}$ – коэффициент влияния центробежной силы, для грузовых вагонов $\eta_{\text{ц}} = 0,075$.

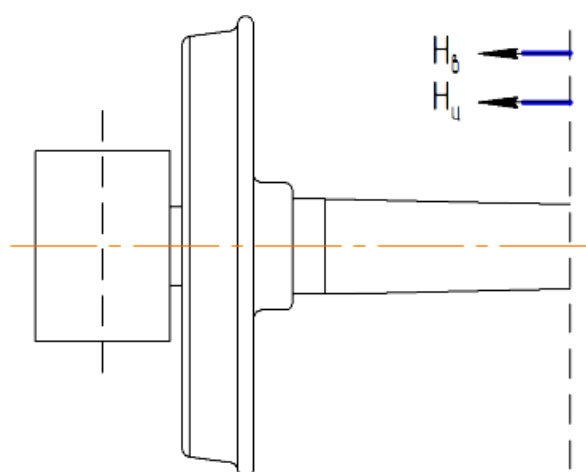


Рисунок 1 – Расчетная схема для определения давления ветра на вагон и центробежной силы

Figure 1 – Design diagram for determination of wind pressure per wagon and centrifugal force

$$H_{\text{ц}} = 2 \cdot 109,5 \cdot 0,075 = 16,4 \text{ кН},$$

$$P_{\text{ц}} = 16,4 \cdot \frac{1,5}{2,13} = 11,5 \text{ кН}.$$

Действие вертикальной нагрузки от давления ветра на боковую поверхность вагона, загружающей одну шейку оси и разгружающей другую, показано на рисунке 2 и определяется по следующей зависимости:

$$P_{\text{в}} = H_{\text{в}} \cdot \frac{h_{\text{в}}}{2b_2 \cdot m_0}, \quad (5)$$

где $H_{\text{в}}$ – давление ветра на вагон (см. рисунок 1).

$$H_{\text{в}} = \omega F, \quad (6)$$

где ω – давление ветра, перпендикулярное боковой стене вагона, $\omega = 500 \text{ Па}$; F – площадь боковой поверхности кузова, м^2 ; $h_{\text{в}}$ – расстояние от равнодействующей силы ветра до оси колесной пары, м.

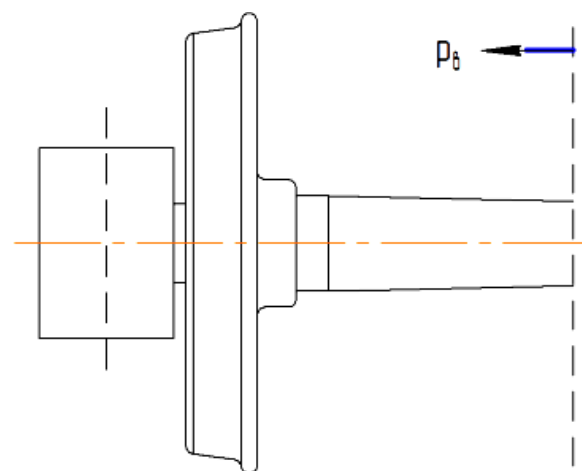


Рисунок 2 – Расчетная схема для определения вертикальной нагрузки от давления ветра на боковую поверхность

Figure 2 – Design diagram for determining the vertical lateral wind pressure load

$$H_{\text{в}} = 500 \cdot 24 = 12000 \text{ Па},$$

$$P_{\text{в}} = 12 \cdot \frac{1,8}{2,13 \cdot 4} = 2,5 \text{ кН}.$$

С учетом зависимостей (1), (3) и (5) определим суммарную вертикальную нагрузку:

– на левую шейку (см. рисунок 3)

$$P_1 = P_{\text{ст}}(1 + k_{\text{дв}}) + P_{\text{ц}} + P_{\text{в}}, \quad (7)$$

$$P_1 = 157,8 \text{ кН};$$

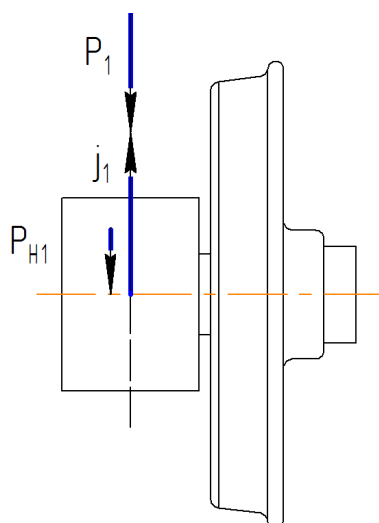


Рисунок 3 – Расчетная схема для определения суммарной вертикальной нагрузки, действующей на левую шейку

Figure 3 – Design diagram for determining the total vertical load applied to the left shaft

– на правую шейку (см. рисунок 4)

$$P_2 = P_{\text{ст}} - P_{\text{ц}} - P_{\text{в}}; \quad (8)$$

$$P_2 = 97,7 \text{ кН.}$$

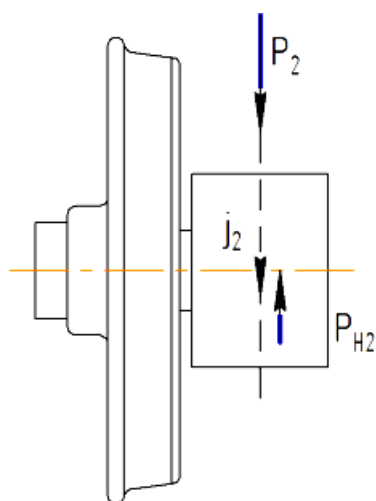


Рисунок 4 – Расчетная схема для определения суммарной вертикальной нагрузки, действующей на правую шейку

Figure 4 – Design diagram for determining the total vertical load applied to the right shaft

При расчете вертикальной нагрузки от сил инерции необрессоренных масс необходимо учитывать массы необрессоренных частей и ускорение буксового узла. Таким образом,

вертикальной нагрузки от сил инерции необрессоренных масс составит:

– на левую шейку оси (см. рисунок 3):

$$P_{H1} = m_1 \cdot j_1, \quad (9)$$

где m_1 – сумма масс необрессоренных частей, т; j_1 – ускорение левого буксового узла, м/с².

$$P_{H1} = 187 \text{ кН};$$

– на правую шейку (см. рисунок 4):

$$P_{H2} = m_2 \cdot j_2, \quad (10)$$

$$P_{H2} = 27,1 \text{ кН.}$$

Силу инерции левого колеса определим из расчетной схемы, приведенной на рисунке 5, и по зависимости

$$P_{\text{НК}} = m_{\text{к}} \cdot j_{\text{к}}, \quad (11)$$

где $m_{\text{к}}$ – масса колеса, т.

$$P_{\text{НК}} = 49,7 \text{ кН.}$$

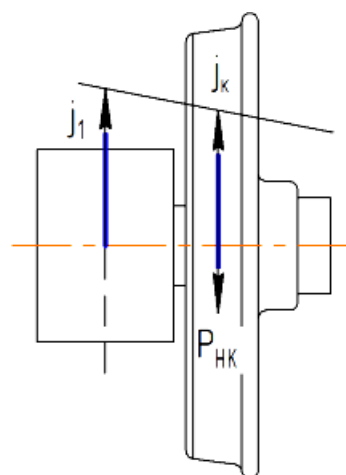


Рисунок 5 – Расчетная схема для определения силы инерции левого колеса

Figure 5 – Design diagram for determining the inertia force of the left wheel

Сила инерции средней части оси (см. рисунок 6):

$$P_{\text{НС}} = m_{\text{с}} \cdot j_{\text{с}}, \quad (12)$$

где $m_{\text{с}}$ – масса средней части оси, т.

$$P_{\text{НС}} = 12,72 \text{ кН.}$$

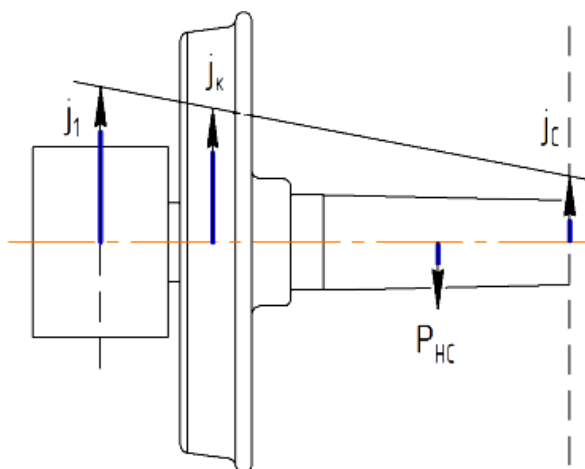


Рисунок 6 – Расчетная схема для определения силы инерции средней части оси

Figure 6 – Design diagram for determining the inertia force of the middle of the axle

Для расчета вертикальной реакции в опорах осей воспользуемся зависимостью, учитывающей выше приведенные значения сил:

– для левой опоры оси (см. рисунок 7):

$$N_H = P_1 \frac{l_2 + 2s}{2s} + P_{H1} \frac{l_5 + l_2 + 2s}{2s} + H \frac{r + r_1}{2s} + P_{HK} + \frac{2}{3} P_{HC} - P_2 \frac{l_2}{2s} + P_{H2} \frac{l_2 + l_5}{2s}, \quad (13)$$

где H – рамная сила; $2s$ – расстояние между кругами катания колесной пары; l_2 – расстояние от середины шейки оси до плоскости круга катания колеса; l_5 – расстояние от середины шейки оси до средней части оси на расстоянии $2/3$ длины участка от конца подступичной части до линии сопряжения галтели со средней частью; r – радиус колеса; r_1 – радиус шейки оси колесной пары.

$$H = \frac{m_{6p}}{m_0} g \cdot k_{дг}, \quad (14)$$

где $k_{дг}$ – коэффициент горизонтальной динамики;

$$H = 41,4 \text{ кН},$$

$$N_H = 509,8 \text{ кН}.$$

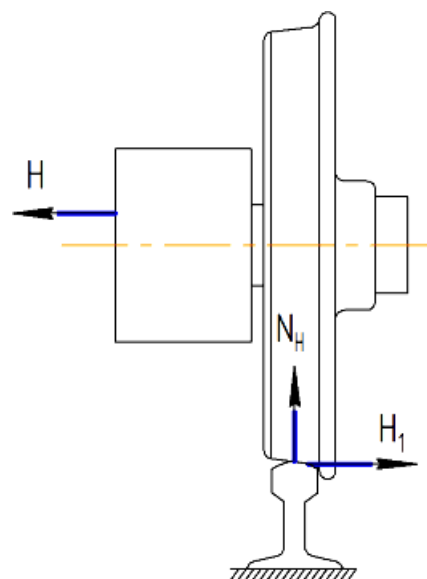


Рисунок 7 – Расчетная схема для определения вертикальной реакции левой опоры оси

Figure 7 – Design diagram for determining vertical reaction of left axle support

– для правой опоры оси (см. рисунок 8)

$$N_B = P_2 \frac{l_2 + 2s}{2s} - P_{H2} \frac{l_4 + l_2 + 2s}{2s} - H \frac{r + r_1}{2s} + \frac{1}{3} P_{HC} - P_1 \frac{l_2}{2s} + P_{H1} \frac{l_2 + l_4}{2s}, \quad (15)$$

где l_4 – расстояние от середины шейки оси до середины оси.

$$N_B = 14,7 \text{ кН}.$$

Сила трения в месте контакта колесо–рельс (см. рисунок 8) определяется из зависимости

$$H_2 = \mu N_B, \quad (16)$$

где μ – коэффициент трения скольжения, $\mu = 0,25$; N_B – вертикальная реакция в опоре оси.

$$H_2 = 0,25 \cdot 14,7 = 3,67 \text{ кН}.$$

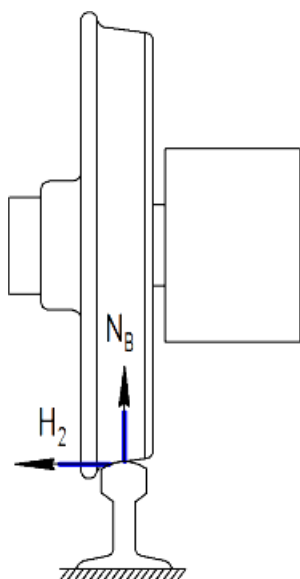


Рисунок 8 – Расчетная схема для определения силы трения контакта колесо–рельс

Figure 8 – Design diagram for determination wheel-rail contact friction force

Сила, приложенная к гребню колеса H_1 , определяется из зависимости (см. рисунок 7):

$$H_1 = H + H_2, \quad (17)$$

$$H_1 = 41,4 + 3,67 = 45,07 \text{ кН}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные результаты исследований по увеличению напряженности в основе металла в зависимости от отклонения пятна контакта от проектной оси симметрии не противоречат ранее обоснованным зависимостям [23, 24]. Несмотря на незначительную площадь изнашивания пятна контакта колеса существенно возрастают моменты инерции и контактные напряжения, что приводит к разрушению металла колеса. Решить данную задачу позволит разработанный мобильный комплекс, который восстанавливает проектную геометрию изношенного гребня колеса и модифицирует высокие физико-механические свойства поверхности катания с оптимальными напряжениями в структуре основы колеса².

Мобильный ремонтный комплекс для восстановления колес (рисунок 9) содер-

жит гидравлическую станцию 21 с пультом управления 1, приводящую в движение гидравлические домкраты 16, гидравлический шток 17 гидроцилиндра выдвижной платформы и полно-поворотный круг 18. Комплекс имеет верхний ярус 2, на который с помощью электрического штабеллера 6 можно переместить дополнительную или восстановленную колесную тележку. На верхнем ярусе установлены электрические лебедки 3, которые по рельсовым направляющим вытягивают тележку со штабеллера на платформу. Электрический штабеллер оснащен электроприводом 20, винтовым стержнем 8 и пультом управления 7.

Комплекс содержит сварочную кабину 9, в которой установлена кран-балка 11, с закрепленным на ней многокоординатным наплавочным оборудованием. В его комплект входит сварочный автомат 14 с устройством для подачи проволоки и флюса, кассета для сварочной проволоки, бункер с флюсом, блок управления 5, сварочный трансформатор 4. Кран-балка имеет несколько степеней свободы и может быть отрегулирована по высоте с помощью рукояти 12 и под определенным углом. Также сварочная кабина оснащена механизмом 13, вращающим колесную пару, фрезеровочно-расточным устройством 19 и тепловыми отсекающими калориферами 10. Помимо этого комплекс имеет выдвижную рампу 15, которая необходима для подъема колесной тележки на платформу.

Мобильный ремонтный комплекс работает следующим образом. Подъем вагона осуществляется с помощью четырех переносных одно-стоечных домкратов (на рисунке не показаны), устанавливаемых по разные стороны напротив шкворневых балок вагона.

Колесная тележка выкатывается из-под вагона и перемещается с помощью электрической лебедки 3 по рельсовым направляющим выдвижной рампе 15 на полноповоротный круг 18. Рампа, приводимая в движение гидравлическими штоками 17, перемещается по валикам (на рисунке не показаны).

В поворотном круге установлены гидравлические домкраты 16, которые поднимают на нужную высоту обрабатываемую колесную пару.

² Пат. № 5935 Республики Казахстан, В23Р 6/00 В23К 9/04. Мобильный ремонтный комплекс для восстановления колесных пар железнодорожных вагонов / Савинкин В.В., Шагаев И.В., Жумекенова З.Ж. – опубл. 19. 03. 2021. Бюл. № 11.

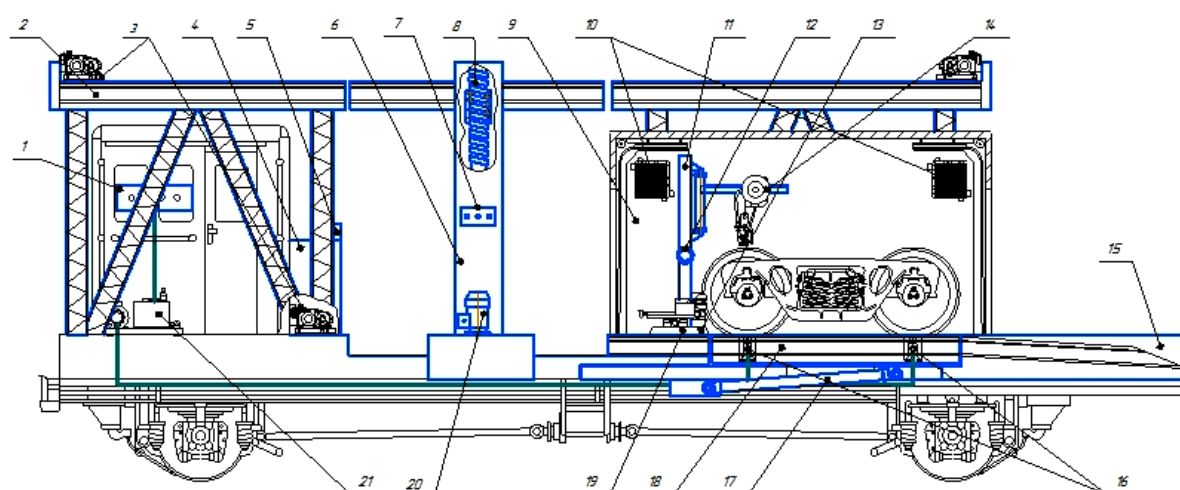


Рисунок 9 – Мобильный комплекс для восстановления колесных пар железнодорожных вагонов:

- 1 – пульт управления гидравлической станцией; 2 – верхний ярус; 3 – электрическая лебедка;
 4 – сварочный трансформатор; 5 – блок управления сварочным автоматом; 6 – штабеллер электрический;
 7 – пульт управления штабеллером; 8 – винтовой стержень подъемника; 9 – сварочная кабинка;
 10 – тепловой отсекатель-калорифер; 11 – кран-балка; 12 – рукоять; 13 – вращательный механизм;
 14 – сварочный автомат; 15 – выдвижная рампа; 16 – гидравлический домкрат;
 17 – гидравлический шток гидроцилиндра выдвижной платформы; 18 – полноповоротный круг;
 19 – колесное фрезеровочно-расточное устройство; 20 – электропривод; 21 – гидравлическая станция

Figure 9 – Mobile system for the restoration of railway wagon wheels:

- 1 – hydraulic station control panel; 2 – upper tier; 3 – electric winch;
 4 – welding transformer; 5 – welding machine control unit; 6 – electrical stacker;
 7 – the stacker control panel; 8 – the screw rod of the hoist; 9 – the welding booth;
 10 – heat cut-off-calorifer; 11 – tap-beam; 12 – handle; 13 – rotational mechanism;
 14 – welding machine; 15 – ramp; 16 – hydraulic jack; 17 – hydraulic rod of hydraulic cylinder of sliding platform; 18 – full circle;
 19 – wheel milling device; 20 – electric drive; 21 – hydraulic station

С помощью передвижной кран-балки 11 многокоординатный сварочный автомат 14 устанавливается в рабочее положение. Режимы сварки задаются на блоке управления 5, питание происходит от сварочного трансформатора 4. Колесную пару приводят в движение с помощью вращательного механизма 13, на котором задают необходимую скорость вращения. После процесса наплавки проводится расточка поверхности катания до заданных размеров колесным фрезеровочно-расточным устройством 19. Наплавка и расточка проходит в сварочной кабине, в которой калориферы поддерживают оптимальную температуру и влажность над сварочной ванной, установленной над входами. Для восстановления про-

тивоположной части колесной пары тележка поворачивается на 180° с помощью полноповоротного круга 18.

Наиболее близким техническим решением к данному мобильному комплексу является установка для восстановления колесных пар железнодорожного подвижного состава, содержащая механизм вывешивания колесной пары в виде самоходного электрического домкрата, смонтированного на тележке, размещенной на боковых железнодорожных путях, уложенных внутри основного железнодорожного пути, отдельную тележку с устройством для зажигания дуги, привод подачи сварочной проволоки и флюса в зону дуги и устройство для обточки наплавленных колес³.

³ Пат. RU2124974C1 B23P 6/00, B22D 19/10, B23K 9/04. Способ восстановления колесных пар железнодорожного подвижного состава и установка для его осуществления / Соловьев П.Н., Дмитренко В.Н., Дмитренко Г.В. Лазебный А.С., Карпенко В.Н. – опубл. 20.01.1999. Бюл. № 3.

Недостатком известного оборудования является необходимость установки дополнительных железнодорожных путей, что не всегда возможно при работе на пути в удалении от ремонтного ДПО. К существенным недостаткам относятся отсутствие сварочной кабинки с климатическим контролем над сварочным постом, невозможность автоматического управления процессом восстановления проектной геометрии и физико-механических свойств поверхности катания с последующим снятием внутренних напряжений, что снижает качество восстановленной поверхности катания при работе на открытом воздухе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на значительный ресурс колес железнодорожных вагонов в процессе износа происходит разрушение микрообъемов поверхностного слоя, которое при трении и интенсивных статических и динамических нагрузках приводит к изменению размеров, формы и физико-механических свойств поверхности [25, 26]. Для повышения межремонтного ресурса необходимо разработать новые методы сверхточного прогнозирования. Их концепция должна быть основана на выявлении структурно-фазовых изменений металла на стадии зарождения дефекта [27].

Разработанный мобильный ремонтный комплекс обеспечит высокое качество восстановления проектной геометрии гребня и высокие физико-механические свойства модифицированной поверхности катания колесной пары.

Оригинальные конструктивно-технологические решения обеспечивают возможность автоматически регулировать оптимальные режимные параметры восстановления, что ведет к повышению эффективности и качества восстановления изношенных колес железнодорожных вагонов без установки дополнительных железнодорожных путей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шибко Р.В., Захаров Е.А. Система контроля колесных пар железнодорожных вагонов // Молодой ученый. 2014. № 18. С. 314–317.
2. Левчук Н.А. Обеспечение безопасной эксплуатации колес // Железные дороги мира. 2018. № 1. С. 59–63.
3. Савоськин А.Н., Васильев А.П. Дислокационная модель взаимодействия колеса и рельса при реализации вращающего момента и при боковых колебаниях экипажей // Известия ПГУПС. 2017. № 1. С. 103–109.
4. Sun, YQ, Cole, C, McClanachan, M. The calculation of wheel impact force due to the interaction between vehicle and a turnout. *Proc IMechE, Part F: J Rail and Rapid Transit* 2010; 224:391–403.
5. Максимов И.Н. Профиль поверхности катания колес для высокоскоростных поездов // Железнодорожный транспорт. 2014. № 11. С. 50–52.
6. Lin F., Dong X., Wang. Y. Multiobjective optimization of CRH3 EMU wheel profile // *Adv Mech Eng*. 2015; 7:1–8.
7. Kokhanovskii V.A., Maiba I.A., Glazunov D. V., Bol'shikh I. V. Lubricator casings for locomotive wheel rims // *Russian Engineering Research*. 2016; 36(5): 364–365.
8. Kokhanovskii V.A., Glazunov D.V. Control of lubricant performance // *Russian Engineering Research*. 2017; 37(9): 768–773.
9. Jingmang X, Ping W, Li W, Rong Ch. Effects of profile wear on wheel–rail contact conditions and dynamic interaction of vehicle and turnout // *Advances in Mechanical Engineering*. 2016; 8 (1). doi. org/10.1177/1687814015623696.
10. Aniolek, K, Herian, J. Numerical modeling of load and stress on the contact surface of a turnout and a railway vehicle. *J Transport Eng* 2013; 139: 533–539.
11. Aalami, MR, Anari, AS, Shafighfar, T. A robust finite element analysis of the rail-wheel rolling contact. *Adv Mech Eng* 2013; 5: 1–9.
12. Zeng, Z, Yu, Z, Chen, X. Analysis on spatial vibration of train-turnout-continuous frame bridge with train running through turnout branch. *J Vib Shock* 2009; 28: 40–45.
13. Sebes, M, Ayasse, JB, Chollet, H. Application of a semi-Hertzian method to the simulation of vehicles in high-speed switches. *Vehicle Syst Dynam* 2006; 44: 341–358.
14. Журавлев Д.В. Система раннего диагностирования как гарантия безотказной работы буксового узла колесной пары // В мире неразрушающего контроля. 2017. № 4. С. 71–76.
15. Герасимова А.А., Керопян А. М., Гиря А. М. Исследование системы колесо–рельс карьерных локомотивов в режиме тяги // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 1. С. 39–42.
16. Воробьев А. А., Керенцев Д.Е., Федоров И.В. Испытания колесных стальных на износ и контактную усталость // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. 2017. Т. 14. № 4. С. 628–636.
17. Губенко С.И., Иванов И.А., Кононов Д.П. Влияние качества стали на усталостную прочность цельнокатанных колес // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. М. : Изд-во «Тест-эл». 2018. Т. 84. № 3. С. 52–60.
18. Михеев Г.В., Погорелов Д.Ю., Родиков А.Н. Методы моделирования динамики железнодорожных колесных пар с учетом упругости // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 4 (77). С. 40–51.
19. Леоненко Е.Г. Взаимодействие пути и порожних грузовых вагонов при движении в прямых и кривых участках пути // Современные технологии.

Системный анализ. Моделирование. 2019. Т. 63. № 3. С. 148–154.

20. Ромен Ю.С., Суслов О.А., Баляева А.А. Определение сил взаимодействия в системе колесо–рельс на основании измерения напряжений в шейке рельса // Вестн. ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 6. С. 354–361.

21. Шевченко Д. В., Савушкин Р.А., Кузьминский Я.О. [и др.] Разработка новых методов определения силовых факторов воздействия подвижного состава на путь // Техника железных дорог. 2018. № 1 (41). С. 38–51.

22. Kuznetsova, V.N., Savinkin, V.V., Ratushnaya, T.Yu., Sandu, A.V., Vizureanu, P. Study of the spatial distribution of forces and stresses on wear surfaces at optimization of the excavating part of an earthmoving machine transverse profile. *Coatings*, 2021, 11(2), стр. 1–16, 182

23. Kuznetsova, V.N., Savinkin, V.V. More efficient rotation of excavator platforms. *Russian Engineering Research*, 2017, 37(8), стр. 667–671.

24. Казанская Л. Ф. Оптимизация критериев эффективного управления безопасностью движения в железнодорожной компании // Учен. зап. Междуна. банковск. ин-та. 2017. № 21. С. 146–158.

25. Хабилова С. Проблемы ремонта подвижного состава // РЖД-Партнер. 2006. С. 114–120.

26. Savinkin, V.V., Kuznetsova, V.N., Ratushnaya, T.Yu., Kiselev, L.A. Method of integrated assessment of fatigue stresses in the structure of the restored blades of CHP and HPS. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2019, 330(8), стр. 65–77.

REFERENCES

1. Shibeko R.V., Zaharov E.A. Sistema kontrolya kolesnyh par zheleznodorozhnyh vagonov [Railway car wheelset control system] // *Molodoj uchenyj*. 2014; № 18: 314–317. (in Russian)

2. Levchuk N.A. Obespechenie bezopasnoj ekspluatatsii koles [Ensuring the safe operation of the wheels] // *ZHeleznnye dorogi mira*. 2018; 1: 59–63. (in Russian)

3. Savos'kin A.N., Vasil'ev A.P. Dislokatsionnaya model' vzaimodejstviya kolesa i rel'sa pri realizatsii vrashchayushchego momenta i pri bokovyh kolebaniyakh ekipazhej [Dislocation model of interaction of a wheel and a rail at realization of a torque and at lateral fluctuations of carriages] // *Izvestiya PGUPS*. 2017; 1: 103–109. (in Russian)

4. Sun, YQ, Cole, C, McClanachan, M. The calculation of wheel impact force due to the interaction between vehicle and a turnout. *Proc IMechE, Part F: J Rail and Rapid Transit* 2010; 224: 391–403.

