

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



научный рецензируемый журнал

• ВЕСТНИК СИБАДИ •

The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

“Vestnik SibADI”

Том 18, № 6. 2021
Сквозной номер выпуска – 82
Vol. 18, no. 6. 2021
Continuous issue – 82

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, № 6. 2021. СКВОЗНОЙ НОМЕР ВЫПУСКА – 82
(VOL. 18, NO. 6. 2021. CONTINUOUS ISSUE – 82)**

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

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

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

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

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 14.12.2021. Дата выхода в свет 30.12.2021. 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 14.12.2021. Publication date is 30.12.2021. 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL TEAM

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

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

Transport, mining and mechanical engineering

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

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

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

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

Transport

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

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

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

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

Construction and architecture

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Scopus Author ID 56487473100

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

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

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

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

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

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

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

Scopus Author ID 7006776195

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

Scopus Author ID 6506823308

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

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

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

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

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

ORCID ID 0000-0001-8494-2852

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

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

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

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

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

ORCID ID 0000-0002-2915-982X

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

А.П. Щербаков, А.Е. Пушкарев, С.Е. Максимов

**ЗАМЕНА МАТЕРИАЛА РАБОЧЕГО ОРГАНА КАК ПУТЬ ПОВЫШЕНИЯ
НАДЕЖНОСТИ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН..... 646**

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

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ФОРМЫ ОТВАЛА БУЛЬДОЗЕРА
С УЧЕТОМ ГРУНТОВОГО ФОНА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН 662**

И.П. Трояновская, А.О. Жаков

**МОДЕЛЬ НЕУПРАВЛЯЕМОГО СДВИГА
НА ПРИМЕРЕ СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНОЙ ТЕХНИКИ..... 678**

Г.Г. Бурый

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОПАНИЯ ГРУНТА
СФЕРИЧЕСКИМ КОВШОМ ЭКСКАВАТОРА 688**

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

А.Г. Шевцова

**МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОПРЕДЕЛЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ... 700**

И.Н. Якунин, Н.Н. Якунин, А.Ф. Фаттахова, Ш.М. Минатуллаев

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КЛИМАТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ АВТОМОБИЛЯ В УСЛОВИЯХ ЖАРКОГО КЛИМАТА 712**

И.А. Анисимов, В.Е. Костин, В.С. Орлов, Д.Н. Паутов, А.С. Поляков, А.В. Шурупов

**ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ ДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ
ОТ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ..... 720**

Н.В. Хольшев, Д.Н. Коновалов, А.В. Прохоров, П.С. Минаев

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ШИН АВТОМОБИЛЕЙ....734

И.Е. Азгуреев, А.В. Ахромешин

**ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТЕОРЕТИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ОПИСАНИЯ
ТРАНСПОРТНОГО ПОВЕДЕНИЯ ЖИТЕЛЕЙ ГОРОДА (МЕГАПОЛИСА)..... 746**

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

А.И. Кудяков, А.С. Симакова, А.Б. Стешенко

**ЦЕМЕНТНЫЕ КОМПОЗИЦИИ С КОМПЛЕКСНЫМИ МОДИФИЦИРУЮЩИМИ
ДОБАВКАМИ НА ОСНОВЕ ВОДНОГО РАСТВОРА ГЛИОКСАЛЯ 760**

А.С. Пролыгин, А.С. Александров, Г.В. Долгих, В.В. Чусов

**ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЩЕБНЯ НА МОДУЛЬ ДЕФОРМАЦИИ
ГРУНТОЩЕБЕНОЧНОГО СЛОЯ 772**

Э.Н. Хафизова, Ю.Ф. Панченко, Д.А. Панченко

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ДРОБЛЕНИЯ ГОРНЫХ
ПОРОД ПРИ РАЗРАБОТКЕ СОСТАВОВ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ 790**

Е.Н. Алькаев, А.А. Лунёв, В.В. Голубенко

**ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ГЛИНИСТОГО ГРУНТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
МЕТОДА СОСРЕДОТОЧЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ИЗВЕСТИ 800**

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Alexander P. Scherbakov, Alexandr E. Pushkarev, Sergey E. Maksimov

**REPLACEMENT WORKING BODY MATERIAL AS A WAY TO INCREASE
RELIABILITY OF ROAD CONSTRUCTION MACHINES 647**

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

**DETERMINATION OF A RATIONAL SHAPE OF A BULLDOZER BLADE,
CONSIDERING THE SOIL BACKGROUND OF THE REPUBLIC
OF KAZAKHSTAN 663**

Irina P. Troyanovskaya, Andrey O. Zhakov

**MODEL OF UNCONTROLLED DISPLACEMENT ON THE EXAMPLE
OF ROAD CONSTRUCTION MACHINES 679**

Grigoriy G. Buriy

MATHEMATICAL MODEL OF SOIL DIGGING SPHERICAL EXCAVATOR BUCKET689

PART II. TRANSPORT

Anastasia G. Shevtsova

**MATHEMATICAL ANALYSIS OF CERTAIN ROAD SAFETY INDICATORS
IN THE RUSSIAN FEDERATION..... 701**

Ivan N. Yakunin, Nikolay N. Yakunin, Almira F. Fattakhova, Shamil M. Minatullaev

**RESULTS OF A STUDY THE EFFICIENCY OF AUTOMOBILE
CLIMATE SYSTEMS IN HOT CLIMATES..... 713**

*Ilya A. Anisimov, Vadim E. Kostin, Vladimir S. Orlov, Dmitry N. Pautov,
Alexander S. Polyakov, Alexey V. Shurupov*

**POWER SUPPLY OF ROAD INFRASTRUCTURE OBJECTS
FROM ALTERNATIVE SOURCES 721**

Nikolay V. Holshev, Pavel S. Minaev, Dmitry N. Konovalov, Alexey V. Prokhorov

LABORATORY STAND FOR CAR TIRE DIAGNOSTICS 735

Igor E. Agureev, Andrey V. Akhromeshin

**JUSTIFICATION FOR THE CHOICE OF A THEORETICAL APPARATUS
TO DESCRIBE THE TRANSPORT BEHAVIOUR
OF CITY RESIDENTS (MEGAPOLIS)..... 747**

PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Aleksander I. Kudryakov, Anna S. Simakova, Aleksey B. Steshenko

**CEMENT BASED COMPOSITIONS WITH COMPLEX MODIFYING ADDITIVES
BASED ON GLYOXAL 761**

Aleksandr S. Prolygin, Anatoliy S. Aleksandrov, Gennady V. Dolgikh, Vasiliy V. Chusov

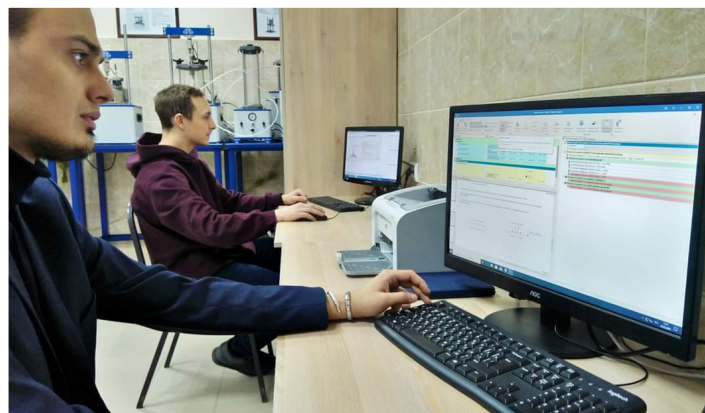
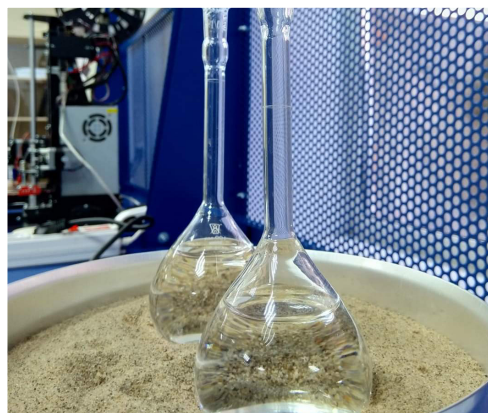
**INFLUENCE OF CRUSHED STONE CONTENT ON THE DEFORMATION
MODULUS OF THE SOIL-CRUSHED STONE LAYER 773**

Elza N. Khafizova, Iuliia F. Panchenko, Dmitrii A. Panchenko

**USE OF ROCK CRUSHING TECHNOLOGICAL WASTES FOR CEMENT
CONCRETE COMPOSITIONS..... 791**

Evgeniy N. Alkaev, Alexander A. Lunev, Vladimir V. Golubenko

**STUDY OF CLAY SOIL PROPERTIES WHEN USING THE METHOD
OF CONCENTRATED LIME EXPOSURE..... 801**



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



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

Научная статья

УДК 621.86

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-646-661>

ЗАМЕНА МАТЕРИАЛА РАБОЧЕГО ОРГАНА КАК ПУТЬ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

А.П. Щербаков, А.Е. Пушкарев, С.Е. Максимов

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,

г. Санкт-Петербург, Россия

shurbakov.aleksandr@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2454-7751>,pushkarev-agn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5546-015X>,<https://orcid.org/0000-0001-6879-0684>

АННОТАЦИЯ

Введение. На примере ножа автогрейдера оцениваются пути повышения надежности эксплуатации дорожно-строительных машин (ДСМ). С этой целью проводится анализ характера силовых воздействий на данный рабочий орган ДСМ и выделяются его конструктивные особенности (наличие сварного соединения). На основании проведенного анализа определяется круг характеристик, необходимых для принятия решения о возможности замены материала рабочего органа ДСМ, дополнительно проводится их термоциклическая обработка (ТЦО). Описываются экспериментальные исследования влияния данного вида термического воздействия на структуру и свойства сталей.

Материалы и методы. С помощью металлографического анализа авторами было исследовано влияние количества циклов термических воздействий на размер зерна и комплекс физико-механических характеристик различных материалов рабочего органа ДСМ на различных этапах ТЦО.

Результаты. Было определено, что повышение уровня физико-механических характеристик исследуемых сталей возможно посредством применения ТЦО вследствие получения мелкозернистой структуры металла. Рассмотрены зависимости основных физико-механических характеристик исследуемых сталей (предел прочности и предел текучести) от числа циклов термического воздействия. Подобраны корреляционные соотношения для описания этих зависимостей. Рассмотрена связь пределов текучести и прочности сталей 09Г2С и 30МпВ5 с размером зерна. Кроме этого, проведены исследования усталостных характеристик указанных сталей, для сварного соединения представлены данные по определению микротвердости. Для различных температур эксплуатации проведены фрактографические исследования на образцах после циклического нагружения.

Обсуждение и заключение. На основании сравнительного анализа комплекса физико-механических характеристик авторами сделано заключение о возможности замены стали 09Г2С на сталь 30МпВ5.

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

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

Статья поступила в редакцию 14.10.2021; одобрена после рецензирования 25.10.2021; принята к публикации 14.12.2021.

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., Пушкарев А.Е., Максимов С.Е. Замена материала рабочего органа как путь повышения надежности дорожно-строительных машин // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 6(82). С. 646-661. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-646-661>

© Щербаков А.П., Пушкарев А.Е., Максимов С.Е., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-646-661>

REPLACEMENT WORKING BODY MATERIAL AS A WAY TO INCREASE RELIABILITY OF ROAD CONSTRUCTION MACHINES

Alexander P. Scherbakov, Alexandr E. Pushkarev, Sergey E. Maksimov

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,

Saint Petersburg, Russia

shurbakov.aleksandr@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2454-7751>,

pushkarev-agn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5546-015X>,

<https://orcid.org/0000-0001-6879-0684>

ABSTRACT

Introduction. On the example of a motor grader knife, ways of increasing the reliability of road construction machines (RCM) operation are evaluated. For this purpose, the analysis of force effects nature on the working body of the RCM is carried out and its design features are highlighted (the presence of a welded joint). Based on the analysis, the range of characteristics necessary for making a decision on the possibility of replacement the material of the RCM working body is determined. Additionally, its thermocyclic treatment (TCT) is carried out. Experimental studies of the effect of this thermal impact type on the structure and properties of steels are described.

Materials and methods. With the help of metallographic analysis, the author investigates the influence of the number of thermal effects cycles on the grain size and the complex of various materials physical and mechanical characteristics of road construction machines working body at various stages of the thermocyclic treatment.

Results. It is determined that an increase in the level of the investigated steels physical and mechanical characteristics is possible through the use of TCT due to the obtaining of a fine-grained metal structure. The dependences of the main physical and mechanical characteristics of the investigated steels (ultimate strength and yield strength) on the number of thermal effects cycles are considered. Correlation relationships are selected to describe these dependencies. The relationship between the yield strength and ultimate strength of 09G2S and 30MnB5 steels and the grain size is considered. In addition, studies of the steels fatigue characteristics are carried out; data on determining the microhardness are presented for the welded joint. For various operating temperatures, fractographic studies are carried out on samples after cyclic loading.

Discussion and conclusion. Based on a comparative analysis of the complex of physical and mechanical characteristics, the author made a conclusion about the possibility of replacing steel 09G2S with steel 30MnB5.

KEYWORDS: metallographic analysis, grain size, thermocyclic treatment, physical and mechanical characteristics, welded joint, steel replacement.

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

The article was submitted 14.10.2021; approved after reviewing 25.10.2021; accepted for publication 14.12.2021.

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., Maksimov S.E. Replacement working body material as a way to increase reliability of road construction machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (6): 646-661. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-646-661>

© Scherbakov A.P., Pushkarev A.E., Maksimov S.E., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Исходя из определения эффективности, рассматриваемой ГОСТ Р ИСО 9000–2015¹ как соотношение между достигнутым результатом и использованными ресурсами, следует вывод о том, что своего максимального значения она достигает при работе каждой машины как можно дольше с максимальной производительностью и при минимальных затратах. Существует ряд факторов, приводящих к уменьшению технической производительности ДСМ [1, 2, 3, 4, 5, 6]:

- осуществление капитального ремонта машины, снижающего ее производительность до (70÷85)% относительно новой машины;
- износ зубьев и режущих кромок у рабочих органов, сказывающийся на снижении эффективности работы машины;
- износ шин, грунтозацепов, башмаков, приводящий к снижению тягового усилия;
- предупредительно плановые ремонты;
- характер выполняемых работ – циклический или непрерывный.

Для пояснения последнего обстоятельства на рисунке 1 приведены временные зависимости изменения тягового усилия $P(t)$ для скрепера и бульдозера (машины циклического действия) и автогрейдера (машина непрерывного действия) на различных этапах рабочего цикла $t_{\text{ц}}$. Циклограмма скрепера показана на рисунке 1, а, бульдозера – на рисунке 1, б и

автогрейдера – на рисунке 1, в. Цифрами на рисунке 1 обозначены рабочие операции цикла: 1 – резание и копание грунта; 2 – транспортирование грунта; 3 – разгрузка; 4 – холостой ход; 5 – добор грунта и его перемещение; 6 – выглубление отвала; 7 – зарезание; 8 – квази-установившийся режим копания; 9 – разворот (поворот).

В работах циклического характера основная операция (воздействие рабочего оборудования на среду) занимает лишь часть продолжительности цикла $t_{\text{ц}}$. Далее осуществляются вспомогательные операции (транспортирование, разгрузка и холостой ход), которые необходимы для возвращения к основной операции. Для разных машин доли основных и вспомогательных операций в циклах различны. Производительность машин непрерывного действия выше производительности машин циклического действия, что связано с непрерывным воздействием рабочего оборудования на среду в течение всего цикла. Рабочие и вспомогательные операции выполняются одновременно. Необходимые повороты и развороты машин для возобновления цикла являются непродолжительными по времени.

При наполнении ковша скрепера (см. рисунок 1, а) тяговое усилие на колесах движителя повышается в 2–3 раза, при этом буксование движителя зачастую достигает до 100%. При зарезании отвалом бульдозера (рисунок 1, б) тяговое усилие также повышается в несколько

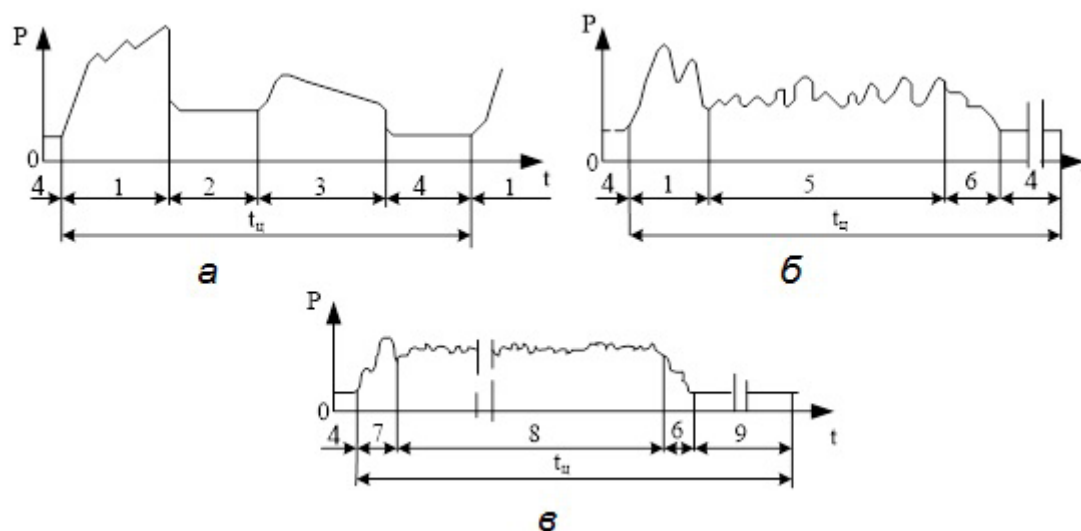


Рисунок 1 – Зависимость $P = f(t)$

Figure 1 – Dependency $P = f(t)$

¹ ГОСТ Р ИСО 9000–2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. Москва : Стандартинформ, 2015. 49 с.

раз относительно холостого хода. Значительные скачки тягового усилия в процессе работы автогрейdera отсутствуют (рисунок 1, в).

Повышение производительности ДСМ может быть достигнуто либо за счет организационных мероприятий (сокращение простоев, улучшение загрузки ДСМ, улучшение организации производства, укрепление трудовой дисциплины, повышение квалификации и культурно-технического уровня машинистов и ИТР), либо путем технического совершенствования машин – их модернизации, компьютеризации работ, расширения наборов сменных рабочих органов, применения адаптирующегося рабочего оборудования и приспособлений, внедрения новых ДСМ для сокращения ручного труда и сбережения ресурсов [1].

Основную роль в оценке прочности рабочего элемента играет величина силы сопротивления копанью P_k , которая складывается из силы сопротивления грунта резанию P_p , сопротивления стружки P_{cc} и сопротивления перемещению призмы волочения $P_{пв}$ [7]:

$$P_k = P_p + P_{cc} + P_{пв}.$$

Рассмотрим для определенности в качестве рабочего органа нож отвала бульдозера или автогрейdera. Согласно [7] конечное выражение для определения усилия копания выглядит следующим образом:

$$P_k = 10 \cdot C \cdot h^{1,35} \cdot (1 + 2,6 \cdot l) \cdot \\ \cdot (1 + 0,01 \cdot \delta) + \Delta \cdot K_{сж} \cdot l \cdot h + \\ + g \cdot \frac{l \cdot (H - h)^2}{2 \cdot tg \varphi_0 \cdot K_p} \cdot \gamma_r \cdot tg \rho,$$

где C – число ударов плотномера; h – глубина резания; l – длина режущей кромки ножа; δ – угол резания; ρ – угол трения грунта по грунту; Δ – коэффициент, связанный с величиной высоты отвала H ; g – ускорение свободного падения; $K_{сж}$ – активная удельная (на единицу площади поперечного сечения стружки F) сила сопротивления вырезаемой стружки продольному сжатию; γ_r – плотность грунта; φ_0 – угол естественного откоса; $K_p = (1,05 \div 1,35)$ – коэффициент, учитывающий степень разрыхления грунта. Видно, что правую часть данного соотношения составляют величины, связанные с характеристиками грунта, геометрическими параметрами ДСМ или с технологическими характеристиками процесса копания грунта. Сведения о материале рабочего органа ДСМ появляются после вычисления напряжений от действующего усилия P_k и сравнении его ве-

личины с пределом прочности или текучести материала для вычисления запаса прочности. При этом очевидно, что чем выше значения этих физико-механических материалов, тем больше запас прочности и, соответственно, выше уровень эксплуатационной надежности.

Одним из путей повышения надежности эксплуатации ДСМ является увеличение прочностных характеристик материалов, используемых для изготовления рабочих органов.

В настоящее время существует несколько направлений повышения прочности материалов за счет получения мелкозернистой структуры. В научно-технической литературе говорится о порошковых методах, осаждении из газовой фазы. Выделяются методы, связанные с интенсивной пластической деформацией [8, 9, 10, 11, 12, 13].

Широкое распространение получил метод ТЦО материалов и их сварных соединений. Теоретические основы данного метода изложены в работах [14, 15, 16]. Отечественная и зарубежная техническая литература, посвященная прикладному применению данного направления, достаточно обширна. Во всех этих публикациях отмечается, что после термодинамической обработки в различных сталях и сварных соединениях фиксируется измельчение исходного зерна с одновременным повышением механических характеристик, в качестве которых взяты предел прочности, предел текучести и твердость [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33].

В статье [34] изложены первые результаты исследований влияния количества циклов термической обработки сталей 09Г2С и 30МнВ5 на размер зерна и физико-механические характеристики (пределы прочности и текучести). Описаны методики и оборудование, примененные для проведения испытаний и анализа результатов. Кроме того, показано, что для данных сталей выполняется соотношение Холла–Петча, которое связывает предел текучести и предел прочности поликристаллического материала с размером зерна. В данной статье представлены результаты дополнительных исследований, которые касаются следующих моментов:

1. Анализ приведенных выше циклограмм работы некоторых типов ДСМ (см. рисунок 1) показывает, что на протяжении рабочего цикла тяговое усилие, а следовательно, и нагрузки на рабочий орган машины не являются постоянными. Они носят циклический характер, поэтому были проведены исследования циклической прочности рассматриваемых материалов.

2. Проведены фрактографические исследования поверхностей изломов образцов из сталей 09Г2С и 30МnВ5 при различных температурах.

3. Проведены исследования по определению микротвердости сварных швов и околошовных зон сталей 09Г2С и 30МnВ5.

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 комплекса физико-механических характеристик данных сталей и их сварных соединений после термоциклической обработки для определения возможности замены стали 09Г2С на сталь 30МnВ5.

В таблице 1 приведен химический анализ сталей [34].

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».

Методики, форма образцов и оборудование для проведения металлографических исследований для определения размера зерна (металлографический микроскоп Olympus SpinSR10) и испытаний на растяжение (универсальная электромеханическая машина Instron 5969) описаны в [34].

Циклические испытания материалов проводились на сервогидравлической испытательной системе UTM 100 кН, показанной на рисунке 2.

Сервогидравлическая испытательная система UT-04-0100 предназначена для статических и циклических испытаний металлических, деревянных, железобетонных и композитных материалов на сжатие, растяжение, изгиб, малоцикловую усталость, механику разруше-



Рисунок 2 – Испытательная система UTM 100 кН

Figure 2 – UTM test system 100 kN

ния при комнатной температуре, раскрытие трещин в диапазоне нагрузок от 0 до 100 кН с целью определения физико-механических характеристик.

В рамках данных исследований испытания проводились при нормальной и пониженных температурах от плюс 20 до минус 80 °С (выдержка в криокамере). Образцы вырезались из одношовной трубы диаметром 720 мм и толщиной стенки 10 мм. Испытания проводились по схеме изгиба вращающегося образца, цикл нагружения симметричный, коэффициент асимметрии цикла составлял величину 0,1. Испытания образцов проводились на базе 10^6 циклов.

Фрактографический анализ изломов образцов сталей проводился с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA с термоэмиссионным вольфрамовым катодом (рисунок 3).

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 3 –Сканирующий электронный микроскоп TESCAN VEGA

Figure 3 – Scanning TESCAN VEGA electron microscope

Данный микроскоп позволяет получать СЭМ-изображения и проводить анализ элементного состава в реальном времени в одном окне программного обеспечения TESCAN Essence™, что значительно упрощает получение данных как о морфологии поверхности образца, так и о его локальном элементном составе и делает СЭМ TESCAN VEGA эффективным аналитическим решением для проведения регулярного контроля качества материалов, анализа отказов и различных лабораторных исследований.

Диапазон энергий пучка, падающего на образец, от 200 эВ до 30 кэВ. Ток пучка – от 1 пА до 2 мкА с непрерывной регулировкой. Для изменения тока пучка в качестве устройства смены апертур используется электромагнитная линза. Увеличение – непрерывное от 2× до 1 000 000×.

Для полноты информации о свойствах исследуемых материалов приведем сведения об оборудовании, использованном для изучения распределения микротвердости по зонам сварного шва. Для стали 30MnB5 эти результаты подробно описаны в статье [18].