5. Maksimov I. N. Profil' poverhnosti kataniya koles dlya vysokoskorostnyh poezdov [Rolling surface profile for high-speed trains] // *ZHeleznodorozhnyj transport*. 2014; 11: 50–52 (in Russian)

6. Lin F., Dong X., Wang. Y. Multiobjective optimization of CRH3 EMU wheel profile // *Adv Mech Eng*. 2015; 7:1–8.

7. Kokhanovskii V.A., Maiba I.A., Glazunov D.V., Bol'shikh I.V. Lubricator casings for locomotive wheel rims // *Russian Engineering Research*. 2016; 36(5): 364–365.

8. Kokhanovskii V. A., Glazunov D. V. Control of lubricant performance // *Russian Engineering Research*. 2017; 37(9): 768–773.

9. Jingmang X, Ping W, Li W, Rong Ch. Effects of profile wear on wheel–rail contact conditions and dynamic interaction of vehicle and turnout // *Advances in Mechanical Engineering*. 2016; 8(1) doi.org/10.1177/1687814015623696.

10. Aniolek, K, Herian, J. Numerical modeling of load and stress on the contact surface of a turnout and a railway vehicle. *J Transport Eng* 2013; 139: 533–539.

11. Aalami, MR, Anari, AS, Shafighfard, T. A robust finite element analysis of the rail-wheel rolling contact. *Adv Mech Eng* 2013; 5: 1–9.

12. Zeng, Z, Yu, Z, Chen, X. Analysis on spatial vibration of train-turnout-continuous frame bridge with train running through turnout branch. *J Vib Shock* 2009; 28: 40–45.

13. Sebes, M, Ayasse, JB, Chollet, H. Application of a semi-Hertzian method to the simulation of vehicles in high-speed switches. *Vehicle Syst Dynam* 2006; 44: 341–358.

14. ZHuravlev D.V. Sistema rannego diagnostirovaniya kak garantiya bezotkaznoj raboty buksovogo uzla kolesnoj pary [Early diagnosis system as a guarantee of trouble-free operation of the wheel-set axle assembly] // *V mire nerazrushayushchego kontrolya*. 2017; 4: 71–76. (in Russian)

15. Gerasimova A.A., Keropyan A.M., Giry A.M. Issledovanie sistemy koleso-rel's kar'ernykh lokomotivov v rezhime tyagi [Investigation of the wheel-rail system of quarry locomotives in traction mode] // *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2018; 1: 39–42. (in Russian)

16. Vorob'ev A.A., Kerencev D.E., Fedorov I. V. Ispytaniya kolesnyh stalej na iznos i kontaktnuyu ustalost' [Wheel steel wear and contact fatigue tests] // *Izvestiya PGUPS*, 2017; 14(4): 628–636. (in Russian)

17. Gubenko S.I., Ivanov I.A., Kononov D.P. Vliyanie kachestva stali na ustalostnuyu prochnost' cel'nokatanykh koles [Influence of steel quality on fatigue strength of solid-rolled wheels] // *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2018; 84(3): 52–60. (in Russian)

18. Miheev G.V. Pogorelov D.YU., Rodikov A.N. Metody modelirovaniya dinamiki zheleznodorozhnykh kolesnyh par s uchetom uprugosti [Methods for modeling the dynamics of railway wheel sets with allowance for elasticity] // *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019; 4 (77): 40–51. (in Russian)

19. Leonenko E.G. Vzaimodejstvie puti i porozhnykh gruzovykh vagonov pri dvizhenii v pryamykh i krivykh uchastkakh puti [Interaction of the track and empty freight cars when moving in straight and curved sections of the track] // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie*. 2019; 63(3): 148–154.

20. Romen Y.U. S. Opređenje sil vzaimodejstviya v sisteme koleso-rel's na osnovanii izmereniya napryazhenij v shejke rel'sa / YU. S. Romen, O. A. Suslov, A. A. Balyaeva // *Vestn. VNIIZHT*. 2017; 76(6): 354-361.

21. SHEvchenko D. V. Razrabotka novykh metodov opredeleniya silovykh faktorov vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' / D. V. SHEvchenko, R. A. Savushkin, YA. O. Kuz'minskij, T. S. Kuklin, E. A. Rudakova, A. M. Orlova // *Tekhnika zheleznykh dorog*. 2018; 1 (41): 38-51.

22. Kuznetsova V.N., Savinkin, V.V., Ratushnaya, T.Yu., Sandu, A.V., Vizureanu, P. Study of the spatial distribution of forces and stresses on wear surfaces at optimization of the excavating part of an earthmoving machine transverse profile. *Coatings*, 2021; 11(2):182 <https://doi.org/10.3390/coatings11020182>

23. Kuznetsova V.N., Savinkin, V.V. More efficient rotation of excavator platforms. *Russian Engineering Research*, 2017, 37(8): 667–671. DOI: <http://doi.org/10.3103/S1068798X1708010X>

24. Kazanskaya L.F. Optimizatsiya kriteriev effektivnogo upravleniya bezopasnost'yu dvizheniya v zheleznodorozhnoy kompanii / L.F. Kazanskaya // *Uchen. zap. Mezhdunar. bankovsk. in-ta*. 2017; 21: 146-158.

25. Habirova S. Problemy remonta podvizhnogo sostava [Problems of rolling stock repair] // *RZHD-Partner*. 2006: 114–120.

26. Savinkin V.V., Kuznetsova, V.N., Ratushnaya, T.Yu., Kiselev, L.A. Method of integrated assessment of fatigue stresses in the structure of the restored blades of CHP and HPS. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2019, 330(8): 65–77.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

1. Савинкин В.В. Концептуализация, формулирование и исследование научной гипотезы, управление проектом. Формулирование проблемы исследования. Руководство процессом разработки темы. Выбор методологии и методов исследования (20%).

2. Шагаев И.В. Обзор результатов предыдущих исследований. Постановка задач исследования. Обозначение алгоритма аналитических исследований. Формулировка результатов и выводов (20%).

3. Савинкин С.В. Аналитика результатов исследования, редактирование, формирование выводов, графическая редакция схем (20%).

4. Кузнецова В.Н. Валидация данных, курирование и рецензирование результатов, проверка теоретических предположений, корреспонденция данных с иностранными авторами (20%).

5. Sandu A.V. Формулировка направления и темы исследования. Программное исследование расчета прочности (20%).

AUTHORS' CONTRIBUTION

1. Vitalii V. Savinkin – Conceptualization, formulation and research of a scientific hypothesis, project management. Formulation of the research problem. Guide the theme development process. Choice of research methodology and methods (20%);

2. Ivan V. Shagaev – Review of the results of previous studies. Setting research objectives. The designation of the analytical research algorithm. Formulation of results and conclusions (20%);

3. Sergei V. Savinkin –Analysis of research results, editing, drawing conclusions, graphic editing of schemes (20%);

4. Viktoria N. Kuznetsova – Data validation, curation and review of results, verification of theoretical assumptions, correspondence of data with foreign authors (20%);

5. Andrei V. Sandu – Statement of the research direction and topic. Software study of strength calculation (20%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецова Виктория Николаевна – д-р техн. наук, проф., ORCID ID: 0000-0003-3546-0894, Scopus Author ID 8671569200, проф. кафедры «Эксплуатация и сервис транспортно-технологических машин и комплексов в строительстве» ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, Россия, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).

Савинкин Виталий Владимирович – д-р техн. наук, доц., ORCID ID: 0000-0002-7748-3720, Scopus Author ID 57195726895, доц. кафедры «Транспорт и машиностроение» НАО «СКУ им. М. Козыбаева» (150000, Северо-Казахстанская область, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86, e-mail: cavinkin7@mail.ru).

Шагаев Иван Владимирович – магистрант кафедры «Транспорт и машиностроение» НАО «СКУ им. М. Козыбаева» (150000, Северо-Казахстанская область, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86, e-mail: shagaevv@mail.ru).

Савинкин Сергей Владимирович – аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» ФГБОУ ВО «ОмГУПС» (644046, Россия, г. Омск, пр. Маркса, 35, e-mail: syava-sv@yandex.ru).

Andrei Victor Sandu – д-р PhD, ORCID ID: 0000-0002-9292-749X, проф. факультета материаловедения и инженерии, Технический университет Георге Асачи в Яссах (700050, г. Яссы, бул. Д. Мангерон, № 51, Румыния; sav@tuiasi.ro).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktoria N. Kuznetsova, Dr. of Sci., Professor of the Operation and Service of Transport and Technological Machines and Complexes in Construction Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Siberian State Auto-

mobile and Highway University (SibADI), ORCID ID: 0000-0003-3546-0894, Scopus Author ID 8671569200 (644080, Omsk, Mira ave., 5 e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).

Vitaliy V. Savinkin, Dr. of Sci., Associate Professor, ORCID ID: 0000-0002-7748-3720, Scopus Author ID 57195726895, Associate Professor of the Transport and Mechanical Engineering Department, M. Kozybayev North Kazakhstan University (150000, North Kazakhstan region, Petropavlovsk, Pushkin 86, e-mail: cavinkin7@mail.ru).

Ivan V. Shagaev, Graduate Student of the Transport and Mechanical Engineering Department, M. Kozy-

bayev North Kazakhstan University (150000, North Kazakhstan region, Petropavlovsk, Pushkin str., 86, e-mail: shagaevv@mail.ru).

Sergey V. Savinkin, Post-graduate Student of the Technology of Transport Engineering and Repair of Rolling Stock Department, Omsk State University of Railways and Communications (644046, Russia, Omsk, Marks ave., 35, e-mail: syava-sv@yandex.ru).

Andrei V. Sandu, PhD, Professor, the Materials science and engineering Department, ORCID ID: 0000-0002-9292-749X, Gheorghe Asachi Technical University in Iasi (Boulevard D. Mangeron, No. 51, 700050 Iasi, Romania; sav@tuiasi.ro).

УДК 621.86

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-180-190>

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЕЙ 09Г2С И 30МnВ5 НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

А.П. Щербаков, А.Е. Пушкарёв, Т.В. Виноградова
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет»,
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются пути повышения надежности эксплуатации дорожно-строительных машин. По итогам этого рассмотрения предлагается вариант замены используемой стали 09Г2С бор-содержащей сталью 30МnВ5. На примере ножа автогрейдера анализируются силовые воздействия на данный рабочий орган дорожно-строительных машин. С целью повышения уровня физико-механических характеристик сталей 09Г2С и 30МnВ5 дополнительно проводится их термоциклическая обработка. Описываются экспериментальные исследования влияния данного вида термического воздействия на структуру и свойства сталей. Сравнительный анализ полученных характеристик позволяет сделать заключение о возможности рассматриваемой замены.

Материалы и методы. С помощью металлографического анализа авторами было исследовано влияние количества циклов термических воздействий на размер зерна стали. Параллельно определен комплекс физико-механических характеристик данных сталей на различных этапах термоциклической обработки.

Результаты. Было определено, что повышения уровня физико-механических характеристик исследуемых сталей можно добиться применением термоциклической обработки. Это достигается за счет получения мелкозернистой структуры металла, имеющей более высокую прочность. Рассмотрены зависимости предела прочности и предела текучести исследуемых сталей от числа циклов термического воздействия. Подобраны корреляционные соотношения для описания этих зависимостей. Рассмотрена связь пределов текучести и прочности сталей 09Г2С и 30МnВ5 с размером зерна. Все исследованные зависимости представлены в графическом виде.

Обсуждение и заключение. На основе сравнительного анализа комплекса физико-механических характеристик авторами сделано заключение о возможности замены стали 09Г2С на сталь 30МnВ5.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: металлографический анализ, размер зерна, термоциклическая обработка, физико-механические характеристики, замена стали.

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

Поступила 14.03.21, принята к публикации 28.04.21.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Щербаков А.П. Анализ влияния термоциклической обработки сталей 09г2с и 30mnв5 на прочностные характеристики рабочих органов дорожно-строительных машин/ А.П. Щербаков, А.Е. Пушкарёв, Т.В. Виноградова. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-180-190> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 2(78). – С. 180-190.

© Щербаков А.П., Пушкарёв А.Е., Виноградова Т.В., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-180-190>

INFLUENCE ANALYSIS OF 09Г2С AND 30МnВ5 STEELS THERMOCYCLIC TREATMENT ON STRENGTH CHARACTERISTICS OF ROAD CONSTRUCTION MACHINES WORKING BODIES

Alexandr P. Scherbakov, Alexandr E. Pushkarev, Tamara V. Vinogradova

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

Introduction. The ways of increasing the reliability of road construction machinery operation are considered. As a result, an option is proposed to replace the used 09Г2С steel with 30МnВ5 boron steel. Using the example of a motor grader blade, the force effects on this working body of the road construction machinery are analyzed. In order to increase the level of physical and mechanical characteristics of 09Г2С and 30МnВ5 steels, they are additionally exposed to thermo cyclic treatment. The experimental studies about the influence of this type thermal action on the structure and properties of steels are described. The comparative analysis of the obtained characteristics allows making a conclusion about the possibility of the considered replacement.

Materials and methods. Through the metallographic analysis the influence of the number of thermal effects cycles on the grain size of steel is investigated. Alongside a set of physical and mechanical characteristics of these steels was determined at various stages of the thermo cyclic treatment.

Results. It was determined that an increasing the level of physical and mechanical characteristics of the studied steels is possible through the use of thermo cyclic treatment. This is achieved by producing a fine-grained metal structure with a higher strength. The dependence of the tensile strength and yield strength of the steels under investigation on the number of cycles of thermal action is considered. Some correlation relationships were selected to describe these dependencies. The relationship between the yield stress and ultimate strength of 09Г2С and 30МnВ5 steels and the grain size is considered. All investigated dependencies are presented in graphical form.

Discussion and conclusion. Based on a comparative analysis of the complex of physical and mechanical characteristics, the conclusion about the possibility of replacing 09Г2С steel with 30МnВ5 steel was made.

KEYWORDS: metallographic analysis, grain size, thermo cyclic treatment, physical and mechanical characteristics, steel replacement.

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

Submitted 14.03.21 , revised 28.04.21.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Scherbakov A.P., Pushkarev A.E., Vinogradova T.V. Influtnce analysis of 09Г2С and 30МnВ5 steels thermo cyclic treatment on strength characteristics of road construction machines working bodies. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (2): 180-190. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-180-190>

© Scherbakov A.P., Pushkarev A.E., Vinogradova T.V., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация дорожно-строительных машин включает в себя три основных направления:

- процесс формирования парка дорожно-строительных машин;
- использование машин по их функциональному назначению;
- обеспечение работоспособности дорожно-строительных машин за счет технического обслуживания и ремонта.

Первое направление связано с решением вопросов по приобретению новой или уже бывшей в эксплуатации техники. Второе и третье направления напрямую связаны с обеспечением эффективной эксплуатации дорожно-строительной техники.

В рамках данной статьи подойдем к понятию эффективной эксплуатации машины через значение запаса прочности ее рабочих узлов, который определяется двумя параметрами – прочностными характеристиками материала рабочего органа дорожно-строительной машины и действующими нагрузками. В общем случае оба этих параметра могут носить случайный характер. Чаще всего при расчетах коэффициентов запаса прочности рассматривается нормальное распределение указанных величин [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Это позволяет использовать либо средние значения указанных величин, либо нормированные или же брать отношение минимальной прочности к максимальной нагрузке.

Одним из путей повышения надежности эксплуатации дорожно-строительных машин является увеличение прочностных характеристик материалов рабочих органов.

В настоящее время существует несколько направлений повышения прочности материалов. Однако наибольший эффект дают методы, связанные с получением мелкозернистой структуры. В статье [12] говорится о порошковых методах, осаждении из газовой фазы. Выделяются методы, связанные с интенсивной пластической деформацией [13, 14, 15].

Не менее распространенным можно считать метод термоциклической обработки. Теоретические основы данного метода, служащего для повышения механических характеристик различных материалов и сварных соединений за счет улучшения структуры, изложены в работах [16, 17]. Авторами этих источников отмечается, что вопрос выбора режимов термоциклической обработки для каждого материала должен определяться контекстом его применения. Поэтому отечественная и зарубежная техническая литература, посвященная данному направлению, достаточно обширна. Во всех этих публикациях отмечается, что после термоциклической обработки в сталях фиксируется измельчение исходного зерна с одновременным повышением механических характеристик, в качестве которых взяты предел прочности, предел текучести и твердость [18, 19, 20, 21, 22, 23].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследований были выбраны широко применяемые в дорожно-строительных машинах стали 09Г2С и 30МnВ5. Цель исследований заключалась в сравнительном анализе микроструктуры и физико-механических характеристик данных сталей после термоциклической обработки.

В таблице 1 приведен химический анализ сталей.

Сталь 09Г2С подвергалась отжигу при температуре 900 °С. Термообработка стали 30МnВ5 проводилась по режиму закалка (860–900) °С плюс отпуск (400–600) °С.

Термоциклическая обработка заключалась в проведении десяти циклов «нагрев до 780 °С – охлаждение».

Испытания на растяжение проводились с использованием плоских образцов (рисунок 1). Некоторые из образцов имели в центральной части боковые радиусные проточки, которые ослабляли поперечное сечение на 20%.

Таблица 1 – Химический состав сталей

Table 1 – Chemical composition of steels

Марка стали	Химический состав, %								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	B
09Г2С	0,11	0,68	1,33	0,008	0,015	0,03	0,02	0,03	
30МnВ5	0,027–0,33	≤0,40	1,15–1,45	≤0,035	≤0,025	–	–	≤0,40	0,0008–0,0050



Рисунок 1 – Основная часть образцов, используемых для проведения экспериментальных исследований

Figure 1 – The main part of the samples used for experimental studies

Растяжение образцов осуществлялось на универсальной испытательной машине Instron 5969, показанной на рисунке 2, с записью диаграмм деформирования на компьютер.

Определение среднего размера зерна проводили по методике, предусмотренной ГОСТ 5639–82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна». Для измерений был использован металлографический микроскоп Olympus SpinSR10 с системой количественного анализа изображений Thixomet (рисунок 3).



Рисунок 2 – Универсальная электромеханическая машина Instron 5969

Figure 2 – Instron 5969 Universal Electromechanical Machine

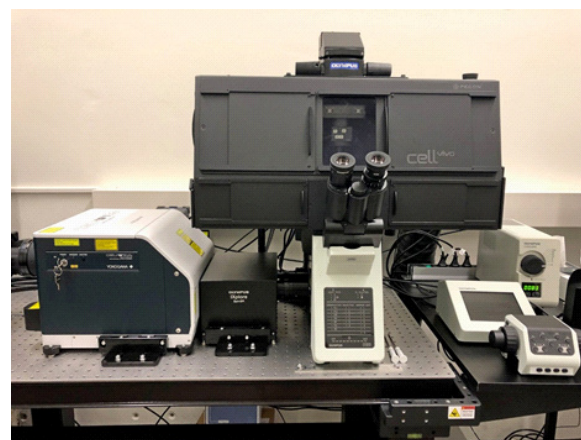


Рисунок 3 – Металлографический микроскоп Olympus SpinSR10

Figure 3 – SpinSR10 Olympus metallographic microscope

Указанный микроскоп оснащен вращающимся диском, позволяющим получить изображения с суперразрешением. Глубина таких изображений составляет до 100 мкм. Это позволяет исследовать области, которые недоступны для изучения с использованием других оптических приборов. Скорость обработки спектральных данных при этом очень высокая.

Конструкция микроскопа позволяет равномерно освещать все поле зрения. Переход от конфокального режима к режиму суперразрешения осуществляется плавно. Наличие вращающегося диска обеспечивает достаточную яркость изображения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблицу 2 сведены результаты испытаний на растяжение и средний размер зерна исследуемых сталей после термоциклической обработки.

На рисунке 4 представлена зависимость среднего размера зерна d от количества N циклов термоциклической обработки. Обработка данных проводилась в программе Sigma Plot v.12.5.

Видно, что сталь 09Г2С имеет более крупное зерно, чем сталь 30МпВ5. Кроме того, необходимо отметить, что сталь 09Г2С, начиная с $N = 4$, практически не изменяет размер зерна. Сталь 30МпВ5 продолжает менять размер зерна вплоть до $N = 10$.

Программа Sigma Plot позволяет проводить подбор аппроксимационных соотношений, используя для этих целей метод наименьших квадратов и набор различных функций – линейных, экспоненциальных, логарифмических, степенных. Эти функции встроены в

Таблица 2 – Механические свойства сталей после термоциклической обработки

Table 2 – Mechanical properties of steels after thermo cyclic processing

Марка стали	Свойства	Количество циклов							
		0	1	2	3	4	6	7	10
09Г2С	$\sigma_{0,2}$, МПа	357	371	385	392	404	405	409	410
	σ_b , МПа	446	468	482	491	499	502	503	507
	Средний размер зерна d , мкм	32	16	13	11	10	9	8	7,5
30MnB5	$\sigma_{0,2}$, МПа	400	410	415	420	480	500	600	610
	σ_b , МПа	650	750	760	785	850	950	998	1700
	Средний размер зерна d , мкм	20	10	9	8	7	6	3	1,5

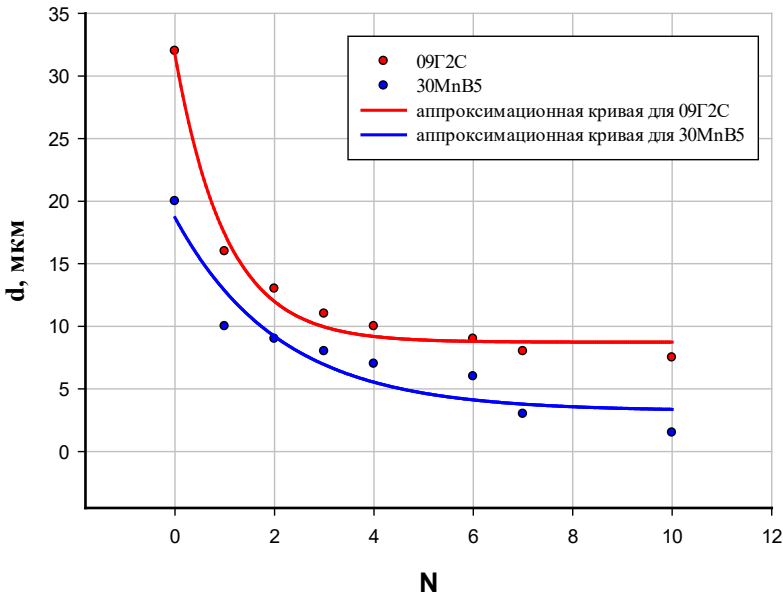


Рисунок 4 – Зависимость $d = f(N)$

Figure 4 – Dependence $d = f(N)$

алгоритм обработки, и все расчеты выполняются автоматически. Критерием выбора той или иной аппроксимирующей функции служит значение коэффициента регрессии R . Этот параметр изменяется от 0 до 1. Чем его значение выше, то есть ближе к 1, тем лучше аппроксимацию дает выбранная функция. В этом случае она наиболее близко расположена ко всему набору экспериментальных результатов, что позволяет сделать заключение о наличии функциональной связи между парами рассматриваемых величин. Наличие аппроксимационной зависимости, имеющей коэффициент корреляции, близкий к 1, позволяет прогнозировать значения рассматриваемой функции как внутри интервала изменения аргумента, подтвержденного экспериментальными значениями, так и за его пределами. При выходе за экспериментально подтвержденный

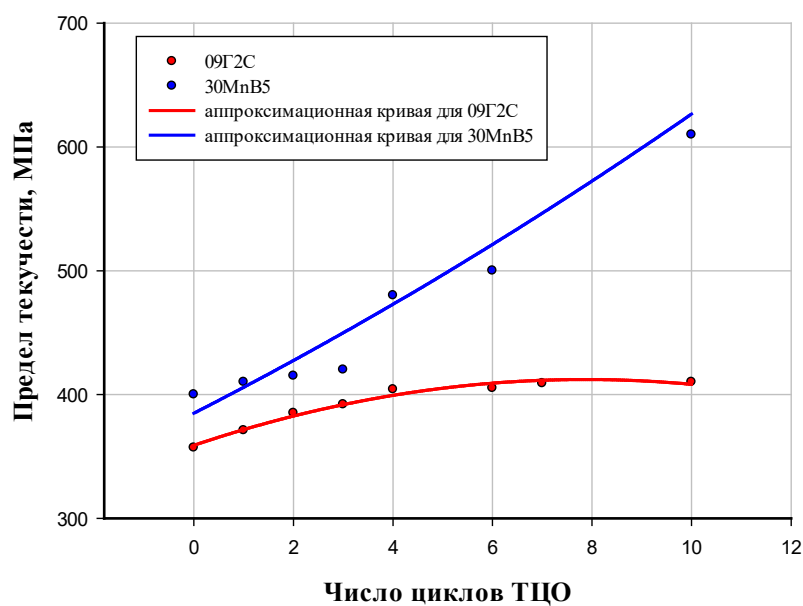
интервал необходимо оговаривать определенную условность прогнозируемых результатов.

Зависимости $d = f(N)$ описываются следующими аппроксимационными соотношениями, полученными при обработке данных в программе Sigma Plot. Здесь и далее для каждого соотношения приведено значение коэффициента регрессии R .

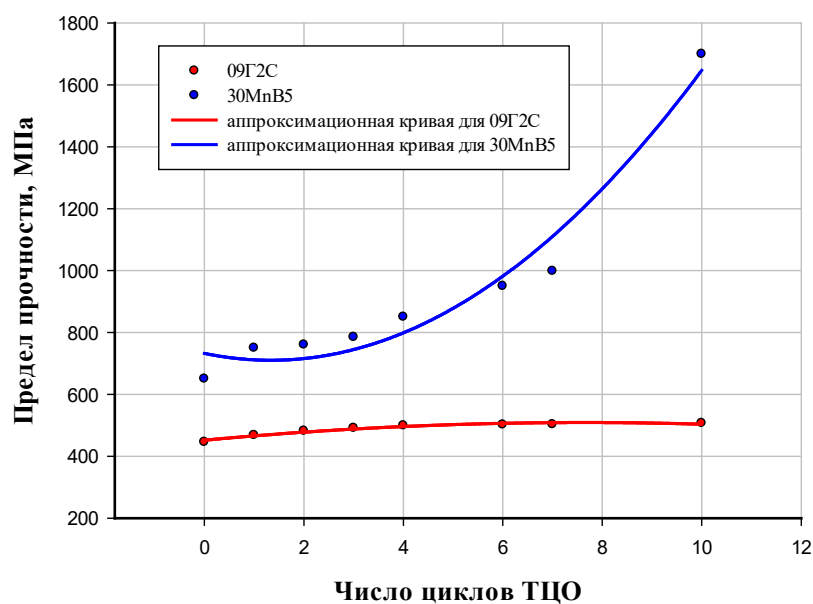
- Общий вид: $d = d_0 + a \cdot e^{-bN}$.
- Сталь 09Г2С: $d_0 = 8,735$ мкм; $a = 22,965$ мкм; $b = 0,978$; $R = 0,99$.
- Сталь 30MnB5: $d_0 = 3,237$ мкм; $a = 15,456$ мкм; $b = 0,476$; $R = 0,95$.