Измерение микротвердости в сварных соединениях осуществлялось с использованием универсального твердомера DuraVision-30 (рисунок 4).

В конструкции твердомера имеется монолитная чугунная рама, за счет которой повышаются точность и стабильность измерений. Твердомер имеет возможность измерять твердость различными методами без изменения конструктива прибора, что свидетельствует об универсальности данного аппарата. Твердомер DuraVision-30 находит свое применение и



Рисунок 4 – Универсальный твердомер DuraVision-30

Figure 4 – DuraVision-30 universal hardness tester

в лабораторных условиях, и в производственном процессе.

Указанный прибор обладает следующими положительными качествами:

- нагрузки, возможные для применения, 30–30000 Н;
- возможность установить рабочее расстояние до 400 мм;
- возможность исследования достаточно больших образцов массой до 200 кг;
- возможность функционировать как в ручном, так и в автоматическом режиме;
- возможность позиционировать место измерения при помощи лазера;
- организация освещения при помощи диодов;
- применение принципа замкнутого контура closed loop при осуществлении нагрузки на исследуемый объект.

В проведенных исследованиях измерение микротвердости проводилось при нагрузке 10 Н с выдержкой в течение 10 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблицу 2 сведены результаты испытаний на растяжение (предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел прочности σ_b) и по определению среднего размера зерна d исследуемых сталей после термоциклической обработки.

На рисунке 5 представлены зависимость среднего размера зерна d от количества N циклов термоциклической обработки.

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 6 приведены зависимости $\sigma_{0,2} = f(N)$ (рисунок 6, а) и $\sigma_b = f(N)$ (рисунок 6, б).

Таблица 2
Механические свойства сталей после термоциклической обработки

Table 2
Mechanical properties of steels after thermocyclic processing

Сталь	Характеристика	Количество термических циклов N								S _σ , МПа
		0	1	2	3	4	6	7	10	
09Г2С	σ _{0,2} , МПа	357	371	385	392	404	405	409	410	2,9
	σ _b , МПа	446	468	482	491	499	502	503	507	4,4
	d, мкм	32	16	13	11	10	9	8	7,5	–
30MnB5	σ _{0,2} , МПа	400	410	415	420	480	500	600	610	26,5
	σ _b , МПа	650	750	760	785	850	950	998	1700	66,5
	d, мкм	20	10	9	8	7	6	3	1,5	–

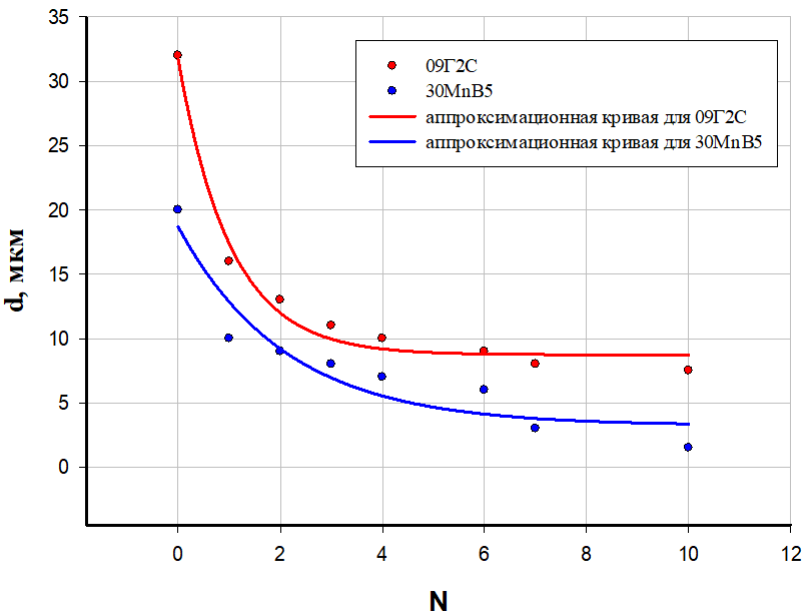
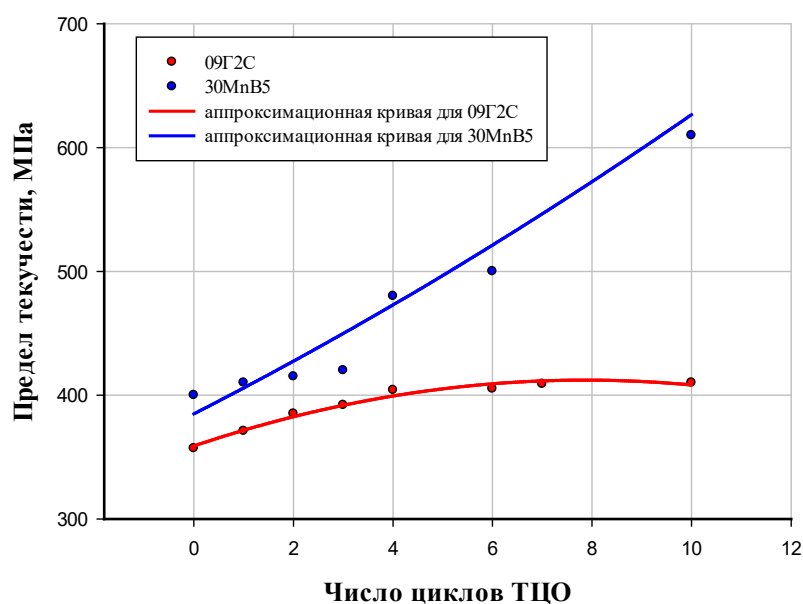
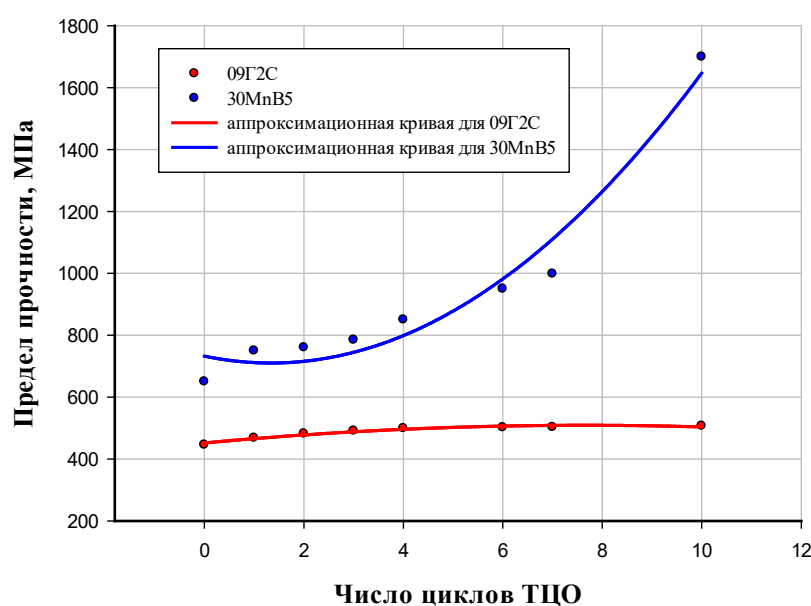


Рисунок 5 – Зависимость $d = f(N)$
Figure 5 – Dependency $d = f(N)$



а



б

Рисунок 6 – Зависимости $\sigma_{0,2} = f(N)$ и $\sigma_b = f(N)$ Figure 6 – Dependancies $\sigma_{0,2} = f(N)$ 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:

$$\sigma_b = \sigma_b^0 + a_bN + b_bN^2.$$

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; $R = 0,98$.

Сталь 30MnB5: $\sigma_{0,2}^0 = 384,87$ МПа; $a_{0,2} = 20,55$ МПа; $b_{0,2} = 0,36$ МПа; $R = 0,95$; $\sigma_b^0 = 732,43$ 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.

Если рассмотреть значения $\sigma_{0,2}$ и σ_b , вычисленные по полученным зависимостям $\sigma_{0,2} = f(N)$ и $\sigma_b = f(N)$, в качестве средних значений, то можно объединить все экспериментальные данные в одну совокупность по соответствующим характеристикам и сталям и оценить значения средних квадратичных отклонений величин пределов текучести и прочности, а именно

$$S_{\sigma} = S_{\sigma_{0,2}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_{0,2i}^3 - \sigma_{0,2i}^T)^2}{n-1}} \quad \text{и}$$

$$S_{\sigma} = S_{\sigma_b} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_{bi}^3 - \sigma_{bi}^T)^2}{n-1}}.$$

Здесь величины с индексом «э» относятся к экспериментальному результату, а с индексом «Т» – к расчетному (по соответствующему

соотношению). Величина n представляет собой количество экспериментальных точек по значениям N , в нашем случае $n = 8$ (см. таблицу 2). Вычисленные значения S_{σ} приведены в таблице 2.

Знание S_{σ} позволяет оценить коэффициенты вариации для значений пределов прочности и текучести исследуемых сталей. Для этого по всем экспериментальным значениям определяются средние величины пределов текучести $\bar{\sigma}_{0,2}$ и прочности $\bar{\sigma}_b$ (для каждой стали). Коэффициент вариации ω определяется как отношение

$$\omega_{0,2} = \frac{S_{\sigma_{0,2}}}{\bar{\sigma}_{0,2}} \quad \text{и} \quad \omega_b = \frac{S_{\sigma_b}}{\bar{\sigma}_b}.$$

Для 09Г2С: $\bar{\sigma}_{0,2} = 391$ МПа, $\bar{\sigma}_b = 487$ МПа. Для 30MnB5: $\bar{\sigma}_{0,2} = 479$ МПа, $\bar{\sigma}_b = 930$ МПа.

Примем для упрощения максимальное значение коэффициента вариации одинаковым для обеих сталей. Это значение 7% для предела прочности стали 30MnB5.

Тогда, согласно², с вероятностью 0,99 разность между двумя средними будет значимой при различии в 1,2 раза. Для меньших коэффициентов вариации эта величина будет меньше.

По представленным в таблице 2 величинам физико-механических характеристик получа-

Таблица 3
Результаты циклических испытаний

Table 3
Results of cyclic tests

Сталь	Частота циклов ω , Гц	Показатель сопротивления усталости, tga_n	Напряжение, соответствующее долговечности $N = 10^6$ циклов, МПа	Временное сопротивление разрыву, σ_b , МПа	$\chi = \frac{\sigma_{N=10^6}}{\sigma_b}$
09Г2С	2,0	0,2655	115	490	0,234
	2,7	0,3293	105	490	0,214
	100	0,1337	310	490	0,632
30MnB5	2,0	0,0877	540	950	0,568
	2,7	0,1311	480	950	0,505
	46,7	0,1600	250	950	0,263

² Биргер И.А., Пановко Я.Г. Прочность. Устойчивость. Колебания. Справочник в 3 томах. Том 1. Москва: Машиностроение, 1968. 831 с.

ется, что по пределу текучести сталь 30MnB5 превышает величину 1,2 относительно стали 09Г2С после 4 цикла ТЦО. По пределу прочности это превышение идет уже сразу после исходного состояния (0 циклов ТЦО).

В таблице 3 приведены результаты испытаний образцов сталей на циклическую прочность для трех значений частоты нагружения.

Сталь марки 09Г2С с увеличением частоты циклического нагружения показывает повышение циклической прочности, а сталь 30MnB5, наоборот, снижение. Таким образом, при выборе материала для рабочих органов дорожно-строительных машин, работающих в одинаковых (похожих) условиях эксплуатации при низких частотах нагружения целесообразнее

использовать борсодержащую сталь 30MnB5 вместо низколегированной стали 09Г2С.

На рисунке 7 показаны фотографии (СЭМ-снимки) изломов образцов стали 30MnB5, испытанных при разных температурах.

В результате визуального осмотра поверхности изломов очаги разрушения не выявлены. Характерные дефекты строения изломов не обнаружены. На поверхности изломов всех шести образцов характерно наличие трех зон, имеются утяжки.

На всех изображениях, представленных на рисунке 7, цифрами обозначены: 1 – зона зарождения трещины; 2 – зона распространения трещины; 3 – зона утяжки; 4 – зона долома.