Рассмотрим зависимости предела текучести и предела прочности исследуемых сталей от числа циклов термической обработки.

На рисунке 5 приведены зависимости $\sigma_{0,2} = f(N)$ (рисунок 5, а) и $\sigma_b = f(N)$ (рисунок 5, б).



а



б

Рисунок 5 – Зависимости $\sigma_{0,2} = f(N)$ и $\sigma_b = f(N)$ Figure 5 – Functions $\sigma_{0,2} = f(N)$ and $\sigma_b = f(N)$

Общий вид аппроксимационных зависимостей функций $\sigma_{0,2} = f(N)$ и $\sigma_b = f(N)$ следующий:

– общий вид для предела текучести:

$$\sigma_{0,2} = \sigma_{0,2}^0 + a_{0,2}N + b_{0,2}N^2;$$

– общий вид для предела прочности:

$$\sigma_b = \sigma_b^0 + a_b N + b_b N^2.$$

Коэффициенты, входящие в данные соотношения, имеют следующие численные значения:

– сталь 09Г2С: $\sigma_{0,2}^0 = 358,97$ МПа;

$a_{0,2} = 13,52$ МПа; $b_{0,2} = -0,86$ МПа; $R = 0,99$;

$\sigma_b^0 = 451,83$ МПа; $a_b = 14,96$ МПа;

$b_b = -0,98$ МПа; $R = 0,98$;

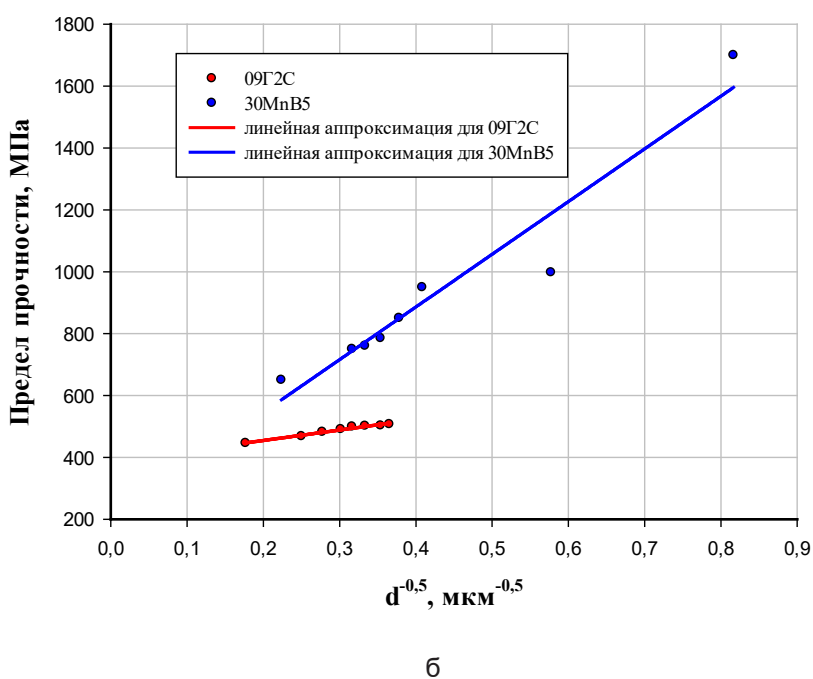
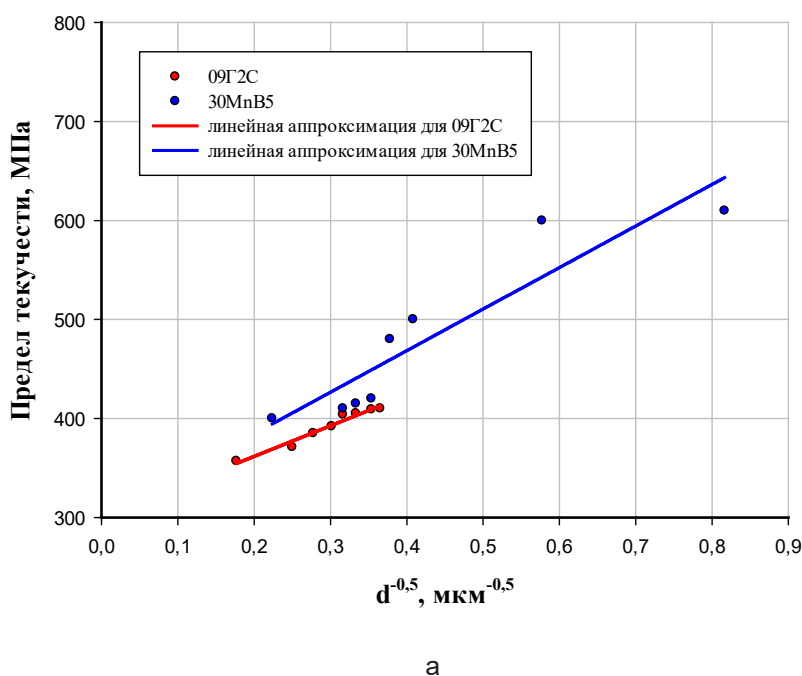


Рисунок 6 – Зависимости $\sigma_{0,2} = f(d^{-0.5})$ и $\sigma_b = f(d^{-0.5})$

Figure 6 – Dependences $\sigma_{0,2} = f(d^{-0.5})$ and $\sigma_b = f(d^{-0.5})$

– сталь 30MnB5: $\sigma_{0,2}^0 = 384,87$ МПа; $a_{0,2} = 20,55$ МПа; $b_{0,2} = 0,36$ МПа; $R = 0,95$; $\sigma_{0,2}^0 = 732,43$ МПа; $a_b = -33,34$ МПа; $b_b = 12,48$ МПа; $R = 0,98$.

Полученные зависимости показывают, что для стали 09Г2С изменения предела текучести и предел прочности заканчиваются после четвертого цикла термической обработки. Аналогичные характеристики для стали 30MnB5 показывают постоянное увеличение вплоть до 10-го цикла. Данный вывод совпадает с результатом исследования зависимости среднего размера зерна от числа циклов. Необходимо отметить, что при дальнейшем увеличении числа циклов для стали 30MnB5, несмотря на явное стремление пределов текучести и прочности к дальнейшему росту при числе циклов больше 10, не следует ожидать существенно-го прироста. Зависимость среднего размера зерна d от количества N циклов термоциклической обработки для этой стали показывает, что параметр d достаточно близок к своему минимальному значению (см. рисунок 5).

Проверка выполнения соотношения Холла–Петча, которое связывает предел текучести и предел прочности поликристаллического материала с размером зерна дала следующие результаты. На рисунке 6 приведены зависимости $\sigma_{0,2} = f(d^{0,5})$ (рисунок 6, а) и $\sigma_b = f(d^{0,5})$ (рисунок 6, б).

Общий вид аппроксимационных зависимостей функций $\sigma_{0,2} = f(d^{0,5})$ и $\sigma_b = f(d^{0,5})$ следующий:

– общий вид: $\sigma_{0,2} = \sigma_{0,2}^0 + a_{0,2}d^{-0,5}$;
 $\sigma_b = \sigma_b^0 + a_b d^{-0,5}$;

– сталь 09Г2С: $\sigma_{0,2}^0 = 299,90$ МПа; $a_{0,2} = 309,11$ МПа·мкм^{0,5}; $R = 0,98$; $\sigma_b^0 = 387,05$ МПа; $a_b = 337,68$ МПа·мкм^{0,5}; $R = 0,99$;

– сталь 30MnB5: $\sigma_{0,2}^0 = 300,57$ МПа; $a_{0,2} = 419,89$ МПа·мкм^{0,5}; $R = 0,92$; $\sigma_b^0 = 204,91$ МПа; $a_b = 1703,59$ МПа·мкм^{0,5}; $R = 0,96$.

Зависимость предела текучести от размера зерна $\sigma_{0,2} = f(d^{0,5})$ имеет линейный характер, что подтверждается достаточно высокими значениями коэффициента регрессии R . Следовательно, для данных материалов соотношение Холла–Петча выполняется. В [24, 25] сказано, что соотношение Холла–Петча справедливо и для твердости, величина которой связана со значением предела прочности. Линейный характер зависимости $\sigma_b = f(d^{0,5})$, представленный на рисунке 6, б, подтверждает данное утверждение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования влияния количества циклов термической обработки сталей 09Г2С и 30MnB5 показали следующее. С увеличением числа циклов структура стали 09Г2С практически не изменяет значение среднего размера зерна начиная с четвертого цикла. Средний размер зерна у стали 30MnB5 уменьшается вплоть до десятого цикла. Существует прямая зависимость уровня пределов пластичности и прочности от среднего размера зерна, а следовательно, и от количества циклов термического воздействия «нагрев–охлаждение». Чем мельче зерно, тем выше механические характеристики. Иными словами, полученные данные свидетельствуют о выполнении соотношения Холла–Петча. Причем этот вывод относится как к пределу текучести, так и к пределу прочности.

Полученные корреляционные зависимости достаточно близки с экспериментальными результатами. Коэффициент корреляции для всех зависимостей лежит в пределах от 0,92 до 0,99.

Таким образом, сталь 30MnB5 с точки зрения эксплуатационных характеристик дорожно-строительных машин предпочтительнее стали 09Г2С.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щербаков А.П., Пушкарев А.Е., Манвелова Н.Е. Рабочие механизмы строительных машин и способы технологического обеспечения прочности сварных соединений из высокопрочных сталей // Недвижимость: экономика, управление. 2020. № 1. С. 63–68.
2. Мухаметшина Р.М. Отказы дорожно-строительных машин по параметрам коррозии // Известия КазГАСУ. 2013. № 4 (26). С. 62–67.
3. Щербаков А.П. Выбор материала и метода повышения износостойкости элементов строительных машин // Вестник СибАДИ. 2020. № 17 (4). С. 464–475. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-464-475>.
4. Щербаков А.П. Экспериментальные исследования влияния термической обработки на свойства сварных соединений рабочих механизмов дорожно-строительных машин // Вестник СибАДИ. 2020. №17(6). С. 664-675. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-665-675>.
5. Гордиенко В.Е., Трунова Е.В., Абросимова А.А., Шананина Н.В. Пассивный феррозондовый контроль длительно эксплуатируемых сварных металлоконструкций с коррозионными повреждениями // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 3 (56). С. 193–197.
6. I. Polyansky, I. Sizov, U. Mishigdorzhyn, V. Butukhanov. Improvement of the heat resistance

of carbon steels by thermocycling thermochemical treatment with self-protective pastes based on boron carbide and aluminum // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 116: 1-5.

7. Гордиенко В.Е., Абросимова А.А., Трунова Е.В., Щербаков А.П. К выбору конструкционных сталей для изготовления сварных металлических конструкций строительных машин // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6 (65). С. 233–238.

8. Floreen S., Hayden H.W. The deformation and fracture of stainless steels having microduplex structures (Deformation characteristics and fracture strength of Cr-Ni stainless steels with fine scale two-phase ferrite plus austenite microstructures) // ASM Transactions Quarterly. 1968. 61: 489–499.

9. Березина А.А. Некоторые особенности оценки структурной и механической неоднородности сварных соединений металлических конструкций строительных машин // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 4 (51). С. 123–127.

10. Мыльников В.В. Влияние частоты нагружения на усталость конструкционных материалов // Наука и техника. 2019. № 5. С. 52–55.

11. Прохоров В.Ю., Быков В.В. Пути повышения долговечности и износостойкости подшипника скольжения навесного технологического оборудования // НиКа. 2017. № 1. С. 71–74.

12. Гордиенко В.Е., Абросимова А.А., Трунова Е.В. Влияние термоциклической обработки на структурные изменения пластически деформированных сварных соединений металлических конструкций строительных машин // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 2 (55). С. 174–180.

13. Безлюдько Г.Я., Мужичкий В.Ф., Попов Б.Е. Магнитный контроль (по коэрцитивной силе) НДС и остаточного ресурса стальных МК // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1999. № 9. Т. 65. С. 53–57.

14. Гордиенко В.Е., Абросимова А.А., Кузьмин О.В., Трунова Е.В., Щербаков А.П. Влияние термической и термоциклической обработки на механические свойства конструкционных сталей // Вестник гражданских инженеров. 2018. №1 (66). С. 128–133.

15. Зайцев А.И. Перспективные направления развития металлургии и материаловедения стали // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 4. С. 417–426.

16. Гордиенко В.Е., Абросимова А.А., Трунова Е.В., Корнеева Е.А., Щербаков А.П. Влияние структурных параметров конструкционных сталей на результаты оценки напряженно-деформированного состояния сварных металлоконструкций // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 6 (59). С. 194–199.

17. Morrison W.B. Superplasticity of low-alloy steels // ASM Transactions Quarterly. 1968. Vol. 61. № 3. Pp. 423–434.

18. Ведяков И.И., Одесский П.Д. Современные отечественные стандарты и вопросы расширения применения металлических конструкций в строительстве // Вестник НИЦ «Строительство». 2019. № 3 (22). С. 42–53.

19. Гордиенко В.Е., Абросимова А.А., Трунова Е.В. Влияние термоциклической обработки на структурные изменения пластически деформированных сварных соединений металлических конструкций строительных машин // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 2 (55). С. 174–180.

20. Ведяков И.И., Одесский П.Д., Гуров С.В. Обеспечение прочности сварных соединений для уникальных конструкций из проката больших толщин повышенной и высокой прочности // Строительная механика и расчет сооружений. 2018. № 2 (277). С. 68–75.

21. Густов Ю.И., Орехов А.А. Исследование конструкционно-технологических и эксплуатационных показателей строительной техники // Известия КазГАСУ. 2014. № 4 (30). С. 19–24.

22. Мухаметшина Р.М. Влияние климатических факторов на свойства материалов и надежность дорожно-строительных машин // Известия КазГАСУ. 2014. № 4 (30). С. 102–108.

23. Мешков Ю.Я., Котречко С.А., Шиян А.В. Роль прочности и механической стабильности в оценке конструкционного качества сталей // Вісник ПДАБА. 2013. № 5 (182). С. 62–68.

24. Бубликов Ю.А. Основные направления повышения свойств конструкционных сталей феррито-перлитного класса // ВЕЖПТ. 2014. № 11 (72). С. 81–82.

25. Зайцева М.М., Мегера Г.И., Касьянов Д.Н. Проблема долговечности деталей грузовых автомобилей // ИВД. 2017. № 2 (45). С. 71–75.

REFERENCES

1. Scherbakov A.P., Pushkarev A.E., Manvelova N.E. Rabochie mekhanizmy stroitel'nyh mashin i sposoby tekhnologicheskogo obespecheniya prochnosti svarnykh soedinenij iz vysokoprochnykh stalej [Working mechanisms of construction machines and methods of technological ensuring the strength of welded joints made of high-strength steels]. *Nedvizhimost': ekonomika, upravlenie – Real estate: Economics, management*, 2020, 1: 63–68. (In Russian)

2. Mukhametshina R.M. Otkazy dorozhno-stroitel'nyh mashin po parametram korrozii [Failures of road construction machines in terms of corrosion parameters]. *Izvestiya KazGASU. – News of the University*, 2013, no. 4 (26): 62–67. (In Russian)

3. Scherbakov A.P. Vybor materiala i metoda povysheniya iznosostojkosti elementov stroitel'nyh mashin [Material and method selection for increasing the wear resistance of construction machines components] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020. № 17 (4). <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-464-475>. (In Russian)

4. Scherbakov A.P. Eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya termicheskoy obrabotki na svoystva svarnykh soedinenij rabochih mekhanizmov dorozhno-stroitel'nyh mashin // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020;17(6):664-675. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-665-675>. (In Russian)

5. Gordienko V.E., Trunova E.V., Abrosimova A.A., Shananina N.V. Passivnyy ferrozondovyy kontrol'ditel'no ehkspluatiruemykh svanykh metallokonstruktsiy s korrozionnymi povrezhdeniyami [Passive ferrosonde monitoring of long-term operation of welded metal structures with corrosion damage]. *Vesnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 3 (56): 193–197. (In Russian)
6. Polyansky, I. Sizov, U. Mishigdorzhyn, V. Butukhanov. Improvement of the heat resistance of carbon steels by thermocycling thermochemical treatment with self-protective pastes based on boron carbide and aluminum // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 116: 1-5.
7. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Trunova E.V., Scherbakov A.P. K vyboru konstrukcionnyh staley dlya izgotovleniya svarnykh metallicheskih konstrukcij stroitel'nyh mashin [To the choice of structural steels for the manufacture of welded metal structures of construction machines]. *Vesnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 6 (65): 233–238. (In Russian)
8. Floreen S., Hayden H.W. The deformation and fracture of stainlees steels having microduplex structures (Deformation characteristics and fracture strength of Cr-Ni stainless steels with fine scale two phase ferrite plus austenite microstructures). *ASM Transactions Quarterly*, 1968, vol. 61:489–499.
9. Berezina A.A. Nekotorye osobennosti ocenki strukturnoj i mekhanicheskoy neodnorodnosti svarnykh soedinenij metallicheskih konstrukcij stroitel'nyh mashin [Some features of evaluation of structural and mechanical heterogeneity of welded joints of metal structures of construction machines]. *Vesnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2015, no. 4 (51): 123–127. (In Russian)
10. Mylnikov V.V. Vliyanie chastoty nagruzheniya na ustalost' konstrukcionnykh materialov [Influence of loading frequency on fatigue of structural materials]. *Nauka i tekhnika – Science and Engineering*, 2019, 5: 52–55. (In Russian)
11. Prokhorov V.Yu., Bykov V.V. Puti povysheniya dolgovechnosti i iznosostojkosti podshipnika skol'zheniya navesnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya [Ways to increase the durability and wear resistance of the sliding bearing of mounted technological equipment]. *NiKa*, 2017, 1: 71–74. (In Russian)
12. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Trunova E.V. Vliyanie termociklicheskoj obrabotki na strukturnye izmeneniya plasticheski deformirovannykh svarnykh soedinenij metallicheskih konstrukcij stroitel'nyh mashin [Influence of thermocyclic processing on structural changes of plastically deformed welded joints of metal structures of construction machines]. *Vesnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, 2 (55): 174–180. (In Russian)
13. Bezlyudko G.Ya., Muzhitskiy V.F., Popov B.E. Magnitnyj kontrol' (po koercitivnoj sile) NDS i ostatochnogo resursa stal'nyh MK [Magnetic control (by coercive force) VAT and residual resource of steel MK]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Factory laboratory. Diagnostics of materials*. 1999, 9 (65): 53–57. (In Russian)
14. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Kuz'min O.V., Trunova E.V., Scherbakov A.P. Vliyanie termicheskoy i termociklicheskoj obrabotki na mekhanicheskie svoystva konstrukcionnyh staley [Influence of thermal and thermocyclic treatment on the mechanical properties of structural steels]. *Vesnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2018, no.1 (66):128–133. (In Russian)
15. Zajtsev A.I. *Perspektivnye napravleniya razvitiya metallurgii i materialovedeniya stali* [Promising areas of development of metallurgy and materials science of steel]. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informacii. – Journal of Iron and Steel. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*, 2019, 75(4): 417–426. (In Russian)
16. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Trunova E.V., Korneeva E.A., Scherbakov A.P. Vliyanie strukturnykh parametrov konstrukcionnyh staley na rezul'taty ocenki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya svarnykh metallokonstrukcij [Influence of structural parameters of structural steels on the results of stress-strain state assessment of welded metal structures]. *Vesnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, 6 (59): 194–199. (In Russian)
17. Morrison W. B. Superplasticity of low-alloy steels // *ASM Transactions Quarterly*, 1968, 61(3): 423–434.
18. Vedyakov I.I., Odesskiy P.D. *Sovremennyye otechestvennyye standarty i voprosy rasshireniya primeneniya metallicheskih konstrukcij v stroitel'stve* [Modern domestic standards and issues of expanding the use of metal structures in construction]. *Vestnik NIC "Stroitel'stvo" – Bulletin of SIC "Construction"*, 2019, 3 (22): 42–53. (In Russian)
19. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Trunova E.V. Vliyanie termociklicheskoj obrabotki na strukturnye izmeneniya plasticheski deformirovannykh svarnykh soedinenij metallicheskih konstrukcij stroitel'nyh mashin [Influence of thermocyclic treatment on structural changes of plastically deformed welded joints of metal structures of construction machines]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, 2 (55): 174–180. (In Russian)
20. Vedyakov I.I., Odesskiy P.D., Gurov S.V. Obespechenie prochnosti svarnykh soedinenij dlya unikal'nykh konstrukcij iz prokata bol'shih tolshchin povyshennoj i vysokoj prochnosti [Ensuring the strength of welded joints for unique structures made of rolled products of large thicknesses increased and high strength]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij – Construction mechanics and calculation of structures*, 2018, 2 (277): 68–75. (In Russian)
21. Gustov Yu.I., Orekhov A.A. Issledovanie konstrukcionno-tehnologicheskikh i ehkspluatacionnykh pokazatelej stroitel'noj tekhniki [Research of structural-technological and operational indicators of construction equipment]. *Izvestiya KazGASU – News of the University*, 2014, 4 (30):19–24. (In Russian)
22. Mukhametshina R.M. Влияние климатических факторов на свойства материалов и надежность дорожно-строительных машин [Influence of climat-

ic factors on the properties of materials and reliability of road construction machines]. *Izvestiya KazGASU – News of the University*, 2014, 4 (30): 102–108. (In Russian)

23. Meshkov Yu.Ya., Kotrechko S.A., Shiyan A.V. Rol' prochnosti i mekhanicheskoy stabil'nosti v ocenke konstrukcionnogo kachestva stalej [The Role of Strength and Mechanical Stability in Evaluating the Structural Quality of Steels]. *Visnik PDABA*, 2013, 5 (182): 62–68. (In Russian)

24. Bublikov Yu.A. Основные направления повышения свойств конструкционных сталей феррито-перлитного класса [Main directions of improving the properties of structural steels of ferrite-perlite class]. *VEZHPT*, 2014, 11 (72): 81–82. (In Russian)

25. Zaitseva M.M., Megera G.I., Kasyanov D.N. Problema dolgovechnosti detalej gruzovyh avtomobilej [The problem of durability of truck parts]. *IVD*, 2017, 2 (45): 71–75. (In Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Щербakov А.П. Формирование направления исследования, формулировка цели и задач, обозначение алгоритма исследований, анализ результатов, обоснование и структурирование методики расчета (60%).

Пушкарёв А.Е. Обзор основных направлений эксплуатации дорожно-строительных машин (20%).

Виноградова Т.В. Описание материалов и методов для расчета параметров конструкций (20%).

AUTHORS' CONTRIBUTION

Alexander P. Scherbakov – the research direction statement, goals and objectives statement, the research algorithm determination, analysis of results, justification and structuring of the calculation method (60%).

Alexandr E. Pushkarev – overview of the main directions of road construction machinery operation (20%).

Tamara V. Vinogradova – description of materials and methods for calculating structural parameters (20%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Щербakov Александр Павлович – аспирант, ORCID.org/0000-0002-2454-7751, Scopus Author ID 57212375284, Researcher ID AAP-8095-2020, accu-

стент кафедры судебных экспертиз ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4; тел. +79675912967; e-mail: shurbakov.aleksandr@yandex.ru).

Пушкарёв Александр Евгеньевич – д-р техн. наук, ORCID.org/0000-0001-5546-015X, Scopus Author ID8290951800, Researcher ID E-4532-2019, проф. кафедры наземных транспортно-технологических машин ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4; e-mail: pushkarev-agn@mail.ru).

Виноградова Тамара Владимировна – канд. техн. наук, ORCID.org/0000-0001-8475-7155 доц. кафедры наземных транспортно-технологических машин ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4; e-mail: tvin-205@yandex.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander P. Scherbakov (Saint-Petersburg) – Postgraduate Student, ORCID.org/0000-0002-2454-7751, Scopus author ID 57212375284, Researcher ID AAP-8095-2020, Postgraduate of the Forensics Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (190005, Saint-Petersburg, 4 Vtoraia Krasnoarmeiskaia st., phone +79675912967, e-mail: shurbakov.aleksandr@yandex.ru).

Alexandr E. Pushkarev (Saint-Petersburg) – Dr. of Sci., ORCID.org/0000-0001-5546-015X, Scopus Author ID8290951800, Researcher ID E-4532-2019, Professor of the Technological Machines Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (190005, Saint-Petersburg, 4 Vtoraia Krasnoarmeiskaia st., e-mail: pushkarev-agn@mail.ru).

Tamara V. Vinogradova (Saint-Petersburg) – Cand. of Sci., Associate ORCID.org/0000-0001-8475-7155 Professor of the Technological Machines Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (190005, Saint-Petersburg, 4 Vtoraia Krasnoarmeiskaia st., e-mail: tvin-205@yandex.ru).

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОВЕРХНОСТИ СИСТЕМЫ ВЫПУСКА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ

М.Г. Бояршинов, Н.И. Кузнецов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются причины образования повышенного количества конденсата в системе выпуска отработавших газов автомобиля при пониженной температуре окружающего воздуха. Поскольку скорость движения автомобиля – один из факторов, определяющих нагрев системы выпуска и образование конденсата, выполнено экспериментальное исследование по определению температуры элементов системы выпуска отработавших газов при различных скоростях движения автомобиля. Цель данного исследования: установить особенности изменения температуры отдельных элементов системы выпуска отработавших газов в зависимости от времени при различной скорости движения автомобиля.

Материалы и методы. Последовательность проведения экспериментального исследования состояла в запуске «холодного» двигателя, производился разгон автомобиля и далее движение автомобиля с постоянной скоростью в течение 20 мин. Одновременно с запуском двигателя регистрировалась температура элементов системы выпуска отработавших газов. В работе для измерения температуры поверхности системы выпуска использовались термопары. Экспериментальные исследования проводились на автомобиле Toyota Camry с бензиновым двигателем в климатических условиях Пермского края.

Результаты. Были получены зависимости температуры элементов системы выпуска от времени при различной скорости движения автомобиля. В экспериментальном исследовании установлено, что температура элементов системы выпуска отработавших газов устанавливается в течение 8–12 мин с начала движения автомобиля при постоянной скорости; задний глушитель имеет наибольшую вероятность образования конденсата.

Обсуждение и заключение. Выполнен анализ особенностей изменения температуры системы выпуска отработавших газов при движении автомобиля в условиях пониженной температуры окружающего воздуха. Установленные закономерности могут быть использованы для получения информации о процессах накопления конденсата в системе выпуска отработавших газов и направлены на прогнозирование количества накопления конденсата в системе выпуска отработавших газов; на разработку новых решений, обеспечивающих надежную работу системы выпуска.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система выпуска, отработанные газы, температурный режим, конденсат, постоянная скорость движения.

Поступила 13.02.21, принята к публикации 29.04.21.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Бояршинов М.Г. Влияние скорости движения автомобиля на температуру поверхности системы выпуска отработавших газов/ М.Г. Бояршинов, Н.И. Кузнецов. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-192-202> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 2(78). – С. 192-202.

© Бояршинов М.Г., Кузнецов Н.И., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-192-202>

VEHICLE SPEED INFLUENCE ON EXHAUST SYSTEM SURFACE TEMPERATURE

Mikhail G. Boiarshinov, Nikita I. Kuznetsov
Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russia

ABSTRACT

Introduction. The reasons for the formation of an increased amount of condensate in the exhaust system of a car at a low ambient temperature are considered. Since the speed of the vehicle is one of the factors that determine the heating of the exhaust system and the formation of condensation, an experimental study was carried out to determine the temperature of the elements of the exhaust system at various vehicle speeds. The purpose of this study: to establish the features of the temperature change of individual elements of the exhaust system, depending on time at different vehicle speeds

Materials and methods. The sequence of the experimental study consisted of starting the "cold" engine, accelerating the car and then moving the car at a constant speed for 20 minutes. Simultaneously with the start of the engine, the temperature of the elements of the exhaust system was recorded. In this study, thermocouples were used to measure the surface temperature of the exhaust system. Experimental studies were carried out on a Toyota Camry with a gasoline engine in the climatic conditions of the Perm Territory.

Results. The dependences of the temperature of the exhaust system elements on time were obtained at different speeds. In an experimental study, it was found that the temperature of the elements of the exhaust system is established within 8-12 minutes from the start of the vehicle at a constant speed; the rear muffler has the least surface heating, and therefore the greatest probability of the formation and accumulation of condensate.

Discussion and conclusion. The analysis of the peculiarities of the change in the temperature of the exhaust system during the movement of the vehicle in conditions of low ambient temperature is carried out. The established patterns can be used to obtain information on the processes of condensate accumulation in the exhaust system and are aimed at predicting the amount of condensate accumulation in the exhaust system; to develop new solutions to ensure reliable operation of the exhaust system.

KEYWORDS: exhaust system, exhaust gases, temperature, condensate, constant speed of movement.

Submitted 13.02.21, revised 28.04.21.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Boyarshinov M.G., Kuznetsov N.I. Vehicle speed influence on exhaust system surface temperature. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (2): 192-202. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-192-202>

© Boiarshinov M.G., Kuznetsov N.I., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

При прогреве двигателя в холодных зимних условиях стенки системы выпуска автомобиля остаются холодными, и водяной пар, движущийся вдоль системы с горячими отработавшими газами, конденсируется на холодной внутренней поверхности системы выпуска. Так происходит образование конденсата в системе выпуска отработавших газов [1, 2].

Частые прогревы двигателя в течение относительно коротких периодов, эксплуатация в режиме коротких поездок и последующая длительная стоянка при температуре воздуха ниже 0°C имеет определенные риски, поскольку в зависимости от конструктивных особенностей системы выпуска отработавших газов возможно накопление и замерзание конденсата внутри системы выпуска [3, 4, 5, 6, 7, 8], и, как следствие, в этих условиях двигатель не запустится. Также постоянное наличие конденсата на стенках системы выпуска приводит к интенсивной коррозии деталей системы выпуска отработавших газов: глушителя и резонатора [9, 10, 11, 12]. Сварочные работы по ремонту деталей системы выпуска проводятся, когда есть целесообразность и надежность выполнения этих работ.

Концерн Фольксваген в руководстве по эксплуатации автомобиля пишет, что двигатель не может прогреться на холостом ходу, поэтому движение на автомобиле нужно начинать сразу же после его запуска. В руководстве прописано, что двигатель автомобиля не может прогреться на холостом ходу, не ранее чем через 4 км двигатель достигает рабочей температуры, и расход топлива нормализуется; а после пробега около 20 км транспортное средство достигает состояния рабочей нормы. Можно сделать вывод, что для нормальной эксплуатации автомобиля следует избегать поездок на короткие расстояния.

Накопление конденсата, как правило, не происходит, если выхлопная система прогрета до рабочих температур. Такой нагрев достигается при движении на большие расстояния и в высокоскоростных зонах, где двигатель и его системы работают при средних и номинальных нагрузках.

Согласно государственной программе «Социально-экономическое развитие Арктической

зоны Российской Федерации» для обеспечения рабочего процесса потребуются, чтобы автомобильный транспорт работал в условиях отрицательных температур продолжительное время, с любой интенсивностью эксплуатации, без накопления конденсата, приводящего к ограничению эксплуатации машин.

Производители компонентов систем выпуска автомобилей и автопроизводители публикуют в различных формах информацию об особенностях эксплуатации автомобилей в условиях мегаполиса и о явлении накопления конденсата в глушителе автомобиля¹. Практически все автопроизводители указывают, что конденсат в глушителе – это нормальное явление, и что водителю необходимо больше уделять внимания этому процессу.

Собрана статистика отказов запуска двигателя из-за блокировки системы выпуска отработавших газов накопившимся конденсатом. Такие автомобили, как Volkswagen Polo Sedan (2010-Н.В.), Hyundai Solaris (2011- Н.В.), Hyundai Getz (2002–2011), Renault Duster (2009-Н.В.), Skoda Octavia (2013-), Toyota Rav4 (2005-), Audi A3 (2012-...), Audi Q7 (2008-2015), Volkswagen Touareg (2006–2017) подвержены блокировке системы выпуска отработавших газов. Контактные лица дилерских автоцентров по обслуживанию и ремонту автомобилей предоставили информацию, что ежегодно в зимний период наблюдается не менее нескольких автомобилей с проблемой блокировки системы выпуска отработавших газов. Проблема наблюдается во всех городах, где температура воздуха опускается ниже нуля градусов на продолжительное время.

Созданы судебные прецеденты² с проблемой отсутствия запуска двигателя при отрицательных температурах воздуха по причине блокирования выхода отработавших газов из системы выпуска вследствие замерзания воды в резонаторе. Суд решил, что установленный производственный недостаток не позволяет использовать данное транспортное средство по назначению в условиях отрицательных температур без изменения конструкции системы выпуска отработанных газов на заводе-изготовителе.

Постоянное наличие конденсата на стенках системы выпуска приводит к интенсив-

¹ Ford Mondeo 3. Руководство по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту. Бензиновые двигатели. [Текст] / Серия: «Автомобиль», Ассоциация независимых издателей, 2004. – 305 с.

² Решение суда № 2-6/2011 от 13 апреля 2011 г. по делу № 2-6/2011 Курчатковский районный суд г. Челябинска [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://sudact.ru/regular/doc/p7OrtXeRoBdy/> (дата обращения: 15.02.2017).

ной коррозии деталей системы выпуска отработавших газов: глушителя и резонатора. По результатам проведенных исследований³ отмечается, что дефекты выхлопных систем составляют третью часть от общего числа дефектов машин, пришедших в ремонт. Восстановление работоспособности выхлопных систем на ремонтных предприятиях в настоящее время осуществляют сваркой либо заменой части элемента.

Учитывая, что большая часть территории России расположена в зонах, где умеренный и холодный климат, влияние факторов и условий эксплуатации на количество накапливания конденсата в системе выпуска отработавших газов до сих пор недостаточно изучено, этот вопрос остается без должного внимания водителем. Поэтому изучение описываемого явления, определение закономерностей образования конденсата и разработка на его основе рекомендаций по поддержанию выхлопной системы в исправном состоянии, а также обеспечение надежного запуска двигателя при низких температурах является актуальным и значимым исследованием.

В состав отработавших газов входит вода в парообразном состоянии, образующаяся при сгорании топлива [13] (при работе атмосферного бензинового двигателя образуется более 1,2 кг воды на 1 кг сгоревшего топлива [14, 15]). Кроме того, водяной пар поступает в двигатель вместе с воздухом из атмосферы (до 0,38 кг на 1 кг сгоревшего топлива в зависимости от температуры окружающей среды [13]).

В работе [2] показана зависимость количества воды в выхлопных газах от состава используемой топливно-воздушной смеси. Так, при давлении выхлопных газов 1 бар в стехиометрических условиях массовая доля водяного пара в выхлопных газах составляет 13%, и конденсация воды происходит при температуре, близкой к 52°C. В смеси, которая содержит вдвое больше воздуха, чем необходимо для сгорания топлива, концентрация водяного пара достигает 6%, а точка росы падает до 36°C.

Наиболее высокие значения температуры точки росы соответствуют стехиометрическим условиям, когда избыток воздуха отсутствует, или при избытке топлива, вследствие чего не происходит обеднение топливной смеси. Следовательно, чем на более бедной смеси ра-

ботает двигатель, тем ниже опускается точка росы водяного пара в отработавших газах.

Существуют пределы воспламеняемости горючей смеси, эти пределы выражены коэффициентом избытка воздуха, который, как уже было сказано, влияет на точку росы. Коэффициент избытка воздуха для атмосферного бензинового двигателя находится в диапазоне от 0,65 до 1,5. При некоторых технологиях непосредственного впрыска, таких как GDI и FSI, при применении послойного смесеобразования удается эффективно сжигать бедные смеси с коэффициентом избытка воздуха от 1,6 до 3. Возможные пределы сжигания смеси у дизельных двигателей, при коэффициенте избытка воздуха в диапазоне от 1,1 до 7,0. В зависимости от изменения внешних условий, главным образом начальной температуры, пределы воспламеняемости смесей могут несколько изменяться.

Авторами проводится серия экспериментов по измерению температуры системы выпуска отработавших газов при различных условиях и режимах эксплуатации [16,17]. Очередной этап работы предполагает проведение экспериментальных исследований по измерению температуры деталей выпускного тракта во время движения автомобиля.

Целью настоящего исследования: установить особенности изменения температуры отдельных элементов системы выпуска отработавших газов в зависимости от времени при различной скорости движения автомобиля.

Ранее авторами была проведена серия экспериментов по измерению температуры элементов выхлопной системы при различных температурах окружающего воздуха во время прогрева двигателя на холостом ходу [16].

Известно [18, 19], что для определения расхода топлива и токсичности выхлопных газов транспортных средств применяются методы контроля, которые различаются в программах испытаний и методах отбора проб, используемого измерительного оборудования. В основном используются два типа метода: первый – это испытания с постоянными параметрами работы двигателя; второй – это переходные режимы при изменении этих параметров. Сами испытания проводятся либо в условиях эксплуатации, либо на специальном стенде.

³ Сергеев А. Ю. Восстановление работоспособности теплонагруженных элементов дорожно-строительных машин с использованием полимерных композиционных материалов (на примере систем выпуска отработавших газов) [Текст]: Диссертация ... кандидата технических наук: 05.05.04 / Сергеев Андрей Юрьевич. – Москва, 2016. – 192 с.

Первый метод оценки массы выбросов загрязняющих веществ основан на зависимости количества выбросов загрязняющих веществ от средней скорости движения. Данный подход эффективен для транспортного потока с установившимся режимом движения. Зависимость выбросов от средней скорости определена на основании стендовых испытаний с различными постоянными скоростями.

При втором подходе ездовые испытательные циклы приближены к реальному городскому движению [20, 21]. Действующие российские методики используют типовые ездовые испытательные циклы, применяемые в странах Европейского сообщества. Испытательный ездовой цикл представляет собой набор параметров и последовательностей, с помощью которых предполагается приблизительно описать движение среднестатистического транспортного средства в реальных условиях.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Авторами проведена серия экспериментальных исследований, близкая к первому подходу: определялась температура нескольких характерных точек системы выпуска во время движения автомобиля с постоянной скоростью. Производился запуск двигателя, автомобиль разгонялся и в течение 20 мин двигался с постоянной скоростью. Одновременно с запуском двигателя регистрировалась температура элементов системы выпуска отработавших газов.

Из анализа результатов рассмотренных работ следует, что наиболее приемлемым методом измерения является контактный метод измерения с помощью термопар и термометров сопротивления. В работе по измерению

температуры элементов системы выпуска отработавших газов использовались термопары.

В экспериментальных исследованиях участвовал автомобиль Toyota Camry, оснащенный бензиновым атмосферным двигателем объемом 2,5 л, агрегированный 6-ступенчатой автоматической коробкой передач. По структуре и принципу работы система выпуска полностью соответствует системе выпуска других марок с бензиновым атмосферным двигателем. Система выпуска включает в себя (рисунок 1) выпускной коллектор в сборе с каталитическим нейтрализатором (поз. А), среднюю часть выхлопной системы, состоящую из заднего катализатора и переднего глушителя (поз. Б), средней трубы (поз. В) и заднего глушителя (поз. Г).

Термопары 1–4 установлены на наружной поверхности выхлопной системы (рисунок 2). Термопары 5 и 6 установлены внутри выхлопной системы для непосредственного измерения температуры выхлопных газов.

Условия проведения экспериментального исследования по измерению температуры элементов выпускного тракта:

- движение автомобиля производилось с постоянной скоростью 20, 40, 60, 80 и 100 км/ч;
- движение производилось на 4-й передаче коробки передач, частота вращения коленчатого вала двигателя во время движения с постоянной скоростью составляла 20 км/ч – 1000 об/мин, 40 км/ч – 1250 об/мин, 60 км/ч – 1750 об/мин, 80 км/ч – 2500 об/мин и 100 км/ч – 3000 об/мин;
- начальная температура двигателя и охлаждающей жидкости соответствовала температурам окружающего воздуха, равным -8°C и -9°C ;

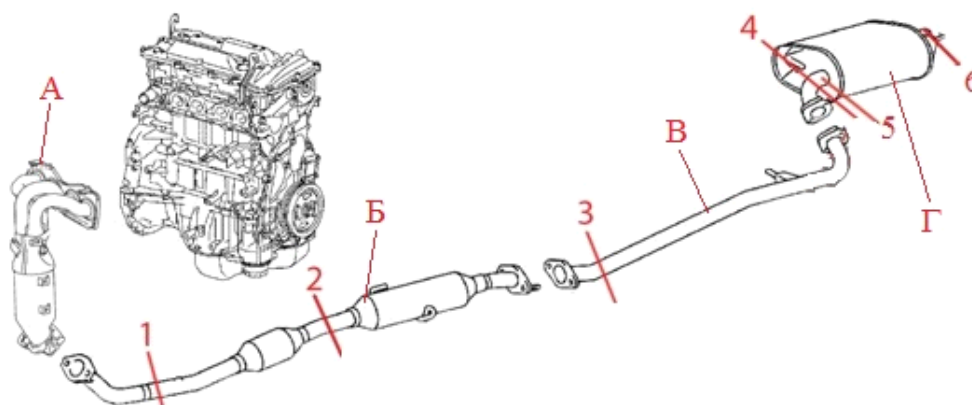


Рисунок 1 – Схема размещения термопар на поверхности элементов системы выпуска отработавших газов (описание приведено в тексте)

Fig. 1 – Layout of thermocouples on the surface of the elements of the exhaust system (Description is given in the text)

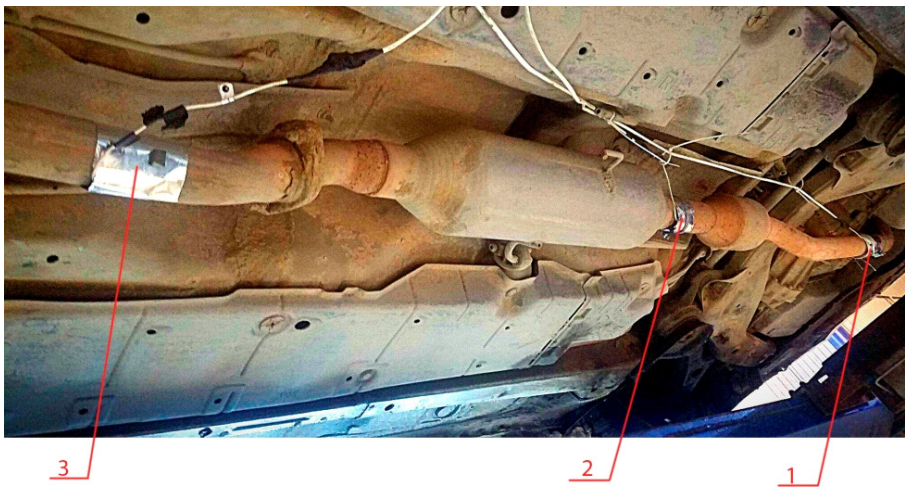


Рисунок 2 – Размещение термоэлементов на системе выпуска отработавших газов; номера термопар соответствуют схеме на рисунке 2

Figure 2 – Layout of thermocouples on the exhaust system; the numbers of thermocouples correspond to the circuit in Fig. 2

Таблица 1
Условия проведения экспериментальных исследований

Table 1
Experimental conditions

№ испытания	Скорость движения, км/ч	Температура воздуха, °C
1	20	-8
2	40	-9
3	60	-8
4	80	-8

- продолжительность этапа каждой поездки 20 мин;
- при движении автомобиля с установленными скоростями коэффициент избытка воздуха во время эксперимента составлял $\alpha = 1,1\text{--}1,15$ (согласно показаниям сканера OBD2).

В таблице 1 показаны условия проведения экспериментов по измерению температуры элементов системы выпуска отработавших газов. Экспериментальные исследования проводились в климатических условиях г. Краснокамска Пермского края. Маршрут движения во время эксперимента представлен на рисунке 3.

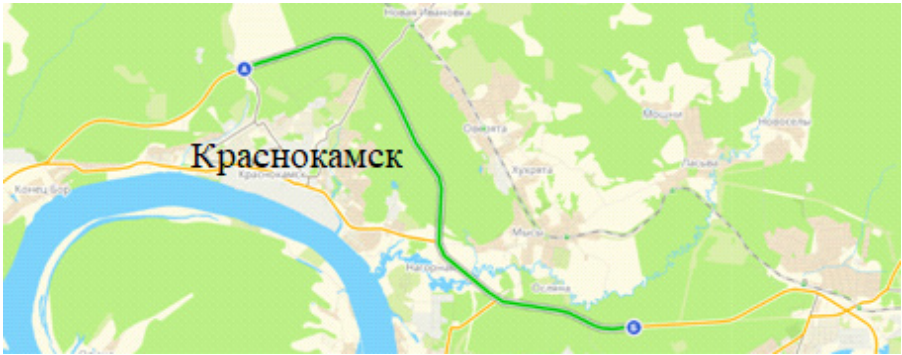


Рисунок 3 – Маршрут движения протяженностью 30 км при проведении экспериментального исследования (объездная автодорога Краснокамск–Пермь)

Figure 3 – 30 km driving route during experimental research (Krasnokamsk-Perm bypass road)

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты измерения температуры элементов системы выпуска отработавших газов в контрольных точках 1–4, при различной скорости движения автомобиля, представлены на рисунках 4 и 5.

Результаты измерений показывают, что временная зависимость температуры элементов системы выпуска отработавших газов при различных скоростях транспортного средства носит похожий характер. При скорости 40, 60, 80 км/ч во всех точках измерения 1–4 на начальном этапе происходит интенсивное повышение температуры, которое затем снижается и устанавливается на практически стационарных значениях с незначительной осцилляцией. На скорости 20 км/ч термопары 1–4 фиксируют практически монотонное повышение температуры до установившихся значений при отсутствии ярко выраженного максимума.

Следует отметить влияние величины скорости движения автомобиля на температуру нагрева поверхности выхлопной системы:

наименьший прогрев системы наблюдается при скорости до 20 км/ч. При увеличении скорости движения автомобиля наблюдается повышение температуры элементов системы выпуска, что связано с увеличением нагрузки на двигатель, частоты вращения коленчатого вала и, соответственно, увеличения объема и интенсивности поступления горячих отработавших газов в систему выпуска.

При скорости 20 км/ч выход на стационарное значение температуры поверхности в контрольных точках системы выпуска 1, 2, 4 наблюдается примерно через 12 мин после начала движения. При увеличении скорости движения до 40 км/ч выход на стационарную температуру наблюдается через 9 мин после начала движения, при скорости 60 км/ч – через 8 мин, и, наконец, при скорости 80 км/ч – через 11 мин.

Анализ представленных данных показывает, что в области установки 1-й термопары температуры устанавливаются практически на близких значениях при всех скоростях движения.

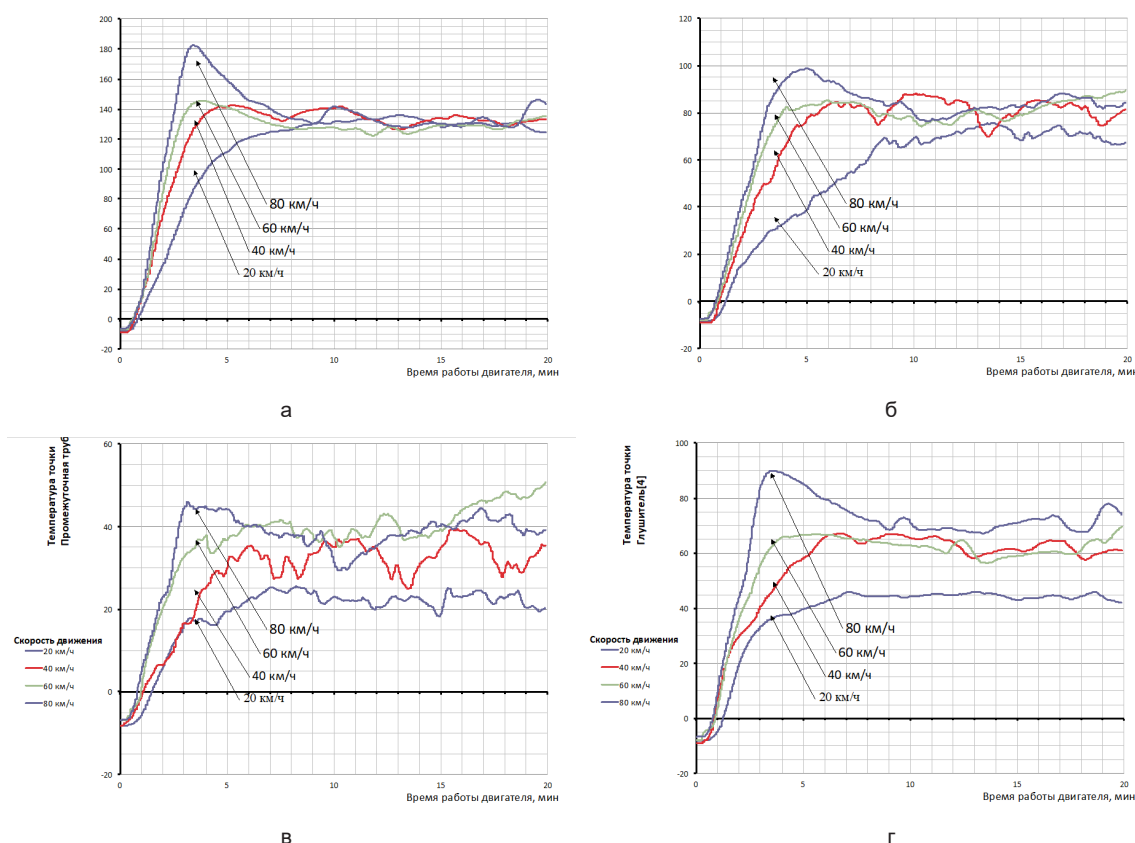


Рисунок 4 – Зависимость от времени температуры в контрольных точках 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (г) системы выпуска отработавших газов при различных скоростях автомобиля (указаны на рисунках)

Figure 4 – Time-dependent temperature at control points 1 (а), 2 (б), 3 (в) and 4 (г) of the exhaust system at various vehicle speeds (shown in the figures)

Таблица 2
Показания термопар №5 и №6, установленные внутри системы выпуска при различной скорости движения

Table 2
Indications of thermocouples 5 and 6 installed inside the exhaust system at different speeds

№ испытания	Постоянная скорость движения автомобиля, км/ч	Температура отработавших газов в контрольной точке, °C	
		5	6
1	0	70–120	35–50
2	20	120–145	45–50
3	40	190–220	75–85
4	60	200–225	80–90
5	80	225–250	105–110

Вторая термопара показывает существенный разброс в диапазоне 30–35 градусов в значениях установившихся температур. При этом температура, соответствующая скорости движения 40 и 60 км/ч, оказывается выше значения температуры в той же точке при скорости 80 км/ч.

В области установки 3-й термопары разброс значений установившихся температур достигает тех же 30–35 градусов, при этом сами температуры становятся заметно меньше. В этом случае также температура, соответствующая скорости движения 60 км/ч, оказывается выше значения температуры, соответствующей скорости 80 км/ч.

В районе размещения 4-й термопары осцилляции температур существенно сглажены, их поведение более стабильное. В частности, температура, соответствующая скорости движения 80 км/ч, выше значения температуры, соответствующей скорости 60 км/ч.

На рисунке 5 представлена зависимость от времени температуры элементов системы выпуска при движении со скоростью 100 км/ч. Эти измерения выполнены сразу по окончании этапа движения с постоянной скоростью 80 км/ч и разгона до 100 км/ч.

Результаты показывают, что при движении со скоростью более 80 км/ч происходит общее повышение температуры элементов системы выпуска, при этом 4-я термопара показывает температуру выше, чем показания термопары в точке 3 и сравнимую с температурой в точке 2.

В таблице 2 приведены диапазоны изменения температуры отработавших газов в зависимости от скорости движения автомобиля по данным термопар, установленных в контрольных точках 5 и 6 внутри системы выпуска (см. рисунок 1).

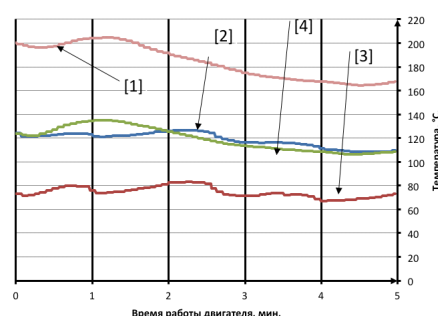


Рисунок 5 – Зависимость от времени температуры элементов системы выпуска отработавших газов в контрольных точках 1–4 (указаны на рисунке) при движении с постоянной скоростью 100 км/ч

Figure 5 – The time-dependent temperature of the elements of the exhaust system at the control points 1-4 (shown in the figure) when driving at a constant speed of 100 km / h.

При работе двигателя на холостом ходу температура отработавших газов на выходе из глушителя достигает температуры 35–50°C, при движении со скоростью 40 км/ч температура газов увеличивается до 75–85°C, при движении со скоростью 80 км/ч температура газов увеличивается до 105–110°C, а при движении со скоростью более 80 км/ч температура газов достигает 150–170°C.

Полученные данные показывают снижение температуры отработавших газов, поступающих из глушителя в окружающую среду, более чем в 2 раза по сравнению с температурой на входе в глушитель.

Стоит заметить, что на температуру поверхности элементов системы выпуска отработавших газов влияет техническое состояние каждого отдельного элемента системы выпуска, в первую очередь состояние каталитического нейтрализатора.

Результаты отбора факторов, влияющих на формирование количества накопления кон-

денсата в системе выпуска отработавших газов, и установление закономерности влияния интенсивности эксплуатации на накопление конденсата в системе выпуска отработавших газов позволит разработать методику определения периодичности удаления конденсата из системы выпуска отработавших газов при отрицательных температурах в зимний период.