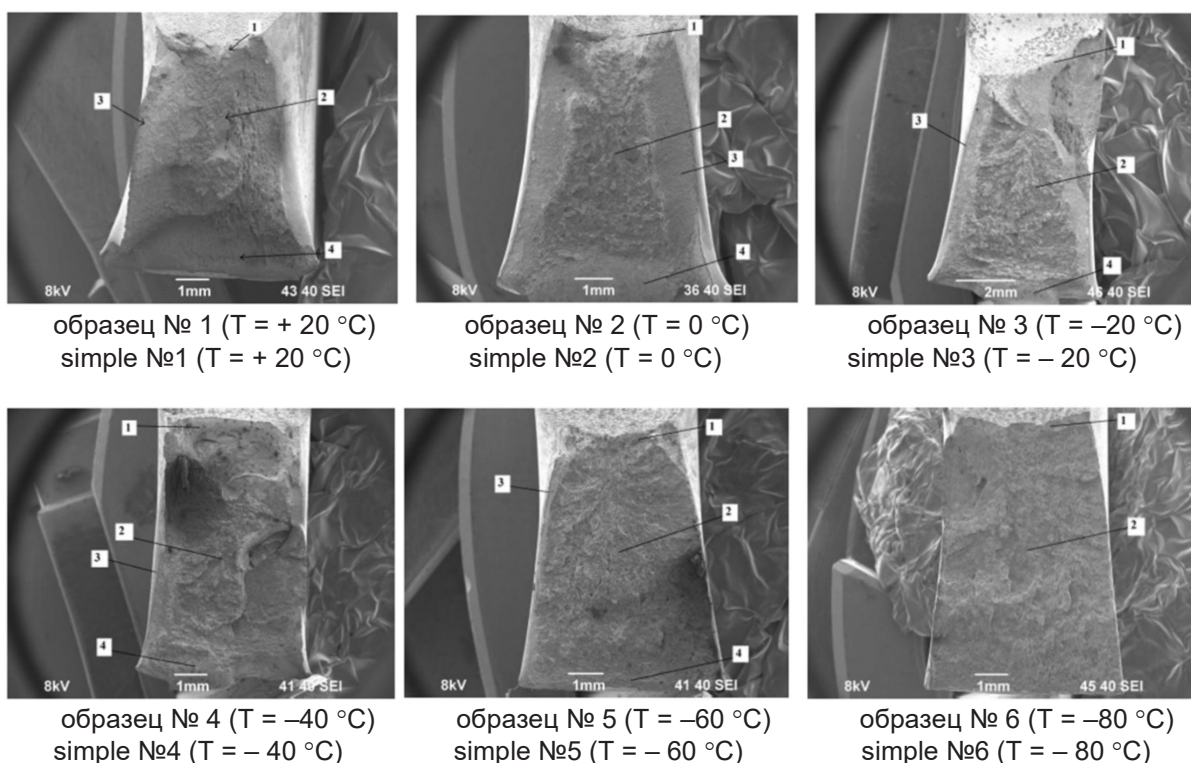
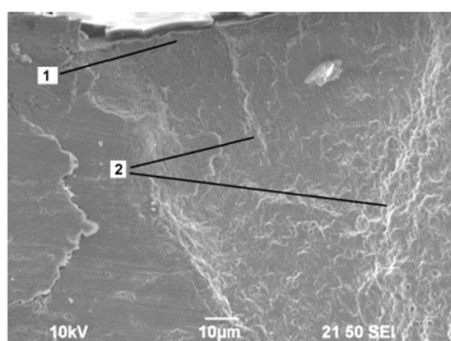
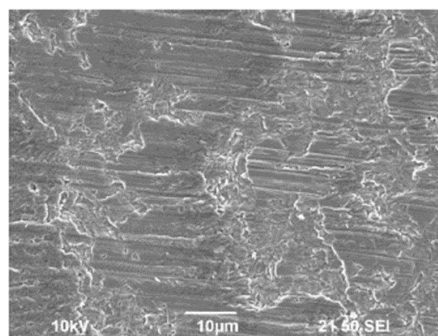


Рисунок 7 – Излом образцов из стали 30MnB5

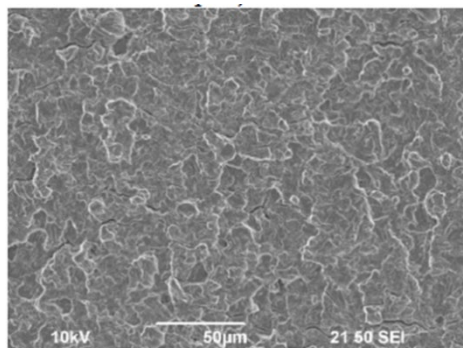
Figure 7 – Fracture of 30MnB5 steel samples



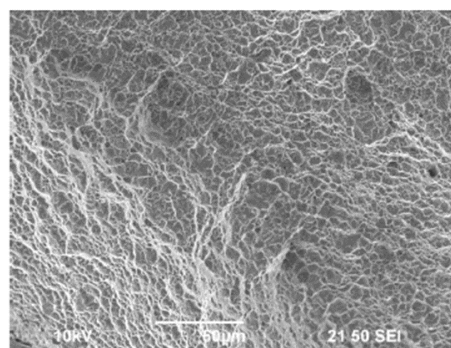
Очаг разрушения
The focus of destruction



Зона стабильного роста трещин
Zone of stable crack growth



Зона ускоренного развития трещин
Zone of accelerated crack development



Зона долома
Upload failure zone

Рисунок 8 – Зоны разрушения образца из стали 09Г2С

Figure 8 – Destruction zones of the 09G2S steel sample

На рисунке 8 приведены СЭМ-снимки отдельных зон излома образца из стали 09Г2С.

С понижением температуры испытания меняются размеры и соотношение площадей зон в изломах. Самая большая утяжка и долом у образцов №1,2, у образца №6 они не обнаруживаются (см. рисунок 7). Зоны зарождения трещины по размерам близки у всех образцов, что задано наличием U-образного концентратора. Зона распространения трещин увеличивается по мере понижения температуры и при 80 °С занимает практически всю площадь излома (см. рисунок 7).

Из очагов разрушения выходят трещины, которые распространяются вглубь образца. В зоне стабильного роста трещин наблюдаются усталостные линии, их параллельное расположение позволяет классифицировать их как вязкие бороздки. Однако общее очертание фигур на фраттограмме фасеточное, что говорит о хрупком (квазихрупком) разрушении.

Зона ускоренного развития трещин в образце из стали 09Г2С образована транскри-

сталлитным разрушением. Имеются вторичные трещины (на снимке очага разрушения обозначены цифрой 2). Трещины короткие и не ветвящиеся, что характерно для вязких материалов. Топология зоны – фасетки квазискола, таким образом, наряду с признаками хрупкого разрушения имеются признаки пластической деформации. Разрушение при этом носит смешанный (хрупко-вязкий) характер.

Зона долома представляет собой совокупность ямок, вытянутых в направлении разрушения (равноосные ямки и ямки сдвига), таким образом, финал разрушения проходил по вязкому механизму.

В целом разрушение данного образца с линейным надрезом можно квалифицировать как хрупко-вязкое, а сам излом – квазихрупким.

На рисунке 9 показаны точки измерения микротвердости в сварном шве с привязкой к его отдельным зонам – основной металл, зона термического влияния (ЗТВ) и собственно сварной шов.

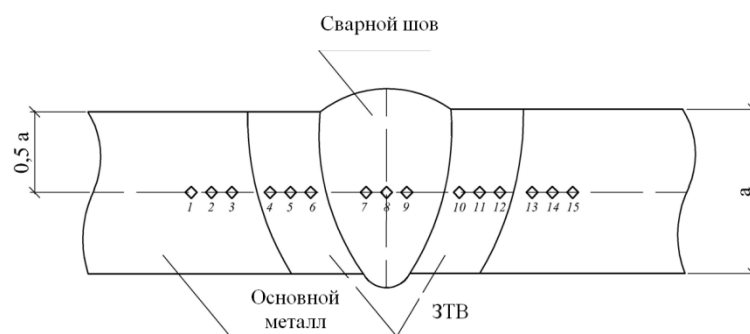


Рисунок 9 – Точки измерения микротвердости

Figure 9 – Microhardness measurement points

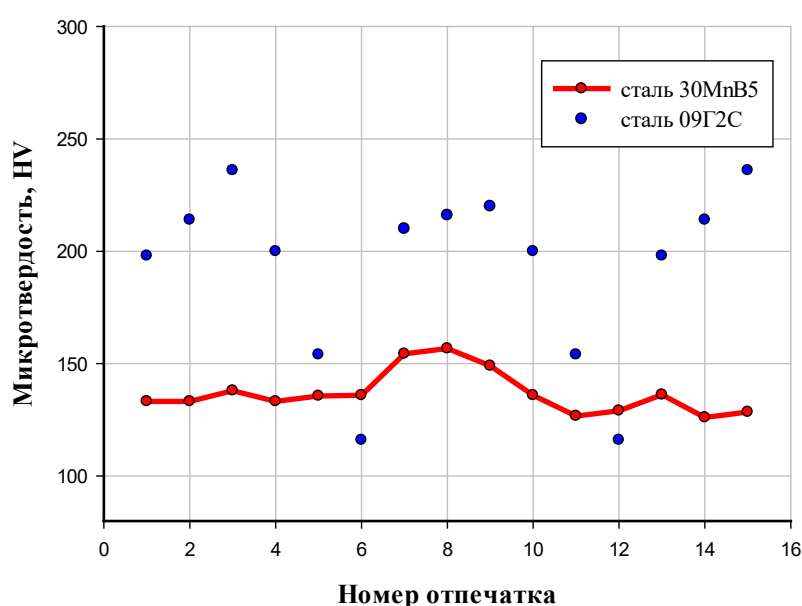


Рисунок 10 – Изменение микротвердости в различных зонах сварного соединения

Figure 10 – Changes in microhardness in various zones of welded joint

Распределение микротвердости по точкам измерения для образца из стали 30MnB5 (толщина 3 мм) показано на рисунке 10. Там же точками с привязкой к упомянутым выше зонам сварного шва показаны значения микротвердости для образца из стали 09Г2С³.

Видно, что распределение микротвердости для различных зон сварного шва образца из стали 30MnB5 достаточно равномерное. Даже в зоне сварного шва превышение над зоной основного металла и ЗТВ незначительно – по-

рядка (20÷30) единиц. Для стали 09Г2С этот разброс значительно выше. Кроме того, микротвердость самого соединения значительно выше по сравнению со сталью 30MnB5. Это говорит о том, что сталь 09Г2С, имея высокий уровень микротвердости, оказывается более хрупкой (относительно стали 30MnB5). Это означает наличие низкой пластичности и повышенной чувствительности к концентраторам напряжений.

³ Файрушин А.М., Каретников Д.В., Романчук А.С. Исследование влияния вибрационной обработки стали 09Г2С в процессе сварки на металл сварного шва. Современные проблемы машиностроения. Сборник научных трудов XI Международной научно-технической конференции, Томск. 2017. С. 50–58.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования влияния количества циклов термической обработки сталей 09Г2С и 30МнВ5 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 30МнВ5 уменьшается вплоть до десятого цикла.

Установлена 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.

Распределение микротвердости для различных зон сварного шва образца из стали 30МнВ5 достаточно равномерное. Уровень микротвердости стали 09Г2С выше и имеет больший разброс. Данное обстоятельство является положительным моментом в вопросе чувствительности к концентраторам напряжений.

Исследования вибрационных характеристик сталей показали, что при низких частотах предпочтительнее использование изделий из стали 30МнВ5.

Таким образом, сталь 30МнВ5 с точки зрения эксплуатационных характеристик ДСМ предпочтительнее стали 09Г2С для изготовления ножей, отвалов и других элементов рабочего оборудования дорожно-строительных машин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Scherbakov A., Sklyarova A., Pushkarev A., Petrov A.: Destruction of Welded Metal Structures of Construction Machines Operated in Corrosive Environments. In: Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 247, pp 557-573 (2022). https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_50.
2. Мухаметшина Р.М. Отказы дорожно-строительных машин по параметрам коррозии // Известия КазГАСУ. 2013. № 4 (26). С. 62–67.
3. Прохоров В.Ю., Быков В.В. Пути повышения долговечности и износостойкости подшипника скольжения навесного технологического оборудования // НиКа. 2017. № 1. С. 71–74.
4. Густов Ю.И., Орехов А.А. Исследование конструктивно-технологических и эксплуатационных показателей строительной техники // Известия КазГАСУ. 2014. № 4 (30). С. 19–24.
5. Мухаметшина Р.М. Влияние климатических факторов на свойства материалов и надежность дорожно-строительных машин // Известия КазГАСУ. 2014. № 4 (30). С. 102–108.
6. Зайцева М.М., Мегера Г.И., Касьянов Д.Н. Проблема долговечности деталей грузовых автомобилей // ИВД. 2017. № 2 (45). С. 71–75.

7. Scherbakov A., Lukashuk E., Pushkarev A., Vinogradova T.: The Influence of Deformation and Thermal Effects on the Structure and Properties of the Metal of Welded Structure Elements of Lifting Cranes. In: Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 247, pp 539-555 (2022). https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_49.

8. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure // Acta materialia. 2000. Vol. 48. № 1. – 29 p.

9. Valiev R.Z., Murashkin M.Yu., Semenova I.P. Grain boundaries and mechanical properties of ultrafine-grained metals // Metallurgical and Materials Transactions. Vol. 41, issue 4, 2010, – 816 p.

10. Маркушев М.В. К вопросу об эффективности некоторых методов интенсивной пластической деформации, предназначенных для получения объемных наноструктурных материалов // Письма о материалах. Том 1. 2011. С. 36–42.

11. Утяшев Ф.З. Наноструктурирование металлических материалов методами интенсивной пластической деформации // Физика и техника высоких давлений. 2010. Том 20, № 1. С. 7–25.

12. Scherbakov A., Babanina A., Solovyeva E., Aleksandrovskiy M.: Mechanisms of construction machines and selection of steels for the manufacture of welded metal structures. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol 1001, 012012 (2020). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012012>.

13. 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.

14. Scherbakov A., Babanina A., Solovyeva E., Aleksandrovskiy M.: Materials and Methods of Experimental Studies of Welded Metal Structures of Construction Machines. In: Lecture Notes in Civil Engineering, vol 130 LNCE, pp 572-586 (2021). https://doi.org/10.1007/978-981-33-6208-6_57.

15. Тихонов А.С., Белов В.В., Леушин И.Г., Еременко В.И., Забелин С.Ф. Термоциклическая обработка сталей, сплавов и композиционных материалов. Москва. Наука. 1984. 187 с.

16. 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.

17. Щербаков А.П. Выбор материала и метода повышения износостойкости элементов строительных машин. Вестник СибАДИ. 2020. № 4(17). С. 464–475. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-464-475>.

18. Щербаков А.П. Экспериментальные исследования влияния термической обработки на свойства сварных соединений рабочих механизмов дорожно-строительных машин. Вестник СибАДИ. 2020. № 6(17). С. 664–675. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-665-675>.

19. 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.

20. 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.

21. Morrison W.B. Superplasticity of low-alloy steels // *ASM Transactions Quarterly*. 1968, vol. 61, no. 3, pp. 423–434.

22. 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.

23. Polyansky, I. Sizov, U. Mishigdorzhiiyn, 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.* 2016, 116, pp. 1–5.

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

25. 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.

26. 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. Vol. 61. Pp. 489–499.

27. 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.

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

29. 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.

30. Scherbakov, A., Babanina, A., Graboviy, K.: Acting Stresses in Structural Steels During Elastoplastic Deformation. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1259, pp 298–311 (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_26.

31. Scherbakov, A., Babanina, A., Kochetkov, I., Khoroshilov, P.: Technical condition of welded load-bearing metal structures of operated agricultural

hoisting cranes. In: *E3S Web of Conferences*, vol 175, 11005 (2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017511005>.

32. Scherbakov, A., Babanina, A., Matusevich, A.: Passive Probe-Coil Magnetic Field Test of Stress-Strain State for Welded Joints. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1259, pp 312–323 (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_27.

33. Scherbakov A., Monastireva D., Smirnov V.: Passive fluxgate control of structural transformations in structural steels during thermal cycling. In: *E3S Web of Conferences*, vol. 135, 03022 (2019). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913503022>.

34. Щербаков А.П., Пушкарев А.Е., Виноградова Т.В. Анализ влияния термоциклической обработки сталей 09Г2С и 30Мнб5 на прочностные характеристики рабочих органов дорожно-строительных машин. Вестник СибАДИ. 2021. № 2(18). С. 180–190. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-180-190>.

REFERENCES

1. Scherbakov A., Sklyarova A., Pushkarev A., Petrov A.: Destruction of Welded Metal Structures of Construction Machines Operated in Corrosive Environments. In: *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2022. 247: 557–573 (). https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_50.
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. 4 (26): 62–67.
3. 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.
4. Gustov Yu.I., Orekhov A.A. *Issledovanie konstrukcionno-tekhnologicheskikh i ekspluatatsionnykh 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.
5. Mukhametshina R.M. *Vliyanie klimaticheskikh faktorov na svoystva materialov i nadejnost dorozhno-stroitel'nyh mashin* [Influence of climatic factors on the properties of materials and reliability of road construction machines]. *Izvestiya KazGASU – News of the University*, 2014, 4 (30): 102–108.
6. 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.
7. Scherbakov A., Lukashuk E., Pushkarev A., Vinnogradova T.: The Influence of Deformation and Thermal Effects on the Structure and Properties of the Metal of Welded Structure Elements of Lifting Cranes. In: *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2022. 247: 539–555. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3844-2_49.

8. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure // *Acta materialia*. 2000. 48(1): 29.
9. Valiev R.Z., Murashkin M.Yu., Semenova I.P. Grain boundaries and mechanical properties of ultrafine-grained metals // *Metallurgical and Materials Transactions*. 2010 41(4): 816.
10. Markushev M.V. *K voprosu ob ehffektivnosti nekotorykh metodov intensivnoi plasticheskoi deformatsii, prednaznachennykh dlya polucheniya ob'emnykh nanostrukturnykh materialov*. [On the issue of the efficiency of some severe plastic deformation methods intended for the production of bulk nanostructured materials]. *Pis'ma o materialakh*. 2011. 1: 36–42.
11. Utyashev F.Z. *Nanostrukturirovanie metallicheskikh materialov metodami intensivnoi plasticheskoi deformatsii* [Nanostructuring of metallic materials by methods of intensive plastic deformation]. *Fizika i tekhnika vysokikh davlenii*. 2010, 20(1): 7–25.
12. Scherbakov A., Babanina A., Solovyeva E., Aleksandrovskiy M.: Mechanisms of construction machines and selection of steels for the manufacture of welded metal structures. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1001, 012012 (2020). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012012>.
13. 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-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii*. – *Journal of Iron and Steel. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*, 2019, 75(4): 417–426.
14. Scherbakov A., Babanina A., Solovyeva E., Aleksandrovskiy M.: Materials and Methods of Experimental Studies of Welded Metal Structures of Construction Machines. In: *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 130 LNCE: 572-586 (2021). https://doi.org/10.1007/978-981-33-6208-6_57.
15. Tikhonov A.S., Belov V.V., Leushin I.G., Eremenko V.I., Zabelin S.F. *Termotsiklicheskaya obrabotka staley, spлавov i kompozitsionnykh materialov* [Thermocyclic treatment of steels, alloys and composite materials]. Moscow, Nauka, 1984, 187.
16. Scherbakov A.P., Pushkarev A.E., Manvelova N.E. *Rabochie mekhanizmy stroitel'nykh mashin i sposoby tekhnologicheskogo obespecheniya prochnosti svarnykh soedinenij iz vysokoprochnykh staley* [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.
17. Scherbakov A.P. *Vybor materiala i metoda povysheniya iznosostojkosti elementov stroitel'nykh 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>.
18. Scherbakov A.P. Eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya termicheskoy obrabotki na svoystva svarnykh soedinenij rabochih mekhanizmov dorozhno-stroitel'nykh 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>.
19. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Kuz'min O.V., Trunova E.V., Scherbakov A.P. *Vliyanie termicheskoy i termociklicheskoj obrabotki na mekhanicheskie svoystva konstrukcionnykh staley* [Influence of thermal and thermocyclic treatment on the mechanical properties of structural steels]. *Vesnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2018, 1(66): 128–133.
20. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Trunova E.V., Korneeva E.A., Scherbakov A.P. *Vliyanie strukturnykh parametrov konstrukcionnykh 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.
21. Morrison W. B. Superplasticity of low-alloy steels // *ASM Transactions Quarterly*, 1968, 61(3): 423–434.
22. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Trunova E.V. *Vliyanie termociklicheskoj obrabotki na strukturnye izmeneniya plasticheski deformirovannykh svarnykh soedinenij metallicheskih konstrukcij stroitel'nykh 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.
23. 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.* 2016, 116: 1–5.
24. Bublikov Yu.A. *Osnovnye napravleniya povysheniya svoystv konstrukcionnykh staley ferrito-perlitnogo klassa* [Main directions of improving the properties of structural steels of ferrite-perlite class]. *VEZHPT*, 2014, 11 (72): 81–82.
25. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Trunova E.V., Scherbakov A.P. *K vyboru konstrukcionnykh staley dlya izgotovleniya svarnykh metallicheskih konstrukcij stroitel'nykh 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, 6 (65): 233–238.
26. 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.
27. Berezina A.A. *Nekotorye osobennosti ocenki strukturnoj i mekhanicheskoy neodnorodnosti svarnykh soedinenij metallicheskih konstrukcij stroitel'nykh 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, 4 (51): 123–127.

28. 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.

29. Vedyakov I.I., Odesskij P.D., Gurov S.V. *Obe-spechenie 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.

30. Scherbakov, A., Babanina, A., Graboviy, K.: Acting Stresses in Structural Steels During Elastoplastic Deformation. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021. 1259: 298-311. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_26.

31. Scherbakov, A., Babanina, A., Kochetkov, I., Khoroshilov, P.: Technical condition of welded load-bearing metal structures of operated agricultural hoisting cranes. In: *E3S Web of Conferences*, 2020. 175: 11005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017511005>.

32. Scherbakov, A., Babanina, A., Matusevich, A.: Passive Probe-Coil Magnetic Field Test of Stress-Strain State for Welded Joints. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1259: 312-323 (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_27.

33. Scherbakov A., Monastyreva D., Smirnov V.: Passive fluxgate control of structural transformations in structural steels during thermal cycling. In: *E3S Web of Conferences*, 2019. 135: 03022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913503022>.

34. Scherbakov A.P., Pushkarev A.E., Vinogradova T.V. Influtnce analysis of 09Г2С and 30MnB5 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. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-180-190>.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Щербаков А.П. Формирование направления исследования, формулировка цели и задач, обозначение алгоритма исследований, анализ результа-

тов, обоснование и структурирование методики расчета (80%).

Пушкарёв А. Е. Обзор основных направлений эксплуатации дорожно-строительных машин (10%).

Максимов С. Е. Описание материалов и методов для расчета параметров конструкций (10%).

AUTHORS' CONTRIBUTION

Alexander P. Scherbakov – formation of the research direction, formulation of goals and objectives, designation of the research algorithm, analysis of results, justification and structuring of the calculation method (80%).

Alexandr E. Pushkarev – overview of the main directions of road-building machinery operation (10%).

Sergey E. Maksimov – description of materials and methods for calculating structural parameters (10%)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Щербаков Александр Павлович – аспирант, Scopus Author ID 57212375284, Researcher ID AAP-8095-2020, старший преподаватель кафедры судебных экспертиз.

Пушкарёв Александр Евгеньевич – д-р техн. наук, Scopus Author ID8290951800, Researcher ID E-4532-2019, проф. кафедры наземных транспортно-технологических машин.

Максимов Сергей Евгеньевич – д-р техн. наук, проф. кафедры наземных транспортно-технологических машин.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander P. Scherbakov (Saint-Petersburg) – postgraduate student, Scopus author ID 57212375284, Researcher ID AAP-8095-2020, Senior Lecturer, the Forensics Department.

Alexandr E. Pushkarev (Saint-Petersburg) – Dr. of Sci. Ec., Scopus Author ID8290951800, Researcher ID E-4532-2019, Professor of Technological Machines.

Sergey E. Maksimov (Saint-Petersburg) – Dr. of Sci. Ec., Professor of Technological Machines.

Научная статья

УДК 661.878.62

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-662-677>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ФОРМЫ ОТВАЛА БУЛЬДОЗЕРА С УЧЕТОМ ГРУНТОВОГО ФОНА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Н.Т. Сурашов¹, Р.Б. Асмагулаев², Д.Н. Толымбек³¹Казахский университет путей сообщения,²ТОО «НИИПК Каздоринновация», г. Алматы, Казахстан,³Аруна-АИ, г. Нур-Султанnurgalisurashov@mail.rukazdorin@mail.rudamirinvest@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Производительность и эффективность работы землеройно-транспортных машин отвального типа зависит от характера и физико-механических свойств грунтов – прочности, связности, влажности, уплотнённости, климатического условия и от региона Республики Казахстан. По данным профессора Р.А. Кабашева, регионы Казахстана в основном имеют глинистые, песчаные, суглинистые, песчано-гравийные, крупнообломочные, полускальные и скальные грунты. Для разработки данных категорий грунтов необходимы различные конструкции и формы режущих ножей, соответственно и отвалов, позволяющих минимизировать сопротивление резания и копания грунтов. Совершенствование конструкций ножей и отвалов приводит к повышению производительности и энергоёмкости, эффективно используется тяговый фактор бульдозера.

При изучении и анализе литературных источников ученые СНГ и зарубежных стран пришли к выводу, что обоснованно созданы теории взаимодействия рабочих органов землеройно-транспортных машин с грунтами, характерными для средней полосы России и Украины, которые отличаются некоторой связью между частицами II, III категорий прочности грунта. Механизмы взаимодействия таких грунтов с бульдозерным оборудованием отличаются процессами, протекающими при копании несвязанных и плотных суглинистых грунтов, характерных для Казахстана.

Материал данной статьи представляет установление рациональных форм отвала и определение оптимальных его параметров в зависимости от категории разрабатываемого грунта, то есть создание адаптирующего рабочего органа бульдозера, соответствующего его профилю с естественной траекторией стружкообразования пласта грунта.

Материалы и методы. В качестве материалов использовались разные категории грунтов, широко распространенных в регионе Казахстана, и новые конструкции отвала бульдозера, оснащенные разнообразными комплектами ножей, то есть обычные прямолинейные ножи – для планировочных работ и разработки I-III категорий грунтов; с выступающими средними ножами – для разработки плотных IV-V категорий или со ступенчатыми ножами – для разработки твердых, прочных грунтов. Был исследован процесс их взаимодействия при максимальном формировании призмы волочения грунта перед отвалом с использованием графоаналитического метода исследования.

Результаты. При изучении процессов взаимодействия рабочего органа и ножей бульдозера с разными категориями грунтов установлены рациональные конструкции ножей, предназначенных для разработки различных категорий грунтов.

Определены оптимальные параметры отвала при максимальном наборе призмы волочения перед отвалом. Также отвал оснащен боковыми уширителями ножей, верхними козырьками и боковыми скосами. Радиус кривизны отвала в поперечном сечении соответствует естественному углу стружкообразования пласта грунта, позволяющему уменьшить сопротивление копания грунта.

Обсуждение и заключение. До настоящего времени ученые СНГ и зарубежных стран в области рабочего органа землеройно-транспортных машин отвального типа подробно изучали в теоретическом плане и экспериментальным путем установили перспективные конструкции рабочего органа и установленные на нем ножи бульдозера. Предложены многочисленные методики определения параметров рабочего органа бульдозера в зависимости от категории разрабатываемого грунта и с учетом тягового фактора

© Сурашов Н.Т., Асмагулаев Р.Б., Толымбек Д.Н., 2021

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

движителя. Однако ими было упущено исследование при максимальном наборе призмы волочения грунта перед отвалом, его площадь касания с лобовой поверхностью отвала и одновременно адаптированного в поперечном сечении отвала с естественной траекторией стружкообразования пласта грунта.

Учитывая эти положения, нами были разработаны несколько вариантов расположения ножей на отвале с учетом разрабатываемых категорий грунтов:

- бульдозерный отвал с боковыми скосами лобовой поверхности для мягких или песчаных грунтов;
- бульдозерный отвал с выступающим средним ножом, боковыми косынками и верхними боковыми скосами для разработки прочных и глинистых грунтов;
- бульдозерный отвал с боковыми скосами и боковыми ножами-уширителями для разработки разрыхленных грунтов;
- бульдозерный отвал с выступающим средним ножом, боковыми косынками, боковыми ножами-уширителями и верхними скосами для разработки плотно-прочных грунтов или суглинков средних.

На все эти четыре вида конструкции отвала и расположение ножей рекомендованы определения оптимальных параметров отвала с учетом разработки различных категорий грунтов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бульдозер, рабочий орган, отвал, козырек, нож, призма волочения, угол резания, уширитель, связный грунт

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

Статья поступила в редакцию 15.10.2021; одобрена после рецензирования 03.12.2021; принята к публикации 14.12.2021.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Сурашов Н.Т., Асмагулаев Р.Б., Толымбек Д.Н. Определение рациональной формы отвала бульдозера с учетом грунтового фона Республики Казахстан // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 6(82). С. 662-677. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-662-677>

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-662-677>

DETERMINATION OF A RATIONAL SHAPE OF A BULLDOZER BLADE, CONSIDERING THE SOIL BACKGROUND OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

Nurgali T. Surashov, Ruslan B. Asmatulaev, Damir N. Tolymbek
Kazakh University of Railway Transport
NIIPK Kazdorinnovatsia limited liability company, Almaty, Kazakhstan
Aruna-Al, Nur-Sultan
nurgalisurashov@mail.ru
kazdorin@mail.ru
damirinvest@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The productivity and efficiency of earth-cutting and transport machines (ETM) of the waste type depends on the nature and physical and mechanical properties of soils, i.e. on strength, connectivity, humidity, compactness, climatic conditions and on the region of the Republic of Kazakhstan. According to Professor R.A. Kabashev, the regions of Kazakhstan have mainly clay, sandy, loamy, sandy-gravel, coarse- and semi-rocky soils. Different designs and shapes of cutter blades, and therefore mouldboards, are required to develop these categories of soils to minimise cutting and digging resistance. Improved blade and blade designs result in higher productivity and energy efficiency, and the traction factor of the bulldozer is used effectively.

When studying and analyzing literature sources, scientists of CIS and foreign countries came to the conclusion that the theory of interaction of working bodies of earth-moving machines with soils, typical for the middle belt of Russia and Ukraine, which are characterized by some connection between particles of II, III categories of soil strength, was

© Surashov N.T., Asmatulaev R.B., Tolymbek D.N., 2021



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

reasonably created. Mechanisms of interaction of such soils with bulldozing equipment differ from the processes occurring when digging unbound and dense loamy soils typical for Kazakhstan.

The material of this article represents the establishment of rational forms of the heap and the determination of optimum parameters of the heap depending on the category of the ground being mined, i.e., the creation of an adaptive working organ (WO) of the bulldozer, corresponding to its profile with natural trajectory of ground formation formation.

Materials and methods. As materials, different categories of soils were used, widespread in the region of Kazakhstan and the new design of the bulldozer blade, equipped with a variety of sets of knives, i.e. ordinary straight knives - for planning work and the development of I-III categories of soils; with medium protruding knives (MPK) - for the development of dense IV-V categories or with stepped knives - for the development of hard, strong soils, etc. The process of their interaction with the maximum formation of the prism of drawing the soil before the blade, using the graphic-analytical method of research, was investigated.

Outcomes. Studying the processes of interaction of WO and bulldozer knives with different categories of soils, rational designs of knives designed for the development of various categories of soils were established. The optimal parameters of the blade with the maximum set of the drawing prism before the blade are determined. Also, the blade is equipped with side knife extenders, upper visors and side bevels. The radius of curvature of the blade in the cross-section corresponds to the natural angle of chip formation of the soil layer, which allows to reduce the resistance of digging the soil.

Discussion and conclusion. Until now, scientists of the CIS and foreign countries in the field of WO ETM of the waste type have studied in detail in theoretical terms and experimentally established promising designs of WO and bulldozer knives. Numerous methods for determining the parameters of the WO of the bulldozer depending on the category of the developed soil and taking into account the traction factor of the propulsion system, etc. However, they missed the study, with the maximum set of the prism of drawing the soil in front of the blade, its area of contact from the frontal surface of the blade and at the same time, adapted in the cross-section of the blade (radius of curvature of the blade) with the natural trajectory of chip formation of the soil layer.

Taking into account these provisions, we have developed several options for the location of knives on the blade, taking into account the developed categories of soils:

- a bulldozer blade with side bevels of the frontal surface for soft (sandy) soils;
- bulldozer blade with MPK, side scarves and upper side bevels for strong, clay soils;
- bulldozer blade with side bevels and side knives-extendors for loosened soils;
- bulldozer blade with MPK, side scarves, side knives-extendors and upper bevels for densely strong soils (medium loam). For all these options (4 types of blade) blade design and knife location, it is recommended to determine the optimal parameters of the blade, taking into account the development of the soil category.

KEYWORDS: bulldozer, working body, blade, visor, knife, drawing prism, cutting angle, expander, cohesive soil.

ACKNOWLEDGEMENTS: the authors thank Leonid A. Khmar and Rakhymzhan A. Kabashev for providing valuable advice.

The article was submitted 08.09.2021; approved after reviewing 03.12.2021; accepted for publication 31.10.2021.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods.

There is no conflict of interest.

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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Казахстане стремительными темпами увеличивается объем земляных работ в области строительства промышленно-гражданских сооружений, в сельском хозяйстве, строительстве автомобильных и железных дорог. В этих объектах эксплуатируются тысячи землеройно-транспортных машин, в том числе бульдозеры разных видов, и с каждым годом обновляется парк землеройно-транспортных машин нового поколения. Их производительность, энергоемкость зависят

от степени совершенствования конструкции рабочего органа землеройно-транспортных машин отвального типа [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

Большой вклад в развитие теории взаимодействия рабочего органа землеройно-транспортных машин с грунтом внесли ученые стран СНГ: В.П. Горячкин, Н.Г. Домбровский, А.Н. Зеленин, К.А. Артемьев, Ю.А. Ветров, Д.И. Федоров, В.И. Баловнев, Д.П. Волков, Л.А. Хмара, В.Л. Баладинский, Т.В. Алексеева, В.С. Щербаков, И.А. Недорезов, В.К. Руднев, А.М. Холодов, В.В. Ничке, Р.А. Кабашев,

а также зарубежные ученые: Г. Тыро, Г. Фогель, Г. Кюн, Г. Дресс, Е. Динглингер, Ф. Кинаст, И. Ратье и другие. Совершенствованию конструкций рабочего органа землеройно-транспортных машин отвального типа посвятили свои работы: В.Д. Абезгауз, Н.Д. Аверин, В.В. Лихачев, Л.А. Хмара, В.И. Козликин, Т.М. Гаджиев, П.И. Лавренко, В.Г. Попов, А.В. Рубаилов, А.З. Щарц, Ю.А. Шевнин, В.С. Березин, В.Я. Дворковой, Jarosław Selech, Dariusz Ulbrich, Konrad Włodarczyk, Żaneta Staszak, Jacek Marcinkiewicz, Dawid Romek, Bartosz Baran и другие.

Современные бульдозеры, оснащенные отвалами с комплектом режущих ножей и рыхлителей, широко используются для выполнения земляных и планировочных работ, в частности, в строительстве автомобильных и железных дорог, аэродромов, плотин [5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Однако применяемые в настоящее время бульдозеры работают недостаточно эффективно, так как при разработке разных типов грунтов и их перемещении не полностью используют мощность трактора с бульдозерным оборудованием [2, 3, 6, 16].

Целью исследования является повышение эффективности использования мощности бульдозера в зависимости от прочностных характеристик разрабатываемого грунта, то есть создание отвалов с изменяющейся формой и конструкцией, оснащенных соответствующими ножами в зависимости от категории разрабатываемого грунта, и разработка методики определения оптимальных параметров отвала с помощью графоаналитического метода.

Для разработки грунтов I-III категории на отвал бульдозера устанавливают секционные ножи с режущими кромками, образующими общую прямую линию. Под действием усилия отвала режущие кромки ножей легко внедряются в грунт; для разработки грунта IV категории применяют другой вариант отвала, то есть со средним выступающим ножом или со ступенчатыми ножами, которые позволяют разрушать выступающими кромками ножа поверхность прочного грунта, такие конструкции бульдозерного оборудования позволяют отвалу с ножами легко внедряться в грунт в начале прохода [2, 3, 13, 17]. Для разработки грунтов V-VI категорий устанавливаются на отвал бульдозера ножи, воздействующие на прочный грунт вибрационным, ударным способом. Часто бульдозерное оборудование содержит однозубовый или многозубовый рыхлитель, которым предварительно разрыхляют эти грунты.

При разработке разных категорий грунтов бульдозером используют две операции:

- разрушение поверхности твердого слоя грунта, внедрение ножа вглубь грунта, а затем формирование призмы волочения перед отвалом;

- перемещение (обычно до 100 м) максимально сформированной призмы волочения [5, 16, 18, 19].

Применение различных вариантов конструкции ножа и отвала позволяет разрабатывать различные категории грунтов и с большей эффективностью использовать мощность трактора с бульдозерным оборудованием [3, 7, 18].

Для максимального использования трактора с бульдозерным оборудованием при разработке и перемещении наибольшего объема призмы волочения нами проведены графоаналитические исследования с целью установления оптимальных параметров и геометрической формы отвала как в лобовой поверхности, так и в поперечном сечении [20, 21, 22].

Форма отвалов бульдозеров, находящихся в настоящее время в эксплуатации, по своей конструктивной форме не соответствует современным требованиям повышения их эффективности.