Установленные особенности механизма образования и накопления конденсата в системе выпуска отработавших газов и разрабатываемые рекомендации могут быть применены к автомобилям других марок, т.к. по структуре и принципу работы система выпуска соответствует системам выпуска других марок, оснащенных бензиновым атмосферным двигателем.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено экспериментальное исследование по определению особенностей изменения температуры отдельных элементов системы выпуска отработавших газов в зависимости от времени при различной скорости движения автомобиля. В экспериментальном исследовании установлено, что:

- температура элементов системы выпуска отработавших газов устанавливается в течение 8–12 мин с начала движения автомобиля при постоянной скорости и нагрузке;
- наименьший нагрев стенок имеет задний глушитель (до 40 °С при скорости 20 км/ч), а следовательно, и наибольшую вероятность образования и накопления конденсата. При увеличении скорости движения до 60–80 км/ч задний глушитель прогревается до температуры 80 °С.

На следующем этапе экспериментальных исследований необходимо установить температуру конденсации (точку росы) водяных паров, содержащихся в отработавших газах. Возможно будет определить элементы системы выпуска, где происходит охлаждение газа до точки росы и выпадение конденсата. Ценность установленных закономерностей может лечь в основу разрабатываемой методики периодического прогрева системы выпуска отработавших газов. Методика позволит определять предельное количество конденсата, при котором необходимо осуществлять удаление конденсата из системы выпуска.

Применение полученных результатов и использование разрабатываемых рекомендаций снизит возможные затраты, связанные с образованием конденсата в системе выпуска отработавших газов в холодных климатических условиях, к подобным затратам относятся:

1. Затраты, возникающие в случае неудавшегося пуска двигателя в результате блокировки замерзшим конденсатом выпуска отработавших газов. Потребуется чистка и восстановление работы выпускного тракта. Однако без периодической профилактики удаления конденсата остается вероятность повторной блокировки выпускного тракта и утраты работоспособности системы выпуска в холодных климатических условиях.

2. Затраты, возникающие в случае коррозии элементов системы выпуска. На современном этапе ремонт элементов системы выпуска отработавших газов осуществляется в большинстве случаев заменой отдельных элементов. Наиболее часто выходят из строя сильфонные металлические компенсаторы, затем обычно следуют глушители: сквозная коррозия, трещины, деформации поверхности элементов системы выпуска отработавших газов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hashimoto R., Mori G., Yasir M., Tröger U., Wieser H. Impact of Condensates Containing Chloride and Sulphate on the Corrosion in Automotive Exhaust Systems // BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte. September 2013. Vol. 158 (9). pp. 377–383. Springer-Verlag Wien. [Электронный ресурс]: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00501-013-0180-6>.
2. González N. G. Condensation in Exhaust Gas Coolers. In: Junior C., Jänsch D., Dingel O. (eds) // Energy and Thermal Management, Air Conditioning, Waste Heat Recovery. ETA2016. Springer, Cham. 2017. [Электронный ресурс]: https://doi.org/10.1007/978-3-319-47196-9_9.
3. Лаушкин А.В., Хазиев А.А. Причины обводнения моторного масла в эксплуатации // Вестник МАДИ. 2012. № 1. С. 63–67.
4. Gümpel, P., Schiller, D., Arlt, N. et al. Simulation of corrosion behaviour of stainless steels in passenger car exhaust systems. ATZ Worldw 106, 2004: 18–20: <https://doi.org/10.1007/BF03224662>
5. Лаушкин А.В., Хазиев А.А. Анализ факторов, влияющих на обводнение моторного масла при эксплуатации автомобиля // Автотранспортное предприятие. 2016. №4. С. 54–56.
6. Heil B., Enderle C., Herwig H., Strohmer E., Margadant A., Ruth W. The Exhaust System of the Mercedes SL500. -MTZ worldwide. January 2002. -Vol. 63. -Iss. 1. -pp. 2-5. <https://doi.org/10.1007/BF03227514>
7. Krüger, J., Pommerer, M. & Jebasinski, R. Active exhaust silencers. MTZ Worldw 71, 2010. pp. 4–9. <https://doi.org/10.1007/BF03227026>
8. Kuznetsov N.I., Petukhov M.Yu., Khaziev A. A., Laushkin A. V. Problem of Accumulation and Freezing of Condensate in the Exhaust Gases of

Cars at Low Temperatures // Applied Mechanics and Materials. June 2016. Vol. 838. pp. 47–55.

9. Kim, M.J., Woo, S.H., Kim, J.G. et al. Effect of Weld Oxide on the Corrosion Resistance of Gas Metal Arc Welded Ferritic Stainless Steel Exposed to Simulated Exhaust Condensate. *Oxid Met* 84, 2015. pp. 397–411 <https://doi.org/10.1007/s11085-015-9561-4>

10. Morgan, M.L. Failure Analysis of an 18% Cr Ferritic Stainless Steel in a Simulated Exhaust Condensate Containing Urea. *J Fail. Anal. and Preven.* 18, 2018 pp. 117–120. <https://doi.org/10.1007/s11668-018-0387-7>

11. Curà F., Mura A. Aging characterization of metals for exhaust systems // International Journal of Automotive Technology. June 2012. Volume 13. Issue 4: 629–636.: <https://doi.org/10.1007/s12239-012-0061-0>

12. Abdoli M., Rahimi H. & Godarzizadeh A. Investigation of Failure in Automotive Exhausts // *J Fail. Anal. and Preven.* 2011. 11: 679.: <https://doi.org/10.1007/s11668-011-9502-8>

13. Кузнецов Н.И. Количественная оценка содержания в отработавших газах воды, поступающей в двигатель с атмосферным воздухом // Вестник ПНИПУ. Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2017. №1. С. 77–87. <https://doi.org/10.15593/24111678/2017.01.06>

14. Лаушкин А.В., Хазиев А.А. Количественная оценка образования воды при сгорании автомобильного топлива // Автотранспортное предприятие. 2015. №12. С. 37–39.

15. Лаушкин А.В., Хазиев А.А. Количественная оценка попадания воды в моторное масло из атмосферного воздуха при эксплуатации автомобиля // Автотранспортное предприятие. 2015. №7. С. 40–42.

16. Бояршинов М.Г., Кузнецов Н.И. Температурный режим системы выпуска автомобиля при пониженных температурах // Мир транспорта. 2019. 17(4). С. 48–67. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-48-67>

17. Бояршинов М.Г., Лобов Н.В., Кузнецов Н.И., Мартемьянов А.О. Температурный режим системы выпуска отработанных газов автомобиля в условиях пониженных температур // Вестник ПНИПУ. Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2018. №3. С. 5–16. <https://doi.org/10.15593/24111678/2018.03.01>

18. Мороз С.М. Технология автоматического индивидуального нормирования расхода топлива для автотранспортных средств // Грузовик. 2019. № 3. С. 11–15.

19. Болдин А.П., Максимов В.А., Постолиит А.В., Миротин Л.Б., Хазиев А.А. Методика оперативного определения норм расхода топлива городскими автобусами с учётом сложности маршрута движения // Автомобильная промышленность. 2018. №6. С. 22–26.

20. Щурин К.В., Третьяк Л.Н., Герасимов Е.М., Вольнов А.С. Гармонизация стандартов европейского союза и российской федерации по оценке влияния автотранспорта на экологические системы городов // Грузовик. 2012. №9.

21. Благонравов А.А., Юркевич А.А., Юркевич А.В. Расход топлива при движении в городском ездовом цикле автомобиля с бесступенчатым механическим трансформатором // Журнал автомобильных инженеров. 2014.

REFERENCES

1. Hashimoto R., Mori G., Yasir M., Tröger U., Wieser H. Impact of Condensates Containing Chloride and Sulphate on the Corrosion in Automotive Exhaust Systems. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, September 2013, 158 (9): 377–383. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00501-013-0180-6>.

2. González N. G. Condensation in Exhaust Gas Coolers. Energy and Thermal Management, Air Conditioning, Waste Heat Recovery. ETA 2016. *Springer, Cham*. 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-47196-9_9.

3. Laushkin A.V., Haziev A.A. Prichiny obvodneniya motornogo masla v jekspluatácii [Reasons for flooding engine oil in operation] *Vestnik MADI*, 2012, 1: 63–67. (in Russian)

4. Gümpel, P., Schiller, D., Arlt, N. et al. Simulation of corrosion behaviour of stainless steels in passenger car exhaust systems. *ATZ Worldw* 106, 2004: 18–20 DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03224662>

5. Laushkin A. V., Haziev A. A. Analiz faktorov, vlijajushhih na obvodnenie motornogo masla pri jekspluatácii avtomobilja [Analysis of factors affecting the flooding of motor oil during car operation] *Avtotransportnoe predpriatie*. 2016; 4: 54–56. (in Russian)

6. Heil B., Enderle C., Herwig H., Strohmer E., Margadant A., Ruth W. The Exhaust System of the Mercedes SL500. *MTZ worldwide*. 2002. 63(1): 2–5. <https://doi.org/10.1007/BF03227514>

7. Krüger, J., Pommerer, M. & Jebasinski, R. Active exhaust silencers. *MTZ Worldw* 71, 2010: 4–9. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03227026>

8. Kuznetsov N.I., Petukhov M.Yu., Khaziev A. A., Laushkin A. V. Problem of Accumulation and Freezing of Condensate in the Exhaust Gases of Cars at Low Temperatures, Applied Mechanics and Materials. June 2016; 838:47–55. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.838.47>.

9. Kim, M.J., Woo, S.H., Kim, J.G. et al. Effect of Weld Oxide on the Corrosion Resistance of Gas Metal Arc Welded Ferritic Stainless Steel Exposed to Simulated Exhaust Condensate. *Oxid Met* 84, 2015. pp. 397–411 DOI: <https://doi.org/10.1007/s11085-015-9561-4>

10. Morgan, M.L. Failure Analysis of an 18% Cr Ferritic Stainless Steel in a Simulated Exhaust Condensate Containing Urea. *J Fail. Anal. and Preven.* 18, 2018: 117–120 DOI: <https://doi.org/10.1007/s11668-018-0387-7>

11. Curà F., Mura A. Aging characterization of metals for exhaust systems. *International Journal of Automotive Technology*. June 2012. 13(4): 629–636. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-012-0061-0>

12. Abdoli M., Rahimi H. & Godarzizadeh A. Investigation of Failure in Automotive Exhausts. *J Fail.*

Anal. and Preven. 2011. 11: 679. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11668-011-9502-8>

13. Kuznecov N.I. Kolichestvennaya ocenka sodержaniya v otrabotavshih gazah vody, postupayushchej v dvigatel' s atmosferynym vozduhom [Quantification of the content in the exhaust gas of water entering the engine with atmospheric air] *Vestnik PNIPU. Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2017; 1: 77-87. DOI: 10.15593/24111678/2017.01.06

14. Laushkin A. V., Haziev A. A. Kolichestvennaya ocenka obrazovaniya vody pri sgoranii avtomobil'nogo topliva [Quantification of the formation of water during the combustion of automotive fuel] *Avtotransportnoe predpriyatie*. 2015, 12: 37-39. (in Russian)

15. Laushkin A. V., Haziev A. A. Kolichestvennaya ocenka popadaniya vody v motornoe maslo iz atmosferynogo vozduha pri jekspluatatsii avtomobilja [A quantitative assessment of the ingress of water into engine oil from atmospheric air during car operation] *Avtotransportnoe predpriyatie*. 2015, 7: 40-42. (in Russian)

16. Boiarshinov M.G., Kuznecov N.I. Temperaturnyj rezhim sistemy vypuska avtomobilja pri ponizhennyh temperaturah [The temperature regime of the car exhaust system at low temperatures] *Mir transporta*. 2019; 17(4): 48-67. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-48-67> (in Russian)

17. Boyarshinov M.G., Lobov N.V., Kuznecov N.I., Martem'yanov A.O. Temperaturnyj rezhim sistemy vypuska otrabotannyh gazov avtomobilya v usloviyah ponizhennyh temperatur [The temperature regime of the exhaust system of the vehicle in low temperatures] *Vestnik PNIPU. Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 3: 5-16. DOI: 10.15593/24111678/2018.03.01 (in Russian)

18. Moroz S.M. Tehnologija avtomaticheskogo individual'nogo normirovaniya rashoda topliva dlja avtotransportnyh sredstv [Technology of automatic individual regulation of fuel consumption for vehicles] *Gruzovik*, 2019, 3: 11-15. (in Russian)

19. Boldin A.P., Maksimov V.A., Postolit A.V., Mirotn L.B., Haziev A.A. Metodika operativnogo opredeleniya norm rashoda topliva gorodskimi avtobusami s uchjotom slozhnosti marshruta dvizheniya [The methodology for the rapid determination of fuel consumption rates by city buses, taking into account the complexity of the route of movement] *Avtomobil'naja promyshlennost'*, 2018, 6: 22-26. (in Russian)

20. Shhurin K.V., Tret'jak L.N., Gerasimov E.M., Vol'nov A.S. Garmonizacija standartov evropejskogo sojuza i rossijskoj federacii po ocenke vlijanija avtotransporta na jekologicheskie sistemy gorodov [Harmonization of standards of the European Union and

the Russian Federation for assessing the impact of vehicles on the ecological systems of cities] *Gruzovik*, 2012; 9. (in Russian)

21. Blagonravov A.A. Jurkevich A.A. Jurkevich A.V. Rashod topliva pri dvizhenii v gorodskom ezdomom cikle avtomobilja s besstupenchatym mehanicheskim transformatorom [Fuel consumption when driving in a city driving cycle of a car with a stepless mechanical transformer] *Zhurnal Avtomobil'nyh inzhenerov*, 2014. (in Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Бояршинов М.Г. Разработка методики исследования, обработка результатов экспериментальных исследований.

Кузнецов Н.И. Проведение экспериментальных исследований.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Mikhail G.Boiarshinov – research methods development, experimental research results processing;

Nikita I. Kuznetsov – experimental research.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бояршинов Михаил Геннадьевич – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой автомобилей и технологических машин Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: 9128841776@mail.ru).

Кузнецов Никита Игоревич – аспирант кафедры автомобилей и технологических машин Пермского национального исследовательского политехнического университета, ORCID: 0000-0002-3157-6948 (614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: totalgame123@gmail.com).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail G. Boiarshinov - Dr. of Sci., Professor, Head of the Cars and Technological Machines Department. Perm National Research Polytechnic University ORCID 0000-0003-4473-6776 (614990, Perm Territory, Perm, Komsomolsky prospekt, 29, e-mail: 9128841776@mail.ru).

Nikita I. Kuznetsov - Postgraduate Student, the Automobiles and Technological Machines Department, Perm National Research Polytechnic University, ORCID: 0000-0002-3157-6948 (614990, Perm Territory, Perm, Komsomolsky Prospekt, 29, e-mail: totalgame123@gmail.com).

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-204-215>
УДК: 691.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКОПА В КАЧЕСТВЕ ВЯЖУЩЕГО ВЕЩЕСТВА

И.Л. Чулкова, И.А. Селиванов

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»,
г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Потребность в более эффективном и разнообразном применении отходов целлюлозно-бумажной промышленности диктует необходимость поиска новых направлений использования таких отходов в технологиях строительного материаловедения.

Материалы и методы. В исследованиях использовался скоп предприятия ООО «Пермский картон» с влажностью после отмывки 300% масс. В настоящее время многие вопросы теории и практики производства материалов из скопа остаются не вполне решёнными, вследствие чего ряд положений заимствуется из теории производства бетона на минеральных заполнителях, а также производства изделий целлюлозно-бумажной промышленностью.

Результаты. В силу своего химического и вещественного состава показана возможность применения скопа в технологиях строительного материаловедения в качестве самостоятельного воздушного вяжущего вещества. Исследованиями установлено, что исходная влажность скопа как вяжущего влияет на конечные качественные показатели сухого материала. Так наименьшая плотность сухого материала 350 кг/м³ наблюдается при исходной влажности смеси в пределах 650% масс. При плотности 350 кг/м³ гигроскопичность материала составляет 4,3%, усадка от 10 до 25%. Время сушки изделия находится в пределах 11 ч. Нивелирование высокой усадки достигается посредством введения легких заполнителей с шероховатой поверхностью в процессе формования.

Обсуждение и заключение. Полученные данные о структуре, составе скопа, а также зависимости и закономерности поведения высококонцентрированной дисперсной системы типа «скоп–вода» показывают возможность применения скопа для производства теплоизоляционных материалов как в качестве основного компонента, так и в композиции с заполнителями в качестве самостоятельного воздушного вяжущего. При этом конечные показатели плотности теплоизоляционных изделий находятся в пределах, установленных нормативными документами

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: скоп, воздушное вяжущее вещество, структурообразование, вещественный и химический состав, технологические свойства, теплоизоляционный материал.

Поступила 14.01.21, принята к публикации 28.04.21.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Чулкова И.Л. Использование скопа в качестве вяжущего вещества / И.Л. Чулкова, И.А. Селиванов. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-204-215> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 2(78). – С. 204-215.

© Чулкова И.Л., Селиванов И.А., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-204-215>

USE OF FIBRE WASTE AS A BINDER

Irina L. Chulkova, Igor A. Selivanov

*Siberian State Automobile and High University,
Omsk, Russia*

ABSTRACT

Introduction. The need for a more efficient and varied use of waste from the pulp and paper industry dictates the need to search for new directions for the use of such waste in construction materials science technologies.

Materials and methods. In the studies the fibre waste of the Perm Cardboard LLC company with a moisture content after washing of 300% by weight was used. Currently, many issues of theory and practice the production of materials from the fibre waste are not entirely solved, resulting in a number of provisions borrowed from the theory of the production of concrete mineral aggregates, as well as the production of pulp and paper industry.

Results. Due to its chemical and material composition, the possibility of using the fibre waste in construction materials science technologies as an independent air binder is shown. The studies have established that the initial moisture content of the fibre waste as a binder affects the final quality indicators of a dry material. Thus, the lowest dry material density of 350 kg/m³ is observed at the initial humidity of the mixture in the range of 650% by weight. At a density of 350 kg/m³, the hygroscopicity of the material is 4.3%, the shrinkage from 10 to 25%. The drying time of the product is within 11 hours. A leveling high shrinkage is achieved by introducing light aggregates with a rough surface during the molding process.

Discussion and conclusions. The obtained data on the structure, the composition of the fibre waste, as well as the dependence and regularities of the behavior of a highly concentrated dispersed system of the 'fibre waste-water' type show the possibility of using the fibre waste for the production of thermal insulation materials, both as a main component and in a composition with aggregates as an independent air binder. At the same time, the final density indicators of thermal insulation products are within the limits established by regulatory documents

KEYWORDS: fibre waste air binder substance, structure formation, material and chemical composition, technological properties, heat-insulating material

Submitted 14.01.21, revised 28.04.21.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Chulkova I.L., Selivanov I.A. Use of fibre waste as a binder. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (2): 204-215. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-204-215>

© Chulkova I.L., Selivanov I.A., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Потребность в более эффективном и разнообразном применении отходов целлюлозно-бумажной промышленности диктует необходимость поиска новых направлений использования таких отходов в технологиях строительного материаловедения.

Основную долю отходов на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности составляет так называемый скоп – осадок первичных отстойников, образующийся при очистке технологических стоков при производстве картона и бумаги.

В частности, на предприятии ООО «Пермский картон» объём образуемого скопа в ежегодном выражении достигает 4,2 тыс. т, что по абсолютно сухому состоянию составляет 1,5 тыс. т. Возврат скопа в основное производство приводит к снижению качества готовой продукции и производительности формующего оборудования, таким образом, повторное применение скопа в технологии бумаги нецелесообразно и поэтому большая часть скопа в настоящее время вывозится в отвалы, загрязняя окружающую среду [1].

Рассмотрение посредством изучения специализированной литературы вопросов, связанных с направлениями использования скопа в технологиях строительного материаловедения, показывает возможность применения скопа как компонента смеси, влияющего на конечные качественные показатели готовых строительных материалов и изделий [2, 3], а также их экологичность [4, 5, 6, 7].

Так, например, применение скопа в качестве вспучивающей и выгорающей добав-

ки при производстве керамики способствует уменьшению плотности и увеличению производительности формующего оборудования¹ [8, 9]. Использование скопа в качестве опудривающей добавки позволяет увеличить интервал вспучивания глинистого сырья на 30–60 °С и снижает насыпную плотность керамзита на 60–100 кг/м³ [10, 11]. По литературным данным скоп можно применить в качестве волокнистого наполнителя, оказывающего влияние на прочностные показатели изделий^{2,3} [12, 13], а также положительно действующего на показатели твёрдости и удельного сопротивления⁴. В ряде литературных источников описывается возможность применения скопа для увеличения пластичности изделий⁵ [14], а также для производства теплоизоляционных [15, 16, 17] и изоляционных материалов [18].

Скоп, описанный в специализированной литературе, в силу наличия особенностей структуры, физических свойств, а также соответствующего химического и вещественного состава, включающего целлюлозу, лигнин и каолин, применяется в технологиях строительного материаловедения преимущественно в качестве волокнистого наполнителя.

Каолин в составе скопа влияет на способность волокон взаимодействовать между собой, усложняет процесс их переплетения и дальнейшего взаимодействия. Кроме того, каолин придаёт волокнам термостойкость.

Технология бумаги, используемая на предприятии ООО «Пермский картон», предусматривает обязательную очистку скопа от каолина. Следует предположить, что скоп без каолина обладает иными технологическими

¹ Патент РФ № 2229454 С2 МПК7 C04B33/00, 38/06. Сырьевая смесь для изготовления керамического кирпича / М.И. Бармин, А.Н. Гребёнкин, В.В. Павличенко, В.В. Мельников, Е.Г. Кемпи, А.И. Бойко, Н.С. Черников; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна; заявка №2002111580/03 от 10.11.2003, опубл. 27.05.2004. – Бюл. № 12. – 5 с.

² Патент РФ № 2095328 С1 МПК6 C04B28/14, B32B13/08. Состав для изготовления изделий из отходов производства молочной кислоты / Л.В. Новинюк, Д.А. Береженко; заявитель и патентообладатель Всероссийский научно-исследовательский институт пищевых ароматизаторов, кислот и красителей; заявка № 94041955/08 от 21.11.1994, опубл. 10.11.1997. – Бюл. №6. – 4 с.

³ Патент РФ № 1106810 А C04B43/12, 43/02. Состав для изготовления теплоизоляционного материала / Б.Л. Красный, Б.С. Тяпкин, С.П. Хайнер, Г.С. Факторович, В.А. Колейкин, Л.Б. Гамза, Л.А. Фокина; заявитель и патентообладатель Экспериментально-конструкторское бюро Центрального научно-исследовательского института строительных конструкций им. В.А. Кучеренко; заявка №3509392/29-33 от 10.11.82, опубл. 07.08.84. – Бюл. №29. – 8 с.

⁴ Заявка № 2006106912 Российская Федерация, МПК C04B26/02. Древесноволокнистая плита, имеющая улучшенную акустику и прочность / Феледжи Джон Мл., Гармэн Роберт С.; заявитель Армстронг уорлд индастриз, инк.; пат. поверенный Г.Б. Егорова; заявл. 04.08.2004; опубл. 10.07.2006, Бюл. № 7; приоритет 07.08.2003, №10/636,405 (США). – 2 с.

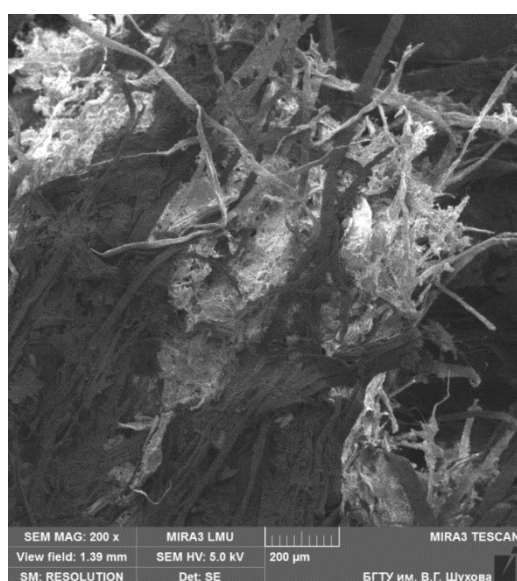
⁵ Патент РФ № 1106810 А C04B43/12, 43/02. Состав для изготовления теплоизоляционного материала / Б.Л. Красный, Б.С. Тяпкин, С.П. Хайнер, Г.С. Факторович, В.А. Колейкин, Л.Б. Гамза, Л.А. Фокина; заявитель и патентообладатель Экспериментально-конструкторское бюро Центрального научно-исследовательского института строительных конструкций им. В.А. Кучеренко; заявка №3509392/29-33 от 10.11.82, опубл. 07.08.84. – Бюл. №29. – 8 с.

свойствами, проявление и дальнейшее исследование которых может сформировать новое направление использования скопа в технологиях строительного материаловедения.

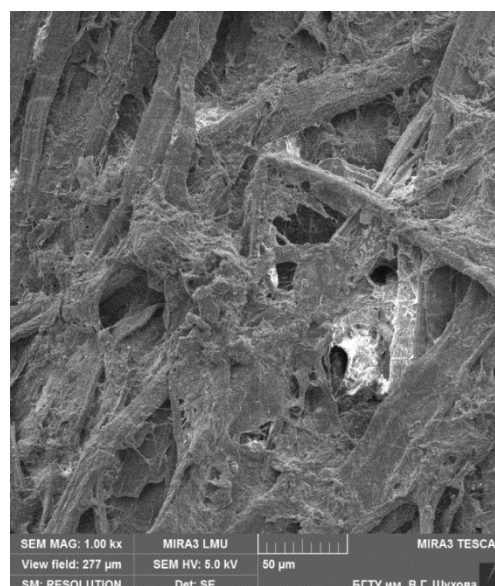
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Посредством сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU нами установлено, что скоп предприятия ООО «Пермский картон», использо-

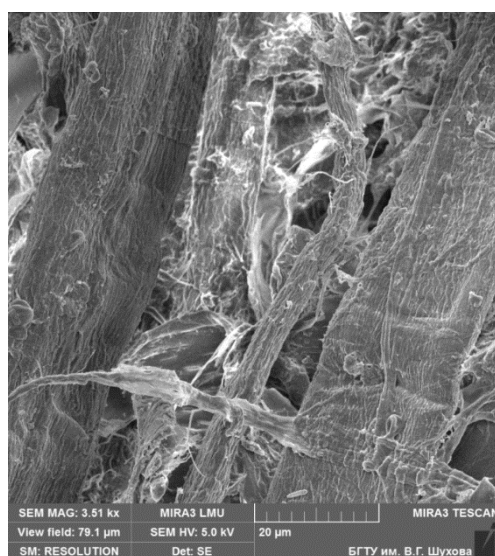
ванный в исследованиях, представлен волокнистой структурой, в которой целлюлозные нити соединены в ленты и пучки с помощью природного клея лигнина (рисунок 1). Распределение волокон неупорядоченное (рисунок 1, а), нити сильно переплетены между собой (рисунок 1, б). Скоп состоит преимущественно из плоских лент целлюлозы шириной приблизительно 20 мкм (рисунок 1, в) различной длины, достигающей 150–200 мкм (см. рисунок 1, а).