При разработке грунтов отвалом бульдозера происходят следующие процессы: нож отвала разрушает поверхность грунта и внедряется под определенным углом в толщу h грунта, затем под действием силы тяги бульдозера ножи отвала срезают грунт определенной толщины h , который, поднимаясь вверх по лобовой поверхности отвала, образует стружкообразование по определенной траектории. Форма и траектория стружкообразования пласта грунта с радиусом R зависят от многих факторов: связности, влажности, гранулометрического состава, физико-химического состава и структуры грунта, температуры окружающей среды и климатических условий, режима работы бульдозера, геометрических параметров ножей и конструкции отвала. Однако для всех категорий грунтов существует один принцип работы. При глубоком радиусе закругления профиля поверхности отвала грунт не касается средней части отвала и в нем происходит прилипание грунта (рисунок 1, а), которое создает дополнительные сопротивления при формировании призмы волочения. При недостаточном же радиусе закругления поверхности отвала образованный пласт грунта ударяется о поверхность отвала и создает

дополнительные сопротивления, так как радиус поверхности отвала больше естественного радиуса формирования пласта грунта (рисунок 1, б).

Следовательно, радиус поверхности отвала должен соответствовать радиусу естественной траектории стружкообразования пласта грунта, то есть нужно адаптировать поверхность отвала соответственно профилю стружкообразования грунта. При таком исполнении конструкции отвала, оснащенные разными формами режущих ножей бульдозера, позволяют минимизировать расход энергии трактора и повышается производительность бульдозера при разработке разных категорий грунтов и их перемещений [6, 10].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В регионе Казахстана часто встречаются связные и несвязные, твердые, песчаные, полускальные грунты и грунты с каменистыми включениями. Для дальнейшего исследо-

вания при разработке грунтов бульдозерами принимались грунты I-V категории [6].

Конструктивными основными параметрами стандартного отвала являются (рисунок 1): B и H – соответственно ширина и высота отвала, м; H_k – высота козырька, м; R – радиус кривизны отвала, м; l – длина дуги отвала, м; φ – центральный угол кривизны отвала, град; v' – расстояние от основания отвала до точки контакта по высоте с грунтом, то есть высота бокового валика, м; P – периметр контура взаимодействия перемещаемого грунта с лобовой поверхностью отвала, м; C – высота части призмы волочения, возвышающаяся над козырьком, м; a' – ширина бокового валика (просыпания грунта), м.

Для дальнейшего исследования нами выбраны четыре варианта исполнения конструкции отвала, оснащенных разными ножами в зависимости от категории разрабатываемого грунта, эти конструкции отвала с ножами запатентованы в РК авторами [патенты РК: №15852 от 04.04.2005; №13578 от 14.08.2003; №13576 от 14.08.2003].

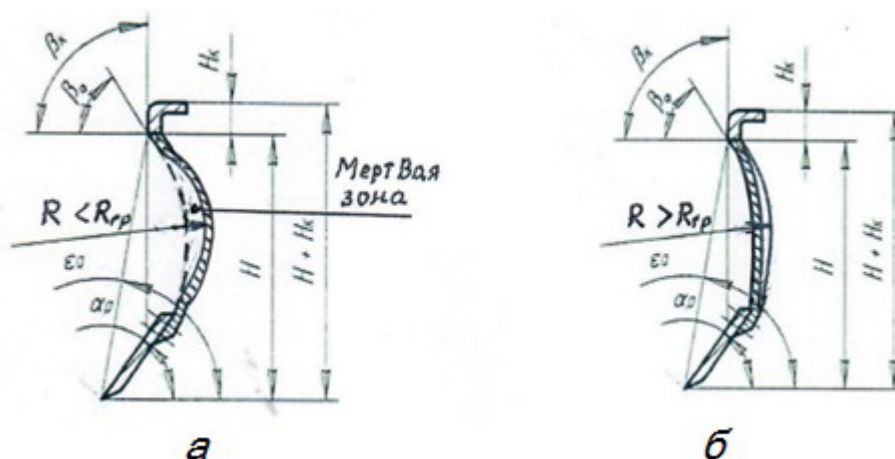


Рисунок 1 – Рекомендуемая форма закругления поперечного сечения отвала в зависимости от траектории естественного формирования угла пласта грунта:

- а – если R – радиус отвала меньше естественной траектории стружкообразования пласта грунта R_{cp} , то на поверхности отвала образуется «мертвая зона», создающая дополнительные нагрузки на движитель;
б – если R – радиус отвала больше естественной траектории стружкообразования грунта R_{cp} , то на поверхности отвала создается дополнительное сопротивление

Figure 1 – The recommended shape of rounding the cross-section of the blade, depending on the trajectory of the natural formation of the angle of the soil layer

- a) if R – the radius of the blade is less than the natural trajectory shavings of soil layer R_{cp} , then on the surface the blade forms a "dead zone", creating;
b) if R – the radius of the blade is greater than the natural trajectory shavings of soil R_{cp} , then on the surface additional loads on the propulsion system blade creates additional resistance

РЕЗУЛЬТАТЫ

В начальной стадии разработки разрыхленных (I и II категорий) грунтов традиционным отвалом с лобовой поверхностью **удс** (рисунок 2, а) объем грунта постепенно увеличивается перед отвалом и через некоторое время формируется максимальная призма волочения с поперечным сечением нмз. При дальнейшем перемещении грунта с обеих сторон отвала часть призмы волочения уходит в боковые валики, те элементы призмы волочения **над** и **всз** (см. рисунок 2, а), которые не контактируют с лобовой поверхностью отвала, что уменьшает производительность бульдозера. Верхняя часть призмы волочения, возвышающаяся над козырьком величиной C , в процессе перемещения грунта уменьшается за счет опрокидывания грунта частично вперед и в обратную сторону, его величина зависит от радиуса кривизны отвала R , угла резания α_p , углов наклона отвала ε_0 и козырька β_k , скорости движителя бульдозера v .

С целью изучения способов повышения эффективности использования технической

производительности, уменьшения металлоемкости и энергоемкости бульдозеров рассмотрены отвалы различных конструктивных форм с учетом набора призмы волочения и определены их оптимальные параметры.

Из анализа процесса взаимодействия бульдозерного рабочего органа с грунтами различной категории нами разработаны принципиально новые конструкции отвалов с верхними боковыми скосами и ножами-уширителями (патенты РК №15852, №13578, № 13576), что обуславливает сохранение и увеличение объема максимальной призмы волочения при ее перемещении и транспортировке (рисунок 3).

Рациональную форму и определение параметров отвала бульдозера следует проводить с учетом рабочего процесса копания и перемещения призмы волочения. Рассмотрим процесс перемещения призмы волочения отвалом бульдозера с параметрами B , H , H_K и ρ (см. рисунки 2, 3, 4), где B и H – соответственно ширина и высота отвала; H_K – высота козырька; ρ – угол внутреннего трения грунта в покое.

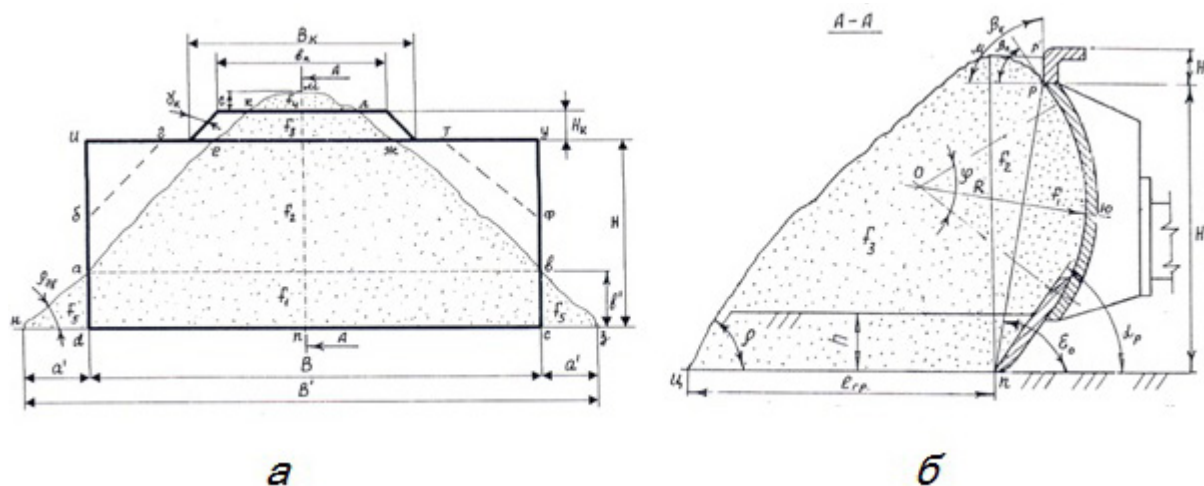


Рисунок 2 – Схема взаимодействия отвала с грунтом при максимальной призме волочения:
а – схема взаимодействия лобовой поверхности отвала с призмой волочения грунта;
б – поперечное сечение отвала и призмы волочения

Figure 2 – Scheme of interaction of the blade with the soil at the maximum prism of drawing
а – scheme of interaction of the frontal surface of the blade with the prism of drawing;
б – blade cross-section and drawing prisms

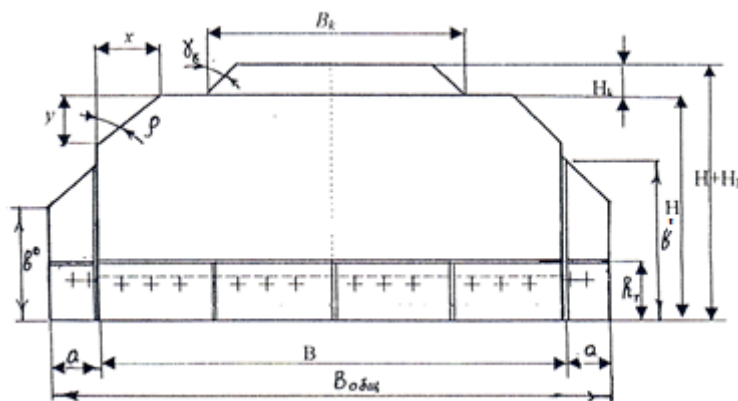


Рисунок 3 – Рациональная форма отвала бульдозера

Figure 3 – Rational shape of the bulldozer blade

Из рассмотренной расчетной схемы имеем

$$C + H + H_k = tq\rho \cdot \frac{B}{2} + \alpha' tq\rho, \quad (1)$$

откуда

$$\alpha' = \frac{C + H + H_k - \frac{B}{2} tq\rho}{tq\rho}, \quad (2)$$

тогда

$$\alpha = k_{\delta\delta} \cdot \alpha' = 0,6 \cdot \alpha', \quad (3)$$

где $k_{\delta\delta}$ – коэффициент ширины ножа-уширителя, принимаемый конструктивно: $k_{\delta\delta}=0,6$ – для связных грунтов; $k_{\delta\delta}=0,4$ – для несвязных грунтов [2, 3]; α' – ширина бокового валика (просыпания грунта); α – дополнительная ширина ножа-уширителя; ρ – угол внутреннего трения грунта.

Тогда общая ширина отвала с ножами-уширителями

$$B_{\text{общ}} = B + \frac{2(C + H + H_k - \frac{B}{2} tq\rho)}{tq\rho}. \quad (4)$$

Высота дополнительного ножа-уширителя определяется выражением из рассмотрения подобия треугольников hmn и had :

$$b = \frac{\alpha'(H + H_k + C)}{\alpha' + \frac{B}{2}}, \quad (5)$$

где C – высота части призмы волочения, возвышающаяся над козырьком. После преобразования выражения (5) значение b примет вид

$$b = \frac{2[(C + H + H_k - \frac{B}{2} tq\rho)(H + H_k + C)]}{2(C + H + H_k - \frac{B}{2} tq\rho) + B tq\rho}. \quad (6)$$

Анализируя схему взаимодействия отвала бульдозера с грунтом, можно констатировать, что верхние боковые части отвала не взаимодействуют с грунтом. Это обуславливает возможность выполнить отвал с боковыми скосами, форма которого будет соответствовать схеме взаимодействия его с грунтом. Ориентировочно боковые скосы на рисунке 2 показаны штриховыми линиями bg и mf , эта часть с двух сторон отрезается, причем последние проведены параллельно hk и lz , что уменьшает вес отвала бульдозера на 5%.

Рациональная форма отвала бульдозера с нижними боковыми ножами-уширителями, исключая просыпание грунта с учетом призмы волочения и угла внутреннего трения, имеет вид, показанный на рисунке 3.