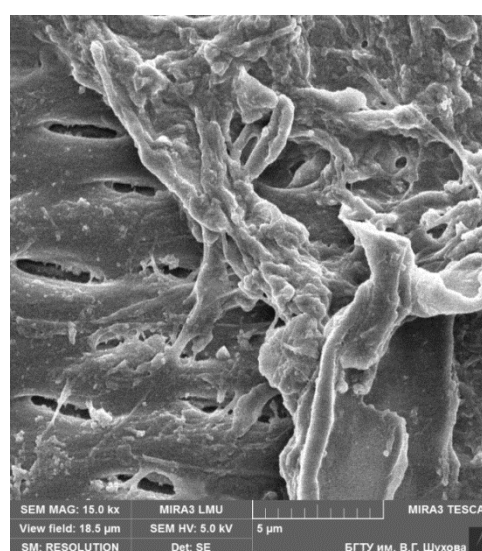
а



б



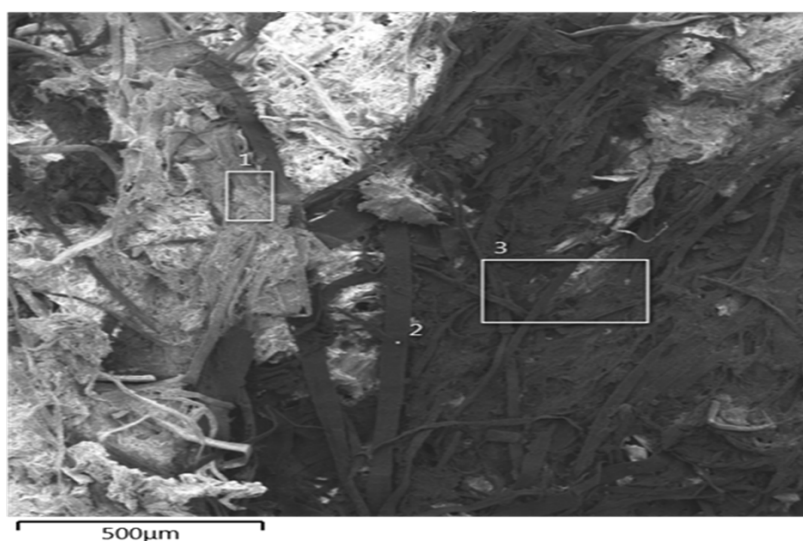
в



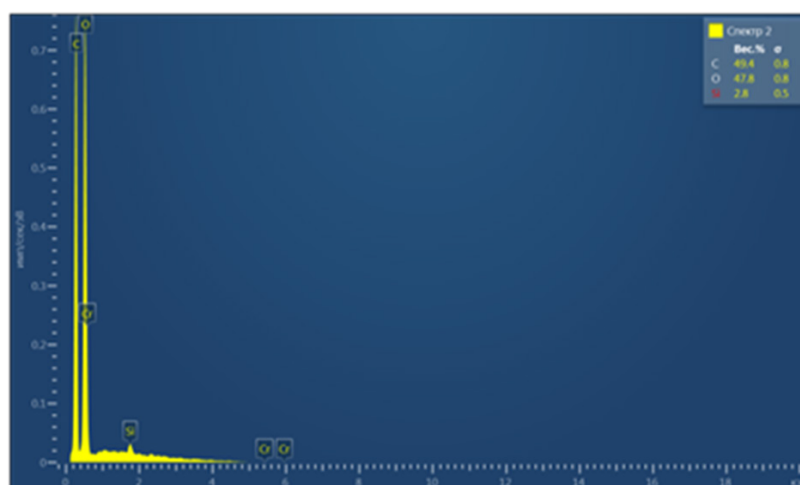
г

Рисунок 1 – Микроструктура скопа: а, б – общий вид; в, г – морфология поверхности волокон

Figure 1 – The microstructure of the fibre waste: a, b – general view; b, d-morphology of the fiber surface



а



б



в

Рисунок 2 – Элементный состав частиц скопа

Figure 2 – Elemental composition of fibre waste particles

Также имеются и отдельные волокна, диаметр которых составляет порядка 5 мкм (см. рисунок 1, в). Более широкие ленты состоят из нитей целлюлозы, о чем можно судить по морфологии поверхности, на которой видны продольные «борозды» – границы отдельных волокон (см. рисунок 1, в). При большом увеличении хорошо видна пористая структура поверхности этих волокон целлюлозы (рисунок 1, г), что способствует хорошей адгезии волокон к различным поверхностям [19, 20, 21].

Стоит отметить, что скоп состоит преимущественно из анизотропных фрагментов в виде волокон и лент, а также частиц неправильной формы различного размера, которые можно приписать лигнину или агрегатам из минеральных фаз (см. рисунок 1). Дисперсность отдельных частиц скопа имеет большое значение с точки зрения совместимости с различными заполнителями при получении композитов [20, 21, 22, 23, 24].

О составе скопа можно судить исходя из результатов экспериментов, полученных нами посредством энергодисперсионного спектрометра на базе электронного микроскопа (рисунок 2). Как можно видеть, химический состав отдельной «ленты» (спектр 2) и объема вещества (спектр 3) примерно одинаков. Обращает на себя внимание приблизительное равенство содержания углерода и кислорода, что подтверждает выводы о преобладании в составе вещества волокнистой добавки целлюлозы. Из примесных элементов имеются только кремний и алюминий, что свидетельствует о наличии небольшого количества алюмосиликатов [22, 23].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В силу высокой влажности свежееобразованного скопа, достигающей 300% масс, выявленных особенностей его структуры и состава следует допустить, что скоп предприятия ООО «Пермский картон» является высококонцентрированной дисперсной системой типа «твёрдое тело–жидкость», в которой дисперсионная среда представлена неорганической жидкостью – водой, а дисперсная фаза – органическими волокнами.

Как известно, дисперсным системам характерны процессы отвердевания при одновременном проявлении адгезионных свойств⁶.

Отвердевание обеспечивает системе свойства твёрдого тела, а способность к адгезии – свойства клея [24, 25, 26, 27, 28, 29]. Таким образом, можно предположить новое направление применения скопа предприятия ООО «Пермский картон» в технологиях строительного материаловедения. В данном случае скоп может выступать в качестве самостоятельного вяжущего вещества, в его определённых границах влажности высококонцентрированная система «твёрдое тело–жидкость» должна обладать рядом технологических параметров, установление которых позволит разработать оптимальные технологические режимы, позволяющие на практике получить эффективный продукт с минимальными затратами.

Для определения возможности применения скопа в технологиях в качестве самостоятельного вяжущего необходимо рассмотреть высококонцентрированную дисперсную систему «скоп–вода» и определить её реологические свойства, возможность эффективного формования и удобоукладываемость^{7,8}. В данном случае скоп может выступить как твёрдая фаза, имеющая особый химический состав, обеспечивающий адгезионные и когезионные свойства системы, а вода как жидкая фаза, способная хорошо смачивать поверхности контакта благодаря наличию водородных связей. Кроме того, вода создаёт условия подвижности волокон скопа и даёт возможность осуществить контакты на большей площади.

Известно, что отвердевание дисперсной системы происходит благодаря связыванию воды вяжущим, а также постепенному испарению лишней несвязанной жидкости. Поэтому водотвёрдое отношение, безусловно, влияет как на возможность твердения системы, так и способствует концентрации дисперсной фазы с образованием стеснённых условий.

В условиях стеснённости расстояния между волокнами скопа не препятствуют проявлению сил различной природы, с помощью которых образуются контакты между частицами вяжущего.

Определение способности скопа выступать в качестве вяжущего заключалось в исследовании и оптимизации технологических параметров системы «скоп–вода» [29] в части установления:

⁶ Строительные материалы: справочник / А.С. Болдырев, П.П. Золотов, А.Н. Люсов. – М.: Стройиздат, 1989. – 567 с.

⁷ Бибик Е.Е. Реология дисперсных систем / Е.Е. Бибик. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1981. – 172 с.

⁸ Рыбьев И.А. Строительное материаловедение / И.А. Рыбьев. – М.: Высш. шк., 2002. – 701 с.

- зависимости условной вязкости системы от начальной влажности скопа;
- зависимости начальной влажности скопа от времени сушки;
- зависимости линейной усадки скопа при сушке от начальной влажности скопа;
- зависимости плотности высушенного скопа от начальной влажности скопа;
- зависимости гигроскопичности высушенного скопа от начальной влажности скопа;
- зависимости прочности высушенного скопа от начальной влажности скопа.

В качестве меры условной вязкости использовали глубину погружения пестика прибора Вика⁹ за 30 сек. В качестве меры формовости использовали величину расплыва конуса смеси скоп-вода на встряхивающем столике¹⁰, при этом в качестве критерия формовости приняли сохранность формы образца (изделия).

Работу проводили следующим образом. Скоп с начальной влажностью около 300% смешивали с водой таким образом, чтобы суммарная влажность смеси увеличивалась от пробы к пробе на одинаковую величину. У полученной смеси определяли условную вязкость на приборе Вика, а также расплыв конуса на встряхивающем столике.

Исследованиями показано, что зависимость условной вязкости системы от влажности системы существует, полученная зависимость близка к линейной и описывается уравнением линейной регрессии первого порядка (рисунок 3).

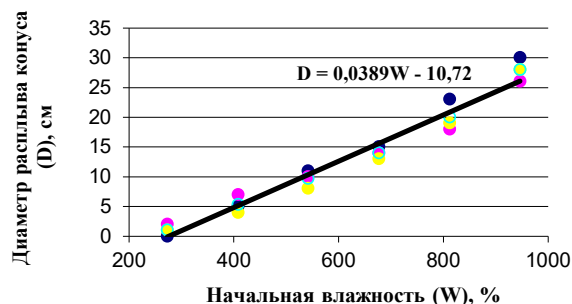


Рисунок 3 – Зависимость диаметра расплыва конуса смеси «скоп-вода» от начальной влажности

Figure 3 – Dependence of the diameter of the spreading cone of the fibre waste -water mixture on the initial humidity

Продолжение исследований заключалось в дальнейшем использовании полученной смеси «скоп-вода» разной исходной влажности для формования стандартных размеров образцов-балочек, их немедленным расплыванием и сушкой до постоянной массы в течение 24 ч при температуре 80 °С.

Так экспериментально показано, что существует зависимость времени сушки, плотности, гигроскопичности, линейной усадки, а также прочности материала от исходной влажности скопа (рисунки 4, 5, 6, 7, 8).

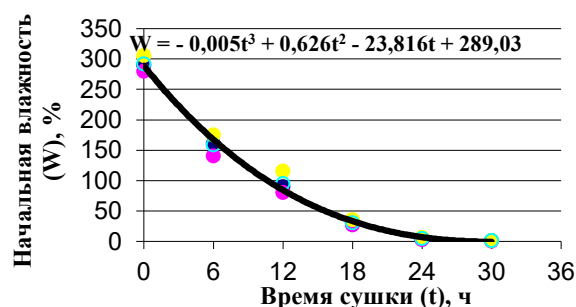


Рисунок 4 – Зависимость начальной влажности образцов скопа от времени сушки

Figure 4 – Dependence of the initial humidity of fibre waste samples on the drying time

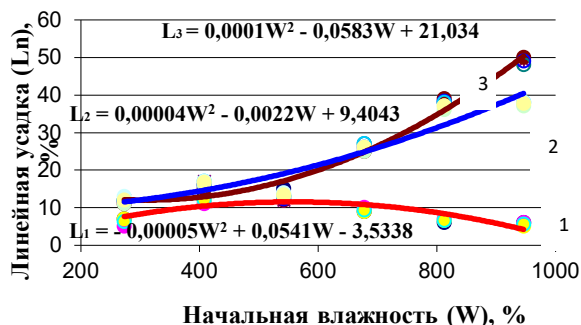


Рисунок 5 – Зависимость линейной усадки образцов скопа от начальной влажности:
1 – линейная усадка вдоль усилия формования образца;
2 – линейная усадка поперек усилия формования по длине образца;
3 – то же по ширине образца

Figure 5 – Dependence of linear shrinkage of fibre waste samples on initial humidity:
1 – linear shrinkage along the forming force of the sample;
2 – linear shrinkage across the forming force along the length of the sample;
3 – the same width of the sample

⁹ ГОСТ 310.3–76. Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема. – Введ. 1978–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 8 с.

¹⁰ ГОСТ 310.4–81. Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии. – Введ. 1983–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1983.–12 с.

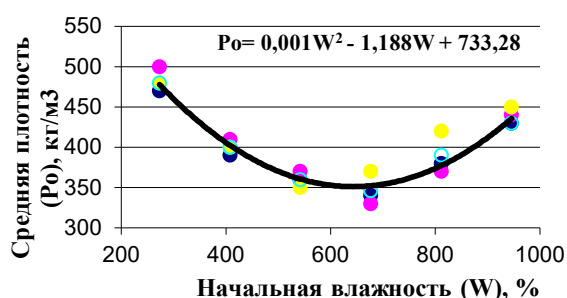


Рисунок 6 – Зависимость средней плотности сухого скопа от начальной влажности

Figure 6 – Dependence of the average density of dry fibre waste on the initial humidity

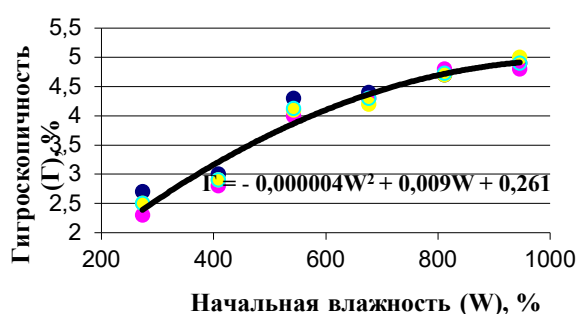


Рисунок 7 – Зависимость гигроскопичности высушенных образцов скопа от начальной влажности

Figure 7 – Dependence of hygroscopicity of dried fibre waste samples on initial humidity

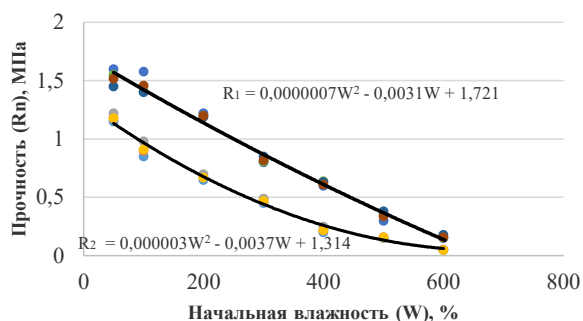


Рисунок 8 – Зависимость прочности образцов-балочек из скопа от влажности:
1 – при сжатии;
2 – при изгибе

Figure 8 – Dependence of the strength of sample beams from the fibre waste from moisture:
1 – during compression;
2 – when bending

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из представленных графических зависимостей следует, что увеличение исходной влажности системы приводит к уменьшению плотности высушенного изделия, причем чем выше изначальная влажность, тем больше линейная усадка и гигроскопичность, но граница максимальной влажности системы находится в пределах 650% масс, за пределами которой плотность сухого изделия начинает увеличиваться. Таким образом, в границах исходной влажности от 600 до 650% масс наблюдается минимальная плотность высушенного изделия, объясняемая, по-видимому, способностью волокон скопа самоориентироваться под действием сил формования и ПАВ^{11,12} [30, 31, 32, 33].

В процессе сушки количество свободной влаги испаряется, волокна скопа сближаются и переплетаются, образуя жесткие связи. При этом сближение волокон при высокой влажности системы происходит преимущественно параллельно друг другу. В результате этого система уплотняется и становится более прочной. Наличие в системе лигнина способствует процессу ориентации, а также приводит к образованию жестких связей между волокнами [33, 34, 35], что усиливает связующий эффект.

По результатам проведенных экспериментов предприятия ООО «Пермский картон» скоп можно классифицировать в качестве вяжущего воздушного твердения.

В технологиях строительного материаловедения скоп может использоваться в качестве самостоятельного вяжущего вещества контактного твердения, к которым относят также вяжущие аморфной и нестабильной кристаллической структуры, способной конденсироваться в момент возникновения контактов между частицами при сближении их на расстояние действия поверхностных сил натяжения [33, 34, 35].

Более прочные контакты между частицами вяжущего достигаются посредством приложения внешнего давления. При малых давлениях полезно в системе присутствие очень малых количеств жидкости как своеобразной смазки для получения вещества в исходном нестабильном кристаллическом или амор-

¹¹ Химия и биохимия лигнина, целлюлозы и гемицеллюлоз (пер. с англ.) / под ред. М.Н. Цыпкина. – М.: Изд-во «Лесная промышленность», 1969. – 224 с.

¹² Сычёв М.М. Неорганические клеи / М.М. Сычёв. – Л.: Химия, 1974. – 160 с.

фном состоянии. Поэтому на первой стадии отвердевания производятся технологические операции, обеспечивающие образование неупорядоченной структуры. Отвердевание системы происходит в момент возникновения прочных связей между частицами аморфного вещества и упорядочения структуры по границам контакта с переводом метастабильного состояния в устойчивое [33, 34, 35].

На второй стадии отвердевания матричного вещества во всех возможных системах, к которым относятся вяжущие вещества в микро- и макроструктурных строительных конгломератах, процессы завершаются большим или меньшим упорядочением, снижением энтропии, переходом системы в более устойчивое, по возможности в кристаллическое состояние. Вторая стадия не завершается только конденсацией веществ. На этой стадии происходят также и процессы консолидации – упрочнения, укрепления вновь образующейся структуры на микро- и макроуровнях.

Процесс второй стадии отвердевания является следствием того, что происходят непрерывные качественные и количественные изменения жидкой среды и твёрдой фазы в системе [33, 34, 35].

К завершающему этапу отвердевания количество жидкой среды в системе становится минимальным, а количество твёрдой фазы – максимальным, т.е. величина отношения жидкой среды к твёрдой фазе постепенно уменьшается, приближаясь к некоторому оптимальному значению [33, 34, 35], в итоге получается жёсткий прочный монолит (рисунок 9).



Рисунок 9 – Внешний вид материалов из скопа

Figure 9 – External view of materials from fibre waste

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатами исследования было установлено, что исходная влажность скопа как вяжущего влияет на конечные качественные показатели сухого материала. Так наименьшая плотность сухого материала 350 кг/м^3 наблюдается при исходной влажности смеси в пределах 650% масс. При плотности 350 кг/м^3 гигроскопичность материала составляет 4,3%, усадка находится в пределах от 10 до 25%. Время сушки изделия при заявленной температуре составляет 11 ч. Нивелирование высокой усадки может достигаться посредством введения легких заполнителей с шероховатой поверхностью в процессе формования [36].

Исследование прочностных свойств скопа как вяжущего показывает схожую с традиционными вяжущими закономерность, показывающую влияние водотвёрдого отношения на конечную прочность сухого материала. В исследованных границах исходной влажности прочность скопа как вяжущего при сжатии находится в пределах от 0,30 до 1,50 МПа, а прочность при изгибе – от 0,10 до 1,30 МПа.

Полученные данные о структуре, составе скопа, а также зависимости и закономерности поведения высококонцентрированной дисперсной системы типа «скоп–вода» показывают возможность применения скопа в качестве самостоятельного вяжущего вещества воздушного твердения пригодного, в силу выявленных физических свойств, для производства теплоизоляционных материалов как в качестве основного компонента, так и в композиции с заполнителями в качестве самостоятельного воздушного вяжущего. При этом конечные показатели плотности теплоизоляционных изделий находятся в пределах, установленных нормативными документами¹³.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баталин Б.С., Козлов И.А. Утилизация скопа ООО «Пермский картон» // Экология и промышленность России. 2009. №6. С. 20–22.
2. Баталин Б.С., Козлов И.А. Строительные материалы на основе скопа – отхода целлюлозно-бумажной промышленности // Строительные материалы. 2004. №1. С.42–43.
3. Печенкин А.Ю., Карцев И.И., Колтунов А.С., Куценко О.И. Исследование свойств строительных материалов на основе древесных отходов // Современные материалы, техника и технология. 2016. №5(8). С. 147–152.

¹³ ГОСТ 16381–77 Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Классификация и общие технические условия. – Введ. 1977–07–01. – Москва : Изд-во стандартов, 1977. – 7 с.

4. Ремизова В.М. Композиты из отходов // Универсальная наука. 2018. №1(5). С. 79–82.
5. Мифтахов М.Н., Махнюк Д.В. Исследование сорбционных свойств модифицированных сорбентов, полученных из отходов целлюлозно-бумажной промышленности – скопа // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2020. №3(86). С.21–58.
6. Баталин Б.С., Козлов И.А. Использование скопа для обеспечения гигиенической безопасности жилых помещений // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4. 104 с.
7. Имайкина А.Р., Ширинкина Е.С. Анализ направлений использования осадков сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий в строительной отрасли // Химия. Экология. Урбанистика. 2018. С. 108–111.
8. Матвеева З.О. Использование отходов целлюлозно-бумажной промышленности для производства аглопоритового гравия // Строительные материалы. 1980. №6. С. 21–22.
9. Ширинкина Е.С., Вайсман Я.И., Житнюк В.А., Монченко С.В. Ресурсосберегающая технология обращения с отходами переработки макулатурной массы // Экология и промышленность России. 2015. №7. С.10–15.
10. Ольков П.Л. Улучшение качества керамзита путём устранения слипания сырцовых гранул в процессе сушки // Строительные материалы. 1980. №5. С.16–17.
11. Chen H.J. Paper sludge reuse in lightweight aggregates manufacturing / H.J. Chen, Y.C. Hsueh, C.F. Peng, C.W. Tang // Materials. - 2016. - Vol. 9 (11). №876. - pp. 1–9. DOI: 10.3390/ma9110876.
12. Пичугин А.П., Денисов А.С., Хританков В.Ф. [и др.] Эффективные органоминеральные бетоны с повышенными тепло- и звукоизолирующими свойствами // Строительные материалы. 2008. №5. С. 73–75.
13. Федоров В.И. Повышение качества фибробетона введением целлюлозных волокон // Строительство: новые технологии – новое оборудование. 2018. №5. С.54–56.
14. Adu C. Developing fiber and mineral based composite materials from paper manufacturing byproducts / C. Adu, M. Jolly // Smart Innovation, Systems and Technologies. - 2017. - Vol. 68. - pp. 435–444. DOI.org/10.1007/978-3-319-57078-5_41.
15. Ширинкина Е.С. Получение экологически безопасных строительных материалов с использованием осадков сточных вод целлюлозно-бумажного производства // Теоретическая и прикладная экология. 2018. №4. С.85–92.
16. Hishikava Y. Characterization of individual hydrogen bonds in crystalline regenerated cellulose using resolved polarized FTIR spectra / Y. Hishikava, E. Togawa T. Kondo // ACS Omega. - 2017. - Vol.2(4) - pp. 1469-1476. DOI.org/10.1021/acsomega.6b00364.
17. Муратова А.А., Картушина Ю.Н. Разработка состава теплоизоляционных изделий из макулатуры и полимерных отходов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. №3(80). С. 73–83.
18. Дубатовская А.И., Твердохлебов Р.В. Обзор технических свойств целлюлозной изоляции // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. 2018. № 8. С. 67–81.
19. Осовская И.И., Антонова В.С. Влияние поверхностной деструкции на гидрофильность и связеобразующую способность целлюлозных волокон // Химия растительного сырья. 2020. №1. С.315–320.
20. Rubleva N.V. Production of cellulose nanocrystals by hydrolysis in mixture of hydrochloric and nitric acids. / N.V. Rubleva, E.O. Lebedeva, A.V. Afineevskii, M.I. Voronova, O.V. Surov, A.G. Zakharov // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2019. vol.62, no 12, pp.85-93. DOI: 10.6060/ivkkt.20196212.5984.
21. Zoltan Borcsok / Zoltan Borcsok, Srivaro Suthon, Zoltan Pasztory // Effect of heat treatment on some cellular properties fo rubberwood (Hevea brasiliensis Mull.Arg). Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2020, vol.24, no 2, pp.43-50. DOI: 1018698/2542-1468-2020-2-43-50.
22. Чулкова И.Л., Селиванов И.А., Галдина В.Д. Исследование влияния добавки скопа на структурообразование цементного камня методом количественного рентгенофазового анализа // Вестник СибаДИ. 2019. №4. С.504–518.
23. Чулкова И.Л., Селиванов И.А., Галдина В.Д. Изучение структурообразования органоминеральных композиций с волокнистым наполнителем методом электронной микроскопии // Промышленное и гражданское строительство. 2019. №12. С.41–47.
24. Smolin, A.S. Role of the relaxation state of polimer components in wood when making composite packaging materials (corrugated cardboard) / A.S. Smolin, E.L. Akim // Fiber Chemistry. - 2018. - Vol. 50. №4. - 336-344. DIO.org/10.1007/s10692-019-09986-3.
25. Abitbol T. A. Nanocellulose a tiny fiber with huge applications / T.A. Abitbol, A. Rivkin, Y. Cao, Y. Nevo, E. // Current Opinion in Biotechnology. - 2016. - Vol.39. - pp.76-88. DIO:10.1016/j.copbio.2016.01.002
26. Mahyar Fazeli. Improvement in adhesion of cellulose fibers to the thermoplastic starch matrix by plasma treatment modification / Mahyar Fazeli, Jennifer Paola Florez, Renata Antoun Simão // Plasma Processes and Polimers. - 2019. - Vol.16(6), pp.207-216. DOI:10.1002.ppap.201800167.
27. Rangelov M. Using carbon fiber composites for reinforcing pervious concrete / M. Rangelov // Construction and Building Materials. - 2016. - Vol. 126. - pp. 875-885. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.035.
28. Henschen Jonatan. Bacterial adhesion to polyvinylamine-modified nanocellulose films / J. Henschen, P.A. Larsson, J. Illergard, L. Wagber, M.Ek // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 151. - 2017. - Vol. 1. - pp. 224-231. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2016.12.018.
29. Баталин, Б.С., Козлов И.А. Исследование физико-механических свойств скопа картонного производства // Известия вузов. Строительство. 2004. №1. С. 32–34.
30. Селянина С.Б., Труфанова М.В., Афанасьев Н.И., Селиванова Н.В. Поверхностно-активные свойства сульфатных лигнинов // Журнал прикладной химии. 2007. №11. С. 1807–1810.
31. Судакова И.Г., Кузнецов Б.Н., Гарынцева Н.В., Королькова И.В. Состав и связующие свойства лигнинов, полученных окислительной делигнификацией древесины пихты, осины и березы в среде уксусной кислоты // Химия растительного сырья. 2010. №3. С. 55–60.

32. Kozlov I.A. Foamed concrete with wastes of pulp and paper industry / B.S. Batalin, I.A. Kozlov // «Role for concrete in global development»: Proceeding of the International Conference. – Dundee: University of Dundee, Scotland, UK, 8-9 July 2008, pp. 419-426.

33. Степанова М.П., Сотникова О.А. Реализация механизмов контактно-конденсационной теории твердения при формировании строительных композитов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020. №24(1). С.90–102.

34. Цветков М.В., Салганский Е.А. Лигнин: направление использования и способы утилизации (обзор) // Журнал прикладной химии. 2018. №7(91). С.988–997.

35. Баталин Б.С., Козлов И.А. Исследование адгезионных свойств скопа целлюлозно-бумажных комбинатов // Известия вузов. Строительство. 2005. №3. С. 42–44.

36. Криворотова А.И., Усольцев О.А. Разработка и исследование свойств теплоизоляционного материала из макулатурной массы и бытовых отходов полимеров // Хвойные бореальной зоны. 2017. №3–4. С.84–89.

REFERENCES

1. Batalin B.S., Kozlov I.A. Utilizatsiya skopa OOO "Permsky karton" [Disposal of scop LLC "Permskiy karton"]. *Ehcologiya i promyshlennost' Rossui* 2009; 6: 20-22 (in Russia).

2. Batalin B.S., Kozlov I.A. Stroitel'nye materialy iz skopa – othoda tsellulozno-bumazhnoy promyshlennosti [Construction materials based on scop - waste from the pulp and paper industry]. *Stroitel'nye materialy*. 2004; 1: 42-43 (in Russia).

3. Hechenkin A.U. Kartsev I.I., Koltunov A.S., Kutsenko O.I. Issledovanie svoystv stroitel'nykh materialov na osnove drevestnykh othodov [Study of the properties of building materials based on wood waste]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologiya*. 2016; 5(8): 147-152 (in Russia).

4. Remizova V.M. Kompozity iz othodov [Waste composites]. *Universal'naya nauka*. 2018; 1(5): 79-82 (in Russia).

5. Miftahov M.N., Makhnuk D.V. Issledovanie sorbtionnykh svoystv modifitsirovannykh sorbentov, poluchennykh iz othodov tsellulozno-bumazhnoy promyshlennosti – skopa [Study of the sorption properties of modified sorbents obtained from the waste of the pulp and paper industry - scop]. *Sotsial'no-ekonomicheskie i tekhnicheskie sistemy: issledovanie, proektirovanie, optimizatsiya*. 2020; 3(86): 21-58 (in Russia).

6. Batalin B.S., Kozlov I.A. Ispol'zovanie skopa dlya obespecheniya gigienicheskoy bezopasnosti zhilisha [Use of scop to ensure the hygienic safety of residential premises]. *Sovremennye problem nauki i obrazovaniya*. 2012; 4: 104 (in Russia).

7. Imaikina A.R., Shirinkina E.S. Analiz napravlnii ispol'zovaniya osadkov stochnykh vod tsellulozno-bumazhnykh predpriyati v stroitel'noi otrasli [Analysis of the use of waste water sludge from pulp and paper enterprises in the construction industry]. *Himiya. Ekologiya. Urbanistika*. 2018; 108-111 (in Russia).

8. Matveeva Z.O. Ispol'zovanie osadkov stochnykh vod v proizvodstve keramzita [Usage of sediments of sewage in haydite production]. *Bumazhnaya promyshlennost'*. 1980; 3: 24 (in Russia).

9. Shirinkina E.S., Vaisman Y.I., Zhytnuk V.A., Monchenko S.V. Resursosberegayushaya tekhnologiya obrasheniya s othodami pererabotki makulturnoi massy [Resource-saving technology for waste management of waste paper recycling]. *Ehcologiya i promyshlennost' Rossui*. 2015; 7: 10-15 (in Russia).

10. Ol'kov P.L. Uluchshenie kachestva keramzita putem ustraneniya slipaniya syrtsovykh granul v protsesse sushki [Martempering of quality of haidite by adhesion eliminations of the crude pellets in the course of drying]. *Stroitel'nye materialy*. 1980; 5: 16-17 (in Russia).

11. Chen H.J. Paper sludge reuse in lightweight aggregates manufacturing / H.J. Chen, Y.C. Hsueh, C.F. Peng, C.W. Tang // *Materials*. 2016; 9 (11). 876: 1–9. DOI: 10.3390/ma9110876.

12. Pichugin A.P., Denisov V.F. Khritankov V.F. Effektivnye organomineral'nye betony s povyshennymi teplo- i zvukoizoliruyushchimi svoystvami [Effective organic and mineral betons with the raised warmly- and sound insulating properties]. *Stroitel'nye materialy*. 2008; 5: 73-75 (in Russia).

13. Fedorov V.I. Povyshenie kachestva fibropenobetona vvedeniem tselluloznykh volokon [Improving the quality of fiber foam concrete with the introduction of cellulose fibers]. *Stroitel'stvo: Novye tekhnologii – novoe oborudovanie*. 2018; 5: 54-56 (in Russia).

14. Adu C. Developing fiber and mineral based composite materials from paper manufacturing byproducts / C. Adu, M. Jolly // *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2017; 68: 435–444. DOI.org/10.1007/978-3-319-57078-5_41.

15. Shirinkina E.S. Poluchenie ekologicheskii bezopasnykh stroitel'nykh materialov s ispol'zovaniem osadkov stochnykh vod tsellulozno-bumazhnogo proizvodstva [Production of environmentally safe building materials using waste water sludge from pulp and paper production]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2018; 4: 85-92 (in Russia).

16. Hishikava Y. Characterization of individual hydrogen bonds in crystalline regenerated cellulose using resolved polarized FTIR spectra / Y. Hishikava, E. Togawa T. Kondo // *ACS Omega*. 2017; 2(4): 1469-1476. DOI. org/10.1021/acsomega.6b00364.

17. Muratova A.A. Kartushina U.N. Razrabotka sostava teploizolyatsionnykh izdelii iz makulatury i polimernykh othodov [Development of the composition of thermal insulation products from waste paper and polymer waste]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2020; 3(80): 73-83 (in Russia).

18. Dubatovska A.I. Obzor tekhnicheskikh svoystv tselluloznoi izolyatsii [Overview of the technical properties of cellulose insulation] *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*. 2018; 8: 67-81 (in Russia).

19. Osovskaya I.I., Antonova V.S. Vliyanie poverhnosti destruktzii na gidrofil'nost' i svyazuyuschuyu sposobnost' tselluloznykh volokon [Effect of surface degradation on hydrophilicity and binding capacity of cellulose fibers]. *Himiya rastitel'nogo syr'ya*. 2020; 1: 315-320 (in Russia).

20. Rubleva N.V. Production of cellulose nanocrystals by hydrolysis in mixture of hydrochloric and nitric acids. / N.V. Rubleva, E.O. Lebedeva, A.V. Afineevskii, M.I. Voronova, O.V. Surov, A.G. Zakharov // *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2019. vol.62, no 12, pp.85-93. DOI: 10.6060/ivkkt.20196212.5984.

21. Zoltan Borcsok / Zoltan Borcsok, Srivaro Suthon, Zoltan Pasztory // Effect of heat treatment on some cellular properties of rubberwood (*Hevea brasiliensis* Mull. Arg.). *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, 24(2): 43-50. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-43-50.

22. Chulkova I.L., Selivanov I.A. Issledovanie vliyaniya dobavki skopa na strukturoobrazovanie tsementnogo kamnya metodom kolichestvennogo rentgenofazovogo analiza [Influence of the scop addition on the structure formation of the cement stone by the method of quantitative x-ray phase analysis]. *Vestnik SibADI*. 2019; 4: 504-518 (in Russia).

23. Chulkova I.L., Selivanov I.A. Izuchenie strukturoobrazovaniya organomineral'nykh kompozitsiy s voloknistym zapolnitelem metodom elektronnoy mikroskopii [Study of the structure formation of organomineral compositions with a fibrous filler by electron microscopy]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2019; 12: 41-47 (in Russia).

24. Smolin, A.S. Role of the relaxation state of polymer components in wood when making composite packaging materials (corrugated cardboard) / A.S. Smolin, E.L. Akim // *Fiber Chemistry*. 2018; 50(4):336-344. DOI: 10.1007/s10692-019-09986-3.

25. Abitbol T. A. Nanocellulose a tiny fiber with huge applications / T.A. Abitbol, A. Rivkin, Y. Cao, Y. Nevo, E. // *Current Opinion in Biotechnology*. 2016; 39: 76-88. DOI: 10.1016/j.copbio.2016.01.002

26. Mahyar Fazeli. Improvement in adhesion of cellulose fibers to the thermoplastic starch matrix by plasma treatment modification / Mahyar Fazeli, Jennifer Paola Florez, Renata Antoun Simão // *Plasma Processes and Polymers*. – 2019. – Vol.16(6), pp.207-2016. DOI:10.1002.pppa.201800167.

27. Rangelov M. Using carbon fiber composites for reinforcing pervious concrete / M. Rangelov // *Construction and Building Materials*. 2016. 126: 875-885. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.035.

28. Henschen Jonatan. Bacterial adhesion to polyvinylamine-modified nanocellulose films / J. Henschen, P.A. Larsson, J. Illergard, L. Wagber, M.Ek // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 151. – 2017. – Vol 1. – pp. 224-231. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2016.12.018.

29. Batalin B.S., Kozlov I.A. Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv skopa kartonnogo proizvodstva [Investigation of the physical and mechanical properties of an scop of cardboard production]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2004; 1: 32-34 (in Russia).

30. Selyanina S.B., Trufanova M.V., Afanas'ev N.I., Selivanova N.V. [Surface-active properties of sulfate lignins]. *Zhurnal prikladnoy himii*. 2007; 11: 1807-1810 (in Russia).

31. Sudakova I.G., Kuznetsov B.N., Garyntseva N.V., Korol'kova I.V. Sostav i svyazuuschie svoystva ligninov, poluchennykh oksislitel'noy delignifikatsii drevesiny pithy, osiny i breezy v srede uksusnoy kisloty [Composition and binding properties of lignins obtained by oxidative delignification of fir, aspen and birch wood in acetic acid] *Himiya rastitel'nogo syr'ya*. 2010; 3: 55-56 (in Russia).

32. Kozlov I.A., Batalin B.S. Foamed concrete with wastes of pulp and paper industry. «Role for concrete in global development»: Proceeding of the International Conference. – Dundee: University of Dundee, Scotland, UK, 8-9 July 2008, pp. 419-426.

33. Stepanova M.P., Sotnikova O.A. Realizatsiya mekhanizmov kontaktno-kondensatsionnoy teorii

tverdeniya pri formirovani sroitel'nykh kompozitov [Implementation of mechanisms of contact-condensation theory of hardening in the formation of building composites]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. 2020; 24(1): 90-102 (in Russia).

34. Tsvetkov M.V., Salganskii E.A. Lignin: napravlenie ispol'zovaniya i sposoby utilizatsii [Lignin: the direction of use and methods of disposal (review)]. *Zhurnal prikladnoy himii*. 2018; 7(91): 988-997 (in Russia).

35. Batalin B.S., Kozlov I.A. Issledovanie adgezionnykh svoystv skopa tsellulozno-bumazhnykh kombinatov [Investigation of the adhesion properties of an scop of pulp and paper mills]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2005; 3: 42-44 (in Russia).

36. Krivova A.I., Usol'tseva O.A. Razrabotka i issledovanie svoystv teploizolyatsionnogo materiala iz makulturnoi massy i bytovykh othodov polimerov [Development and research of properties of thermal insulation material from waste paper and household waste polymers]. *Hvoinye boreal'noi zony*. 2017; 3-4: 84-89.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Чулкова И.Л. разработка модели и определение методов исследования;

Селиванов И.А. обзор публикаций по направлению исследования, подготовка исходных материалов, получение и анализ результатов исследования, написание текста.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Irina L. Chulkova – the model development, research methods determination;

Igor A. Selivanov – publications on research review, original material preparation, research results obtaining and analyzing, text writing

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чулкова Ирина Львовна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Организация, технологии и материалы в строительстве» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», ORCID ID 0000-0003-4451-2297 (644080, г. Омск, Пр. Мира, 5, e-mail: le5@inbox.ru, chulkova_il@sibadi.org).

Селиванов Игорь Алексеевич – соискатель кафедры «Организация, технологии и материалы в строительстве» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», ORCID ID 0000-0002-0731-0234 (644080, г. Омск, Пр. Мира, 5, e-mail: igoralk2014@mail.ru)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Irina L. Chulkova – Dr. of Sci., Professor, Professor of the Organization, Technologies and Materials in Construction Department, Siberian State Automobile and High University, ORCID ID 0000-0003-4451-2297 (Omsk, e-mail: Le5@inbox, chulkova_il@sibadi.org).

Igor A. Selivanov – Doctoral student of the Organization, Technologies and Materials in Construction Department, Siberian State Automobile and High University, ORCID ID 0000-0002-0731-0234 (Omsk, e-mail: igoralk2014@mail.ru).

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-216-224>
УДК 691.327 : 620.17

МОДЕЛЬ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА НА ОТРЫВ СО СКАЛЫВАНИЕМ

Ю.В. Краснощеков

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»,
г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Для контроля прочности бетона железобетонных конструкций применяется метод отрыва со скалыванием, основанный на эмпирической пропорциональной зависимости прочности бетона и усилия вырывания специального анкера с разжимным конусом. Отсутствие физической модели разрушения бетона при отрыве со скалыванием – признак несовершенства этого метода, затрудняющий поиск путей повышения точности и достоверности результатов. Цель данного исследования – разработка физической модели разрушения бетона для определения расчетной прочности методом отрыва со скалыванием.

Материалы и методы. Модель прочности бетона представляет собой механизм местного разрушения путем вырывания массива бетона в виде условного конуса при извлечении из заранее изготовленной скважины анкера. Принято, что разрушение происходит в два этапа: от выкалывания бетона с образованием трещин в плоскости вершины бетонного конуса на первом этапе и последующего образования трещин по боковой поверхности конуса при извлечении анкера. Расчетом определяется среднее значение прочности бетона на растяжение. Для перехода к сопротивлениям сжатию используется усредненное значение отношения сопротивлений бетона сжатию и растяжению или формула Фере. Модель проверена расчетом 6 опытных измерений.

Выводы. Установлено, что принимаемая при испытании бетона методом отрыва со скалыванием эмпирическая зависимость сопротивления бетона сжатию и усилия вырывания анкера возможна только при линейной зависимости сопротивлений бетона сжатию и растяжению. Однако действительное отношение сопротивлений бетона сжатию и растяжению имеет нелинейный характер, поэтому для относительно слабых бетонов возможность завышения прочности бетона на сжатие эмпирической зависимостью нивелируется понижающим коэффициентом, а для более прочных бетонов результаты измерений оказываются заниженными.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: прочность бетона, метод отрыва со скалыванием, теоретическая модель, напряженное состояние, анкер с разжимным конусом.

Поступила 07.03.21, принята к публикации 28.04.21.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Краснощеков Ю.В. Модель прочности бетона на отрыв со скалыванием / Ю.В. Краснощеков. – DOI <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-216-224> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 2(78). – С. 216-224.

© Краснощеков Ю.В., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-216-224>

MODEL OF SHEAR TEST FOR TEARING STRENGTH OF CONCRETE

Yuri V. Krasnoshchekov

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

ABSTRACT

Introduction. To control the concrete strength of reinforced concrete structures the shear test based on the empirical proportional dependence of concrete strength and tear force of a special purpose anchor with an expanding cone is used. The absence of a physical model of a concrete deterioration when tearing strength is a sign of the defect of the method which hampers the search of the ways for accuracy increase and test validity. The purpose of this study is to develop a physical model of concrete deterioration to determine the calculated strength by the shear test.

Materials and methods. The concrete strength model is a mechanism for local deterioration by tearing out a body of concrete in the form of an indicative cone when extracting it from a pre-fabricated anchor well. It is accepted that the deterioration occurs in two stages: from the melting of the concrete to the formation of cracks in the plane of the apex of the concrete cone in the first stage and the subsequent formation of cracks along the lateral surface of the cone during the extraction of the anchor. For transition to compression resistance, the average of the ratio of concrete resistance to compression and tensile or Fere formula shall be used. The model was verified by the calculation of 6 test measurements.

Conclusions. It has been established that the empirical correlation between the resistance of concrete to compression and the force of extraction of the anchor in the concrete test is only possible if the resistance of concrete is linearly related to compression and extension. However, the actual ratio of concrete resistance to compression and tensile is non-linear, so for relatively weak concrete the possibility of overestimating the strength of concrete on compression empirical dependence is offset by a reduction factor, and for more durable concrete, measurements are underestimated.

KEYWORDS: strength of concrete, shear test, theoretical model, stress state, anchor with expanding cone.

Submitted 07.03.21, revised 28.04.21.

The authors have read and approved the final manuscript.

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

For citation: Krasnoshchekov Y.V. Model of shear test for tearing strength of concrete. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (2): 216-224. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-216-224>

© Krasnoshchekov Y.V., 2021



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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Метод отрыва со скалыванием основан на пропорциональной зависимости прочности бетона и усилия вырывания специального анкера с разжимным конусом. Однако объяснить механизм местного разрушения бетона в зависимости от прочности на сжатие до сих пор не удавалось. Отсутствие физической модели разрушения бетона при отрыве со скалыванием – очевидный недостаток этого метода, затрудняющий поиск путей повышения точности и достоверности результатов. Цель данного исследования – разработка физической модели разрушения бетона для определения расчетной прочности методом отрыва со скалыванием.

2. Расчетная теоретическая модель прочности бетона получена в результате анализа причин местного разрушения при вырывании массива бетона закрепленным в нем анкером. Предположено, что основной причиной разрушения является образование трещин от растягивающих (раскалывающих) напряжений и излома массива бетона при извлечении анкера. Расчетом определяется среднее значение прочности бетона на растяжение на условной поверхности основания массива, размеры которой зависят от параметров анкера.

3. Установлено, что при преобразовании сопротивления бетона растяжению в сопротивление сжатию нарушается пропорциональная зависимость прочности бетона и усилия вырывания. В результате этого применение методом отрыва со скалыванием эмпирических коэффициентов пропорциональности может привести к ошибочным результатам испытаний. Чем точнее выполняется преобразование прочности на растяжение в прочность на сжатие, тем точнее результаты расчета с использованием разработанной модели и опытных значений выдерживающих усилий.

Основное предназначение теоретической модели – проверочный расчет прочности бетона на действие опытных значений выдерживающих усилий с учетом проскальзывания анкеров. Теоретическая модель необходима для определения путей совершенствования эмпирического метода отрыва со скалыванием и выявления причин возможных ошибок измерений.

ВВЕДЕНИЕ

Для контроля прочности бетонов монолитных и сборно-монолитных конструкций применяется метод отрыва со скалыванием¹. Метод основан на связи прочности бетона со средним значением усилия местного разрушения бетона при вырыве из него анкерного устройства. Метод относят к прямым неразрушающим методам контроля, так как для его реализации не требуется построения градуировочных зависимостей, но используются универсальные функции, привязанные к прочности бетона конструкций. В качестве такой функции применяется эмпирическая зависимость в виде²:

$$R_k = m_1 m_2 P, \quad (1)$$

где m_1 – коэффициент, учитывающий максимальный размер крупного заполнителя в зоне вырыва и принимаемый равным 1 при крупности заполнителя менее 50 мм; m_2 – коэффициент пропорциональности для перехода от усилия вырыва P в кН к кубиковой прочности бетона на сжатие R_k в МПа.

Механические методы определения прочности бетона путем испытания на отрыв со скалыванием подразделяют на два вида: основанные на зависимости между сопротивлением сжатию и величиной сцепления металла с бетоном, а также на определении сопротивления сжатию по величине усилия, необходимого для отрыва и скалывания куса бетона из конструкции [1]. К первому виду, в частности, относится метод Г.Л. Перфильева, заключающийся в том, что в бетонируемую конструкцию заделывают арматурные стержни, при выдергивании которых с помощью динамометра определяют усилие и сопротивление бетона в зависимости от его сцепления с арматурой. Для испытания методом второго вида вместо арматурного стержня применяется специальный анкер (вырывной стержень) с утолщением на конце. При выдергивании такого стержня происходит скалывание бетона у конца анкера. Этот метод развил Б.Г. Скрамтаев, предложив для определения прочности затвердевшего бетона закладывать стержень в пробитую шлямбуром скважину с зачеканкой полостей высокопрочным раствором. опыты показали,

¹ ГОСТ 18105–2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. Москва : Стандартинформ, 2010. С. 19. Дата введения: 2020-01-01.

² ГОСТ 22690–2015. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. Москва : Стандартинформ, 2019. С. 20. Дата введения: 2016-04-01.

что при выдергивании стержня разрыв всегда происходит по бетону конструкции. Позднее И.В. Вольф предложил применять в комбинации со стержнем разжимной конус, в результате чего анкер становится распорным [2].

Метод отрыва со скалыванием наряду с другими методами неразрушающего контроля за прочностью бетона широко применяется не только в России, но и за рубежом³ [3, 4, 5, 6, 7, 8]. Приборы, реализующие метод отрыва со скалыванием, изготавливают в РФ, США, Канаде, скандинавских странах и др. За рубежом метод отрыва со скалыванием используется только для приближенной оценки прочности бетона, так как считается, что он уступает по достоверности и точности методу испытания образцов, отобранных из конструкций [9]. Для обеспечения достоверности этого метода зарубежные стандарты требуют построения частных градуировочных зависимостей, что усложняет технологию измерений и удорожает испытания.

При сравнении результатов измерений прочности бетона разными методами неразрушающего контроля оказалось, что в подавляющем большинстве случаев прочность, определенная по методу отрыва со скалыванием, имеет большее значение, причем расхождение на ряде объектов достигало 50% [10, 11, 12, 13]. Конечно, по этим данным нельзя однозначно утверждать, что метод отрыва со скалыванием дает завышенные результаты, тем более что, по мнению Б.Г. Скрамтаева, метод испытания бетона на отрыв и скалывание обеспечивает наибольшую точность в сравнении с другими неразрушающими механическими методами⁴.

К сожалению, возникновение сомнений в достоверности метода обосновано отсутствием физической модели местного разрушения бетона при извлечении анкера. Авторы методического пособия [14] объясняют этот факт тем, что рекомендуемые для проектировщиков эмпирические зависимости, характеризующие несущую способность анкера по контакту с бетонным основанием, не могут быть обоснованы теоретическими зависимостями, поскольку напрямую зависят от конструктивных особенностей каждого анкера.

Отсутствие физической модели разрушения бетона при отрыве со скалыванием – признак несовершенства этого, как и любого другого, эмпирического метода, затрудняющий поиск путей повышения точности и достоверности. Для устранения этого недостатка в данном исследовании решается задача о разработке физической модели разрушения бетона при отрыве со скалыванием.

Цель данного исследования – разработка физической модели разрушения бетона для оценки прочности методом отрыва со скалыванием.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Приступая к выполнению поставленной задачи, отметим, что термины, образующие название метода отрыва со скалыванием, очевидно, связаны с характером местного разрушения бетона конструкции при выдергивании анкера. Бетон при действии на него вырывающего усилия находится в сложном напряженно-деформированном состоянии. Различают два представления о разрушении материала в таких условиях: как о явлении отрыва от действия главных растягивающих напряжений или деформаций удлинения и о явлении среза или скалывания, обусловленном действием касательных напряжений. Сжимающие напряжения сами по себе не могут привести к разрушению материала⁵ [15]. Бетон может разрушаться как путём отрыва, так и путем среза. Действительный характер разрушения можно установить из сопоставления сопротивлений бетона отрыву и скалыванию. При испытании методом отрыва со скалыванием происходит обычно вырывание анкером массива бетона в виде усеченного конуса, что свидетельствует о разрушении путем отрыва. Это означает, что сопротивление бетона отрыву (растяжению) меньше сопротивления срезу. В противном случае разрушение происходило бы путем скалывания.

При формировании модели прочности бетона исходили из предпосылки разрушения бетона от выкалывания по поверхности условного конуса выдергивающим усилием $P = P_1 + P_2$ (рисунок 1). Исходя из принципа разложения сил, принято, что разрушение осуществляется в два этапа.

³ Биби Э.В., Нараянан Р.С. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 2: Проектирование железобетонных конструкций / пер. с англ. Москва : МГСУ, 2013. 292 с.

⁴ Лещинский М.Ю., Скрамтаев Б.Г. Испытание прочности бетона. Москва : Стройиздат, 1973. 272 с.

⁵ Беляев Н.М. Сопротивление материалов. Москва : Наука. 1976. 856 с.

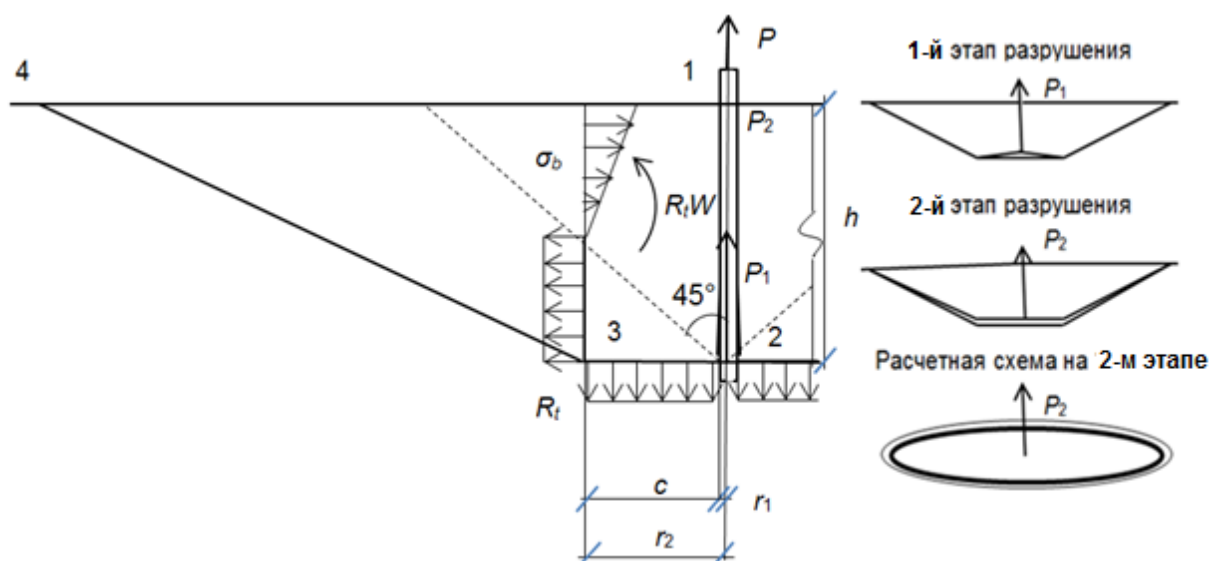


Рисунок 1 – Схема усилий при разрушении бетона методом отрыва со скалыванием

Figure 1 – Diagram of the forces during the concrete deterioration with a shear test

Источник: составлено автором на основе изучения механизма разрушения бетона

На первом этапе от усилия P_1 происходит истощение прочности бетона на выкалывание, эквивалентной действию напряжений R_p , с образованием трещины в плоскости вершины бетонного конуса (линия 2–3). На втором этапе при извлечении анкера усилием P_2 от действия момента $P_2 r_2$ образуются трещины по боковой поверхности конуса (линия 4–3) и окончательное разрушение.

Расчет на выкалывание производится из условия $P \leq 0,5 R_t A$ при площади $A = \pi[(h + r_1)^2 - r_1^2]$ основания выкалываемого бетонного конуса с образующей, направленной под углом 45° к оси⁶. Горизонтальная площадь отрыва бетона в плоскости вершины конуса определяется из условия прочности на растяжение

$$A_t = \pi[(h + r_1)^2 - r_1^2]/2 = P_1/R_t. \quad (2)$$

В ряде стран распространена концепция расчетной модели разрушения анкеровки в результате раскалывания бетонной оболочки, окружающей арматуру, от кольцевых напряже-

ний [17, 18, 19]. Идея этой модели была впервые изложена Р. Тепферсом [16]. Распределение круговых (раскалывающих) напряжений в бетонной оболочке с арматурным стержнем показано на рисунке 2. Р. Тепферс, рассматривая напряженно-деформированное состояние бетонной оболочки в упругой стадии, принимал распределение напряжений по длине анкеровки под углом $\alpha = 45^\circ$. В работах [17, 18] предположено, что в предельном состоянии угол наклона зависит от соотношения прочности бетона на растяжение и срез.