Тогда высота и ширина бокового скоса будут равны

$$Y = H - \alpha' \cdot k_{\delta\delta}, \quad X = Y \cdot tg\rho, \quad (7)$$

где $k_{\delta\delta}$ – коэффициент запаса просыпания грунта по верхним боковым скосам: $k_{\delta\delta} = 1,2$ – для связных грунтов; $k_{\delta\delta} = 1,3$ – для несвязных грунтов [2].

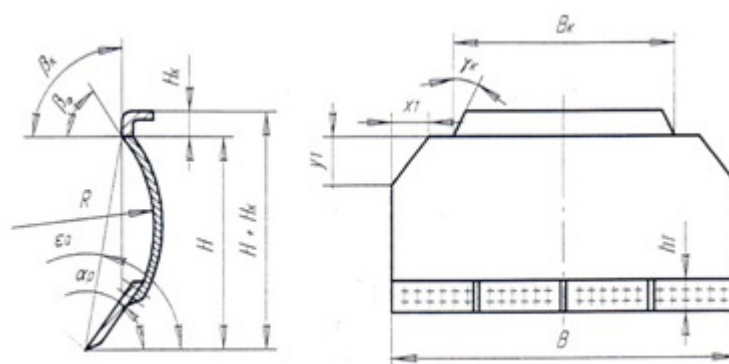


Рисунок 4 – Схема бульдозерного отвала с боковыми скосами

Figure 4 – Scheme of a bulldozer blade with side bevels

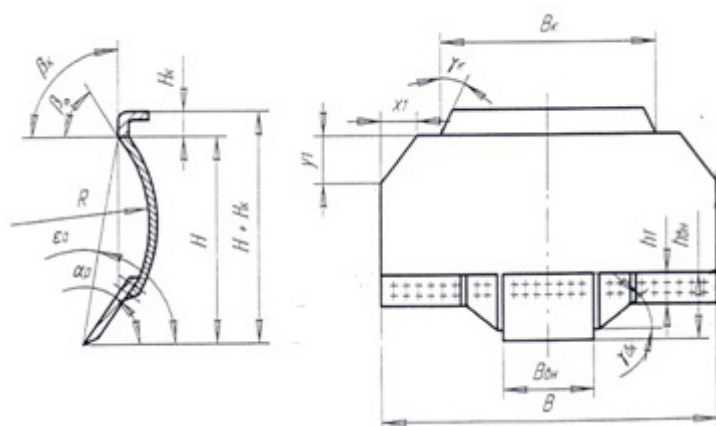


Рисунок 5 – Схема бульдозерного отвала с выступающим средним ножом, боковыми косынками и скосами

Figure 5 – Scheme of a bulldozer blade with MPK, side scarves and bevels

Рассмотрим пример определения размеров дополнительных ножей-уширителей отвала бульдозера с учетом грунтов I и II категории. Например, исходный отвал бульдозера с параметрами $H = 1,0$ м; $H_k = 0,1$ м; $B = 2,5$ м; $C = 0,05$ м; $\rho = 38^\circ$. Используя зависимости (2) и (6), получим значения a и b : $a = 0,17$ м; $b = 0,1$ м.

Установление на бульдозерном отвале боковых ножей-уширителей размерами a и

b обеспечит предотвращение ухода призмы волочения в боковые валики на 60–70% при перемещении призмы по поверхности грунта.

Особенностью определяемых параметров верхних боковых скосов следует считать то, что необходимо принимать небольшой запас в сторону увеличения его размеров на случай транспортирования грунтов по физико-механическим характеристикам в отличие от рассмотренных.

Таблица 1
Основные оптимальные параметры бульдозерного отвала с боковыми скосами

Table 1
Main optimal parameters of a bulldozer blade with side bevels

№ п/п	Наименование параметров	Обозначения	Размерность	Расчетные формулы (см. рисунок 4)
1.	Ширина традиционного отвала	B	м	Техническая характеристика бульдозера для соответствующего тягового усилия тягача
2.	Высота отвала	H	м	$H = 500\sqrt[3]{T_H} - 5T_H$
3.	Высота козырька	H_k	м	$H_k \cong (0,1 \dots 0,2)H$
4.	Высота отвала с козырьком	$H+H_k$	м	$H + H_k = (1,1 \dots 1,2)H$
5.	Ширина козырька	B_k	м	$B_k = (0,3 \dots 0,5)B$
6.	Радиус кривизны отвала	R	м	$R \cong H$
7.	Угол боковой грани козырька	γ_k	град	$\gamma_k = 35 \dots 45$
8.	Угол наклона козырька	β_k	град	$\beta_k \cong 90 \dots 100$
9.	Угол разгрузки отвала	β_o	град	$\beta_o \cong 30 \dots 80$
10.	Угол резания	α_p	град	$\alpha_p \cong 45 \dots 55$
11.	Угол наклона отвала	ε_o	град	$\varepsilon_o \cong 70 \dots 80$
12.	Параметры скоса: по горизонтали по вертикали	x_1 y_1	м м	$x_1 = \frac{H + H_k - \frac{B}{2} t q p}{t q p}$ $y_1 = x_1$

*Принятые обозначения в формулах: T_H – номинальная сила тяги бульдозера в кН [2].

Таблица 2
Основные оптимальные параметры бульдозерного отвала с выступающим средним ножом, боковыми козырьками и боковыми скосами

Table 2
The main optimal parameters of a bulldozer blade with MPK, side scarves and side bevels

№ п/п	Наименование параметров	Обозначения	Размерность	Расчетные формулы (рисунок 5)
1.	Ширина традиционного отвала	B	м	Техническая характеристика бульдозера для соответствующего тягового усилия тягача
2.	Высота отвала	H	м	$H = 500\sqrt[3]{T_H} - 5T_H$
3.	Высота козырька	H_k	м	$H_k \cong (0,1 \dots 0,2)H$
4.	Высота отвала с козырьком	$H + H_k$	м	$H + H_k = (1,1 \dots 1,2)H$
5.	Ширина козырька	B_k	м	$B_k = (0,3 \dots 0,5)B$
6.	Радиус кривизны отвала	R	м	$R \cong H$
7.	Ширина ВСН	B_{BH}	м	$B_{BH} = \frac{B}{3\pi_{BH}}$
8.	Ширина БК*	B_{BK}	м	$B_{BK} = n_{BH}K_{BOK}tg\gamma^*$
9.	Высота ВСН*	h_{BH}	м	$h_{BH} = 3h_T^*$
10.	Угол боковой грани козырька	γ_k	град	$\gamma_k = 35 \dots 45^*$
11.	Угол наклона козырька	β_k	град	$\beta_k \cong 90 \dots 100$
12.	Угол разгрузки отвала	β_o	град	$\beta_o \cong 30 \dots 80$
13.	Угол резания	α_p	град	$\alpha_p \cong 45 \dots 55$
14.	Угол наклона отвала	ε_o	град	$\varepsilon_o \cong 70 \dots 80$
15.	Параметры скоса: по горизонтали по вертикали	x_1 y_1	м м	$x_1 = \frac{H + H_k - \frac{B}{2}tg\rho}{tg\rho}$ $y_1 = x_1$

* Принятые обозначения в формулах:

n_{BH} – количество выступающих ножей;
 K_{BOK} – коэффициент бокового расширения грунта;
 $K_{BOK} \cong 0,7 \dots 0,9$ [2];
 h_T – высота традиционного режущего ножа;
 БК – боковые косынки;
 ВСН – выступающие средние ножи;
 γ – угол бокового расширения.

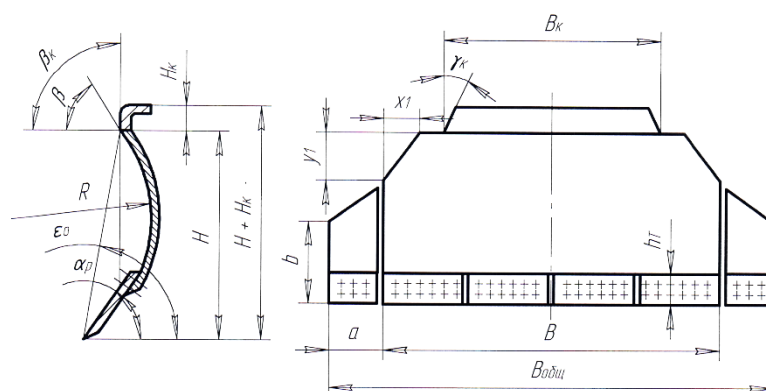


Рисунок 6 – Схема бульдозерного отвала с боковыми скосами и ножами-уширителями

Figure 6 – Scheme of a bulldozer blade with side bevels and extension knives

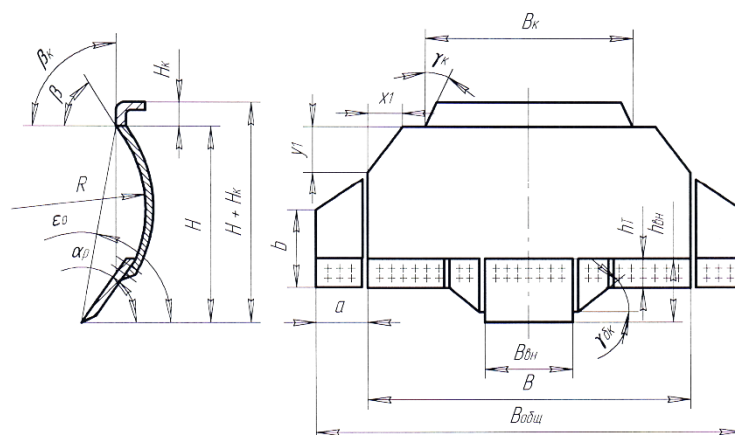


Рисунок 7 – Схема бульдозерного отвала с выступающим средним ножом, боковыми косынками, ножами-уширителями и скосами

Figure 7 – Scheme of a bulldozer blade with MPK, side scarves, extension knives and bevels

Таблица 3
Основные оптимальные рациональные параметры бульдозерного отвала
с верхними боковыми скосами и боковыми ножами-уширителями

Table 3
The main optimal rational parameters of a bulldozer blade with upper side bevels and side extension knives

№ п/п	Наименование параметров	Обозначения	Размерность	Расчетные формулы (рисунок 6)
1.	Ширина традиционного отвала	B	м	Техническая характеристика бульдозера для соответствующего тягового усилия тягача
2.	Высота отвала	H	м	$H = 500\sqrt[3]{T_H} - 5T_H$
3.	Высота козырька	H_k	м	$H_k \cong (0,1 \dots 0,2)H$
4.	Высота отвала с козырьком	$H+H_k$	м	$H + H_k = (1,1 \dots 1,2)H$
5.	Ширина козырька	B_k	м	$B_k = (0,3 \dots 0,5)B$
6.	Радиус кривизны отвала	R	м	$R \cong H$
7.	Угол боковой грани козырька	γ_k	град	$\gamma_k = 35 \dots 45$
8.	Угол наклона козырька	β_k	град	$\beta_k \cong 90 \dots 100$
9.	Угол разгрузки отвала	β_o	град	$\beta_o \cong 30 \dots 80$
10.	Угол резания	α_p	град	$\alpha_p \cong 45 \dots 55$
11.	Угол наклона отвала	ε_o	град	$\varepsilon_o \cong 70 \dots 80$
12.	Общая ширина отвала с ножами-уширителями		м	$B_{\text{общ}} = B + \frac{2(C + H + H_k - \frac{B}{2}tq\rho)}{tq\rho}$
13.	Параметры ножа-уширителя: ширина высота	a b	м м	$a = \frac{(C + H + H_k - \frac{B}{2}tq\rho)}{tq\rho}$ $b = \frac{a(H + H_k + C)}{a + \frac{B}{2}}$
14.	Параметры скоса: по горизонтали по вертикали	x_1 y_1	м м	$x_1 = \frac{H + H_k - \frac{B}{2}tq\rho}{tq\rho}$ $y_1 = x_1$

Таблица 4
Основные оптимальные рациональные параметры бульдозерного отвала с выступающим средним ножом, боковыми косынками, боковыми ножами-уширителями и верхними скосами

Table 4
The main optimal rational parameters of a bulldozer blade with MPK, side scarves, side extension knives and upper bevels

№ п/п	Наименование параметров	Обозначения	Размерность	Расчетные формулы (рисунок 7)
1.	Ширина традиционного отвала	B	м	Техническая характеристика бульдозера для соответствующего тягового усилия тягача
2.	Общая ширина отвала с ножами-уширителями	$B_{\text{ОБЩ}}$	м	$B_{\text{ОБЩ}} = B + \frac{2(C + H + H_k - \frac{B}{2} t q \rho)}{t q \rho}$
3.	Высота отвала	H	м	$H = 500 \sqrt[3]{T_H} - 5 T_H$
4.	Высота козырька