Источник: заимствовано [18] с авторским изменением и дополнением

Образование перелома по линии, разделяющей нижнее основание и боковую поверхность конуса выкалывания, иногда можно проследить при испытании (рисунок 3). Обратим внимание, что в действительности поверхность отрыва бетона (в пределах размера с) скорее криволинейная, чем горизонтальная, как принято в расчетной схеме для упрощения.

⁶ Голышев А.Б., Бачинский В.Я., Полищук В.П., Харченко А.В., Руденко И.В. Проектирование железобетонных конструкций. Киев : Будивэльныик. 1990. 544 с.

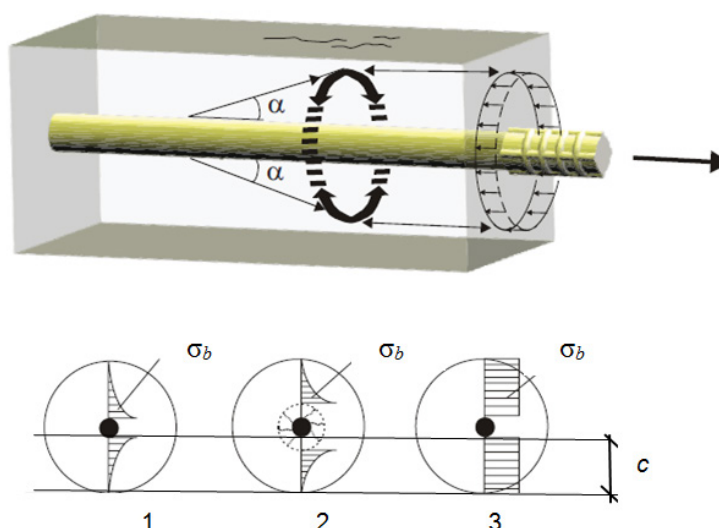


Рисунок 2 – Растягивающие напряжения в бетонной оболочке в упругой стадии – 1, в упругой стадии при наличии трещин – 2 и в пластической стадии – 3

Figure 2 – Tensile stresses in the concrete shell in the elastic stage – 1, in the elastic stage with cracks – 2 and in the plastic stage – 3

Источник: заимствовано [18] с авторским изменением и дополнением



Рисунок 3 – Выкалывание бетона при испытании на отрыв со скалыванием

Figure 3 – Breaking out of concrete during a shear test

Источник: заимствовано в сети Интернет с авторским дополнением

После образования горизонтальной трещины массив бетона, характеризуемый точками

1, 3, 4 представляет собой круговую консоль, нагруженную усилием P_2 . Расчетная схема массива представлена на рисунке 1 в виде круглой пластины, защемленной по контуру. Несущая способность бетонной пластины характеризуется моментом $M = R_t W$, где $W = bh^2/3,5$ – момент сопротивления сечения высотой h с учетом неупругих свойств бетона в предельном состоянии. Момент на единичной ширине контура пластины в виде окружности принимается по справочным данным $M = 1 \cdot P_2/4\pi^7$.

Таким образом, расчетом по схеме 1 определяется среднее значение прочности бетона на растяжение по формуле

$$R_t = P/(4\pi W + A_t). \quad (3)$$

Выражение $(2\pi W + A_t)^{-1}$ является коэффициентом пропорциональности в виде отношения R_t к P . Единичная величина момента сопротивления эквивалентна площади сечения и имеет соответствующую размерность. Теоретическая зависимость (3) является физической моделью прочности бетона на растяжение при испытании методом отрыва со скалыванием. Следует отметить, что получаемые при расчете и испытании значения напряжений (сопротивлений) являются средними.

⁷ Вайнберг Д.В., Вайнберг Е.Д. Расчет пластин. Киев : Будівельник, 1870. 436 с.

Для перехода к нормативным или расчетным значениям можно руководствоваться соответствующими пособиями⁸.

Методом отрыва со скалыванием можно не только определить прочность бетона, но и оценить соотношение сопротивлений бетона растяжению и срезу τ/R_t . В данном случае сопротивление срезу понимается как максимальное значение касательных напряжений в бетоне, окружающем анкер, $\tau = P/2\pi r_1 h$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Выражение в знаменателе формулы (3) зависит только от параметров анкера h и r_1 . Значения параметров анкера приведены, в частности, в руководстве по использованию прибора ОНИКС ОС-100⁹.

Например, при $h = 4,8$ см и $r_1 = 1,2$ см (радиус шнура) получены $A_t = 54,2$ см² и $2\pi W = 82,7$ см². Сопротивление бетона растяжению

$$R_t = P/0,0137 \text{ кН/м}^2. \quad (4)$$

Таким образом, расчетом установлена линейная зависимость сопротивления бетона растяжению от выдерживающей силы с частным значением (применительно к анкеру $h = 4,8$ см) коэффициента пропорциональности $R_t/P = (2\pi W + A_t)^{-1} = 0,073$ см⁻². Если для преобразования сопротивления бетона растяжению в сопротивление сжатию применить соотношение средних значений сопротивлений растяжению при раскалывании и сжатию $R_t/R_k = 0,08$ согласно ГОСТ 10180¹⁰, то коэффициент пропорциональности равен 0,91, что соответствует коэффициенту m_2 в формуле (1).

Подставляя в (4) $0,08R_k$ вместо R_t , получим при условии выражения P в кН прочность бетона на сжатие $R_k = P/1000 \cdot 0,0137 \cdot 0,08 \approx 0,91P$ МПа. Таким образом, расчетная модель прочности бетона соответствует эмпирической зависимости (1) с коэффициентом $m_2 = 0,9$ для анкера $h = 4,8$ см.

Для анкера $h = 3,5$ см и $r_1 = 0,8$ см получено $A_t = 28,0$ см², $4\pi W = 44,0$ см² и $R_k = P/1000 \cdot 0,0072 \cdot 0,08 \approx 1,74P$ МПа или $R_k \approx P$ при $m_2 = 1,7$ в эмпирической зависимости.

В некоторых случаях (для бетонов малой прочности) более приближенными к расчет-

ной модели опытные данные можно получить, если преобразование сопротивления бетона растяжению в сопротивление сжатию выполнять по известной формуле Фере $R_t = 0,234R_k^{2/3}$, как это принято в нормах проектирования железобетонных конструкций.

Применение разработанной модели позволяет расчетом определить влияние проскальзывания анкера на результаты измерения. Руководством проскальзывание Δh анкера учитывается коэффициентом $\gamma = [h/(h - \Delta h)]^2$. Например, при $\Delta h = 0,1h$ получено $\gamma = 1,235$. Влияние проскальзывания анкера в расчетной модели можно учесть соответствующим уменьшением величины h на 10%. Для анкера, рассмотренного в примере, новое значение $h = 4,32$ см. При этом получено $A_t = 45,6$ см², $4\pi W = 67,0$ см², $R_t = P/113$ кгс/см², $R_k = P/0,0113 \cdot 0,08$ и $R_k = 1,106P$ при $\gamma = 1,106/0,9 = 1,229$.

Расчетная модель использована для анализа результатов испытаний, выполненных В.В. Овчинниковой при обследовании монолитных фундаментов зданий в октябре 2020 г. Для фундаментов применен тяжелый бетон проектного класса В 25 и В 30. Измерения прочности производились прибором ОНИКС ОС-100. Для анализа представлены показания прибора о кубиковой прочности бетона $R_{k,оп}$ в возрасте 7-9 сут при твердении с электропрогревом. Принятые для дальнейших расчетов и приведенные в таблице выдерживающие усилия P определены из зависимости (1) при $m_1 = 1$ и $m_2 = 0,9$. Теоретические значения растягивающих напряжений R_t получены по формуле (3) $R_t = P/1000 \cdot 0,0137$ МПа. Соответствующие напряжения сжатия (кубиковая прочность) $R_k = R_t/0,08$. Максимальные касательные напряжения на поверхностях анкерного шнура определены по формуле $\tau = P/2\pi r_1 h$.

Результаты, представленные в столбцах 6 и 7 (перед чертой) подтверждают высокую эффективность разработанной модели. За чертой приведены результаты проверочного расчета с применением формулы Фере. Они свидетельствуют о том, что опытные данные сопротивлений бетона сжатию по сравнению с данными теоретической модели занижены.

⁸ Методика статистической оценки прочности бетона в железобетонных конструкциях. Методическое пособие. М. : 2017. 148 с.

⁹ Измеритель прочности материалов ОНИКС-1. Челябинск : Интерприбор. 2014. 56 с.

¹⁰ ГОСТ 10180–2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М. : Стандартинформ, 2013. С. 30. Дата введения: 2013-07-01.

Таблица
Результаты проверочного расчета опытных измерений

Table
Results of verification calculation of experimental measurements

№	$R_{k,оп}$, МПа	P , кН	R_p , МПа	R_k , МПа	$m_2 = R_k/P$	$R_k/R_{k,оп}$	τ , МПа	τ/R_t
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	28,4	31,6	2,31	28,9/31,0	0,91/0,98	1,02/1,09	8,39	3,6
2	31,0	34,4	2,51	31,4/35,1	0,91/1,02	1,01/1,13	9,13	3,6
3	29,9	33,2	2,43	30,4/33,5	0,92/1,01	1,02/1,12	8,81	3,6
4	44,7	49,7	3,63	45,4/61,1	0,91/1,23	1,02/1,37	13,19	3,6
5	37,0	41,1	3,00	37,5/45,9	0,91/1,12	1,01/1,24	10,91	3,6
6	28,4	31,6	2,31	33,0/31,0	0,91/0,98	1,02/1,09	8,39	3,6

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получена физическая модель прочности бетона на растяжение при испытании методом отрыва со скалыванием. Основой модели является механизм местного разрушения бетона при выдергивании анкера с разжимным конусом в результате отрыва и излома бетонного массива в виде условного усеченного конуса после образования трещины раскалывания на поверхности конуса. Определяемая с помощью физической модели прочность бетона зависит от параметров анкера.

Установлено, что эмпирическая линейная зависимость (1) соответствует теоретической модели при преобразовании расчетной прочности на растяжение (2) в практически востребованную прочность на сжатие через усредненное отношение $R_t/R_k = 0,08$. Отличие действительного отношения R_t/R_k от усредненного значения вносит определенную погрешность в результаты расчета и испытания. В эмпирической зависимости завышение устраняется применением понижающего коэффициента m_2 . Для более прочных бетонов (больше В 30), наоборот, эмпирическая и расчетная прочность на сжатие занижаются. Занижение прочности на сжатие для прочных бетонов подтверждают расчеты с применением формулы Фере.

Отмеченные нюансы удалось установить из анализа результатов расчета с использованием разработанной модели. Основное предназначение модели – для проверочного расчета на действие опытных значений выдергивающих усилий. Чем точнее выполняется преобразование прочности на растяжение в прочность на сжатие, тем точнее результаты расчета с использованием разработанной модели и опытных значений выдергивающих усилий. Применение теоретической модели при анализе опытных данных позволяет определить пути совершенствования эмпирической модели в случаях обнаружения ошибочности результатов измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вольф И.В. [и др.] Определение прочности бетона в конструкциях методом вырывания стержней // Бетон и железобетон. 1973. №10. С. 20–22.
2. Saleem M., Hasir M. Bond Evaluation of Concrete Bolts Subjected to Impact Loading. Journal of Materials and Structures 2016. 49(9): 3635-3646.
3. Hoehler M., Eligehausen R. Behavior and testing of anchors in simulated seismic cracks. ACI Structural Journal, 2008. 105(3): 348-357.
4. EN 1992-4. 2018 Eurocode 2 – Design of concrete structures – Part 4: Design of fastenings for use in concrete – CEN, Brussels, 2018.
5. ETAG 001 Guideline for European technical approval of metal anchors for use in concrete – EOTA, Brussels, 2013.
6. ACI 318-14 Building Code Requirements for Structural Concrete – American Concrete Institute, 2014.
7. Улыбин А.В., Зубков С.В., Федотов С.Д. Ошибка определения прочности бетона методом отрыва со скалыванием // Научные труды Общества железобетонщиков Сибири и Урала. – Новосибирск. СГУПС. 2016. Вып. 12. С. 1–7.
8. Петраков А.Н., Букин А.В. Определение прочности бетона методами разрушающего и неразрушающего контроля // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2010. №1. С. 89–94.
9. Улыбин А.В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений. Инженерно-строительный журнал. 2012. №4. С. 10–15.
10. Леонович С.Н., Снежков Д.Ю. Исследование неравнопрочности бетона на объекте монолитного строительства комплексным неразрушающим методом контроля // Известия ВУЗов. Строительство. 2009. №8 (608). С. 108–115.
11. Коревицкая М.Г., Тухтаев Б.Х., Иванов С.И. Применение неразрушающих методов при контроле прочности высокопрочного бетона. Промышленное и гражданское строительство. 2013. №1. С. 53–54.
12. Проектирование анкерных креплений строительных конструкций и оборудования: методическое пособие. Москва. 2018. 106 с.

13. FRP reinforcement in RC structures. Technical report prepared by a working party of Task group 9.3. FIB bulletin 40 (September 2007).

14. Krasnoshchekov Y.V., Krasotina L.V., Pulido-Delgado J.L. Models of direct anchoring of reinforcement in concrete. Magazine of Civil Engineering. 2018. 79(3): 149-160.

15. Jansson, A., Lofgren I., Lundgren K., Gylltoft K. Bond of reinforcement in self-compacting steel-fibre-reinforced concrete. Magazine of Concrete Research, 2012, Volume 64(7): 617-630.

16. Tepfers, R.A. Theory of Bond Applied to Overlapped Tensile Reinforcement Splices for Deformed Bars. PhD thesis, Chalmers University of Technology. Go'teborg, Sweden. 1973.

17. Краснощекоев Ю.В. Моделирование раскалывания бетона в зоне анкеровки ненапрягаемой арматуры // Вестник СибАДИ. 2017. № 2. С. 64–69.

18. Краснощекоев Ю.В., Красотина Л.В. О расчете прочности железобетонных элементов по наклонным сечениям // Промышленное и гражданское строительство. 2020. №6. С. 17–25.

REFERENCES

1. Volf I.V., etc. Opređenje pročnosti betona v konstrukcijskijach metodom vyryvaniya sterzhney [Determination of the strength of concrete in structures by pulling out rods]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. 1973. № 10. Pp. 20-22. (In Russian)

2. Saleem M., Hasir M. Bond Evaluation of Concrete Bolts Subjected to Impact Loading [Оценка сцепления бетонных болтов, подвергнутых ударной нагрузке]. *Journal of Materials and Structures* 2016. 49(9). Pp. 3635-3646.

3. Hoehler M., Elgehausen R. Behavior and testing of anchors in simulated seismic cracks. *ACI Structural Journal*, 2008. 105(3). Pp. 348-357.

4. EN 1992-4. 2018 Eurocode 2 – Design of concrete structures – Part 4: Design of fastenings for use in concrete – CEN, Brussels, 2018.

5. ETAG 001 Guidline for European technical approval of metal anchors for use in concrete – EOTA, Brussels, 2013.

6. ACI 318-14 Building Code Requirements for Structural Concrete – *American Concrete Institute*, 2014.

7. Ulybin A.V., Zubkov S.V., Fedotov S.D. Oshibka opredeleniya pročnosti betona metodom otryva so skalyvaniem [Error in determining the strength of concrete by the method of separation with chipping] // Nauchnye Trudy Obshchestva zhelezobetonshchikov Sibiri i Urala [Scientific works of the Society of Reinforced Concrete Workers of Siberia and the Urals]. *Novosibirsk. SGUPS*. 2016. 12: 1-7. (In Russian)

8. Petrakov A.N., Bukin A.V. Opređenje pročnosti betona metodami razrushayushchego i nerazrushayushchego kontrolya [Determination of concrete strength by destructive and non-destructive testing methods]. // *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta*. 2010. № 1: 89-94. (In Russian)

9. Ulybin A.V. O vybore metodov kontrolya pročnosti betona postroennykh sooruzheniy [On the choice of methods for monitoring the strength of concrete constructed structures]. *Inzhenerno-stroitelny zhurnal*. 2012. № 4: 10-15. (In Russian)

10. Leonovich S.N., Snezhkov D.Yu. Issledovanie neravnomernosti betona na ob'ekte monolitnogo stroitelstva kompleksnym nerazrushayushchim metodom kontrolya [Investigation of non-uniform strength of concrete at a monolithic construction site by a complex non-destructive testing method]. *Izvestiya VUZov Stroitel'stvo*. 2009. 8 (608): 108-115. (In Russian)

11. Korevitskaya M.G., Tuchtaev B.Kh., Ivanov S.I. Primenenie nerazrushayushchikh metodov pri kontrole pročnosti vysokoprochnogo betona [Application of non-destructive methods for testing the strength of high-strength concrete]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2013. № 1: 53-54. (In Russian)

12. Proektirovanie ankernykh krepleniy stroitelnykh konstruksiy i oborudovaniya [Design of anchorages of building structures and equipment]. Moscow. 2018. 106 c. (In Russian)

13. FRP reinforcement in RC structures. Technical report prepared by a working party of Task group 9.3. FIB bulletin 40 (September 2007).

14. Krasnoshchekov Y.V., Krasotina L.V., Pulido-Delgado J.L. Models of direct anchoring of reinforcement in concrete [Модели прямой анкеровки арматуры в бетоне]. Magazine of Civil Engineering. 2018. 79(3): 149-160.

15. Jansson, A., Lofgren I., Lundgren K., Gylltoft K. Bond of reinforcement in self-compacting steel-fibre-reinforced concrete. Magazine of Concrete Research, 2012, Volume 64(7): 617-630.

16. Tepfers, R.A. Theory of Bond Applied to Overlapped Tensile Reinforcement Splices for Deformed Bars. PhD thesis, Chalmers University of Technology. Go'teborg, Sweden. 1973.

17. Krasnoshchekov Y.V. Modelirovanie raskalvaniya betona v zone ankerovki nenapryagaemoy armatury [Modeling of concrete splitting in the anchoring zone of non-stressed reinforcement]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017; 2: 64-69. (In Russian)

18. Krasnoshchekov Y.V., Krasotina L.V. O raschete pročnosti zhelezobetonnykh elementov po naklonnym secheniyam [Calculation of strength of reinforced concrete elements by inclined sections]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2020. 6: 17-25. (In Russian)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Краснощекоев Юрий Васильевич – д-р. техн. наук, ORCID 0000-0002-6695-1648, проф. кафедры «Строительные конструкции» ФГБОУ ВО «Сибирский автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» (644080, Россия, г. Омск, пр. Мира, 5. E-mail: uv1942@mail.ru)

Yuri V. Krasnoshchekov – Dr. of Sci, ORCID 0000-0002-6695-1648, Professor of the Building Structures Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (644080, Russia, Omsk, Mira Ave, 5. E-mail: uv1942@mail.ru)

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются рукописи по направлениям: Транспорт. Транспортные и технологические машины; Строительство. Строительные материалы и изделия; Редакция принимает к рассмотрению **оригинальные научные статьи** объемом 8–10 стр. машинописного текста через 1 интервал, 5–8 рисунков и (или) таблиц, 20–40 ссылок; **обзорные статьи** – (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – от 10 и более страниц, от 5 и более рисунков, до 80 ссылок.

Статья должна быть неопубликованной ранее в других изданиях, написана в контексте современной литературы, обладать новизной и соответствовать профилю журнала. Автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирования и ссылок на официальные документы и другие источники. Редакция принимает на себя обязательство ограничить круг лиц, имеющих доступ к присланной в редакцию рукописи, сотрудниками редакции, членами редколлегии, а также рецензентами данной работы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий статья будет **ретрагирована** (отозвана из печати).

Следует уделить особенное внимание качеству перевода. Недопустимо при переводе пользоваться машинами-переводчиками. Перевод должен быть выполнен профессиональными переводчиками, а лучше – носителем английского языка. Необходимо учесть, что законодательство охраняет права переводчиков авторским правом наравне с правами авторов оригинальных произведений. Перевод текста – творческий процесс, производный объект авторского права, т.е. переводчик – соавтор нового произведения.

1 УДК. На первой странице, слева в верхнем углу без отступа, указываются индекс по универсальной десятичной классификации (УДК) (размер шрифта 10 пт).

2. Заглавие статьи. Заголовок (максимально 10-12 слов) должен быть информативным, лаконичным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы. Приводится на русском и английском языках, по центру полужирным шрифтом размером 12 пт. прописными буквами.

3. Фамилии авторов. Количество авторов не должно превышать четырех. Для англоязычных метаданных важно соблюдать вариант написания сведений об авторе в последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия (Anna V. Ivanova). При латинизации фамилии можно воспользоваться системой 1 BSI – Британский Институт Стандартов (British Standards Institution) транслитерации на сайте <http://translit.ru>, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи обычным шрифтом (размер шрифта 12 пт.).

4. Аннотация. Аннотация включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе научная статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению, объем от 200 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Приводится на русском и английском языках. Начинается словом «Аннотация» с прописной буквы (шрифт полужирный, курсив, 10 пт); точка; затем с прописной буквы текст (курсив, 10 пт).

5. Ключевые слова служат ориентиром для читателя и используются для поиска статей в электронных базах, поэтому должны отражать дисциплину (область науки, в рамках которой написана статья), тему, цель и объект исследования.

Рекомендуемое количество ключевых слов – 10–12, количество слов внутри ключевой фразы – не более трех.

Размещаются после аннотации, на русском и английском языках.

6. Благодарности. Раздел включен в требования всеми крупными издательствами. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

7. Основные положения. Отражают ключевые результаты исследования, основное содержание статьи, изложенные тезисно и оформленные в виде 3–5 пунктов маркированного списка.

8. Основной текст статьи излагается на русском или английском языках, в электронном и бумажном виде (шрифт «Arial» (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный), в следующей последовательности:

Введение (1–4 стр.) В этом разделе описываются общая тема исследования, цели и задачи планируемой работы, теоретическая и практическая значимость, приводятся наиболее известные и авторитетные публикации по изучаемой теме, обозначаются нерешенные проблемы. Данный раздел должен содержать обоснование необходимости и актуальности исследования. Информация во Введении должна быть организована по принципу «от общего к частному».

Подразделы введения представлены на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Методы и материалы (от 2 стр. и более) В этом разделе в деталях описываются методы, которые использовались для получения результатов. Обычно сначала дается общая схема экспериментов/исследования, затем они представляются настолько подробно и с таким количеством деталей, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, организационных или структурных диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. Если было получено много похожих зависимостей, представляемых в виде графиков, то приведите только один типичный график, а данные об имеющихся количественных отличиях между ними, представьте в таблице.

Способы представления результатов представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Обсуждение и заключение. Раздел содержит интерпретацию полученных результатов исследования, предположения о полученных фактах, сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

9. Библиографический список (References)

В библиографический список включаются только те источники, которые автор использовал при подготовке статьи. Оформление библиографического списка регламентируется ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Желательно использовать 20–40 источников, но не более 50. Из них за последние 3 года – рекомендуется указать не менее 20, иностранных – не менее 15. Важно правильно оформить ссылку на источник.

Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет.

Источники указываются в конце статьи в алфавитном порядке либо в порядке упоминания в тексте статьи.

Приводится на русском языке и в латинице по образцу, представленному на сайте журнала.

Аффилиация. Фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, ORCID i, Scopus Author ID, ResearcherID, далее указать все места работы, должность, название организации, служебный адрес, электронная почта, телефон, e-mail.

Приводится на русском и английском языках.

Технические требования к оформлению.

Формат A4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом употреблении должны быть полностью расшифрованы, за исключением общепринятых терминов и математических величин.

Формулы необходимо набирать в редакторе формул Microsoft Equation. Перенос формул допускаются на знаках «плюс» и «минус», реже – на знаке «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей работе арабскими цифрами). Номер формулы заключают в круглые скобки у правого края страницы.

Рисунки, схемы и графики предоставляются в электронном виде включенными в текст, в стандартных графических форматах с обязательной подрисункной подписью, и отдельными файлами с расширением (JPEG, GIF, BMP). Должны быть пронумерованы (Таблица 1 – Заголовок, Рисунок 1 – Наименование), озаглавлены (таблицы должны иметь заглавие, выравнивание по левому краю, а иллюстрации – подрисункные подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы предоставляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

Общий порядок опубликования

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятыми редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

- с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;
- лицензионным договором между ФГБОУ ВО «СибАДИ» и авторами;

При регистрации присваивается дата поступления и регистрационный номер статьи. Статьи регистрируются через электронную редакцию. Регистрация осуществляется бесплатно.

Первичная экспертиза на соответствие требованиям и профилю журнала (модерация). Зарегистрированные рукописи статей проходят первичную экспертизу на соответствие требованиям и профилю журнала. Началом для экспертизы рукописи статьи редакцией является дата регистрации статьи. Редакция журнала оставляет за собой право отбора присылаемых материалов. Только прошедшие первичную экспертизу рукописи статей, полностью соответствующие требованиям редакции журнала, соответствующие профилю журнала, получают статус «Принята к рассмотрению». Для них отдельно регистрируется дата приема рукописи статьи к рассмотрению.

Рецензирование. Принятые к рассмотрению рукописи статей направляются на слепое рецензирование для оценки их научного содержания нескольким специалистам соответствующего профиля, членам редакционной коллегии и/или редакционного совета. Экспертиза и рецензирование осуществляются бесплатно.

Решение о принятии к публикации основывается на поступивших рекомендациях рецензентов журнала. Если принято решение «рекомендовать с учетом исправления отмеченных недостатков», то автору направляются рекомендации и вопросы для исправления. Рукопись статьи, скорректированная автором, повторно направляется на рецензирование. Рукописи статей, не рекомендованные к публикации, повторно не рассматриваются. Автору рукописи направляется мотивированный отказ в публикации.

Редакционная подготовка. Рукописи статей, принятые к публикации, проходят редакционную подготовку к публикации – литературное редактирование и сверку данных, корректуру, форматирование, макетирование. Общий срок редакционной подготовки статьи, успешно прошедшей рецензирование, составляет 2 месяца в соответствии с периодичностью и графиком публикации выпусков. Корректуре статей авторам не высылается, тем не менее вопросы, возникающие в процессе редактирования высылаются авторам для согласования.

Окончательный вариант макета статьи высылается по электронной почте автору на утверждение. На рассмотрение отводится три дня, по истечении которых в случае неполучения ответа от автора, макет автоматически считается автором одобренным и в представленном виде направляется в печать.

Публикация. Подготовленный к публикации макет тиражируется в типографии СибАДИ и размещается на сайте журнала в открытом бесплатном доступе. Публикация всех статей одного выпуска осуществляется единой датой.

Метаданные опубликованных статей выпуска регистрируются в РИНЦ, размещаются в библиографических сервисах и базах данных в сроки, установленные соответствующими договорами, распространяются по подписке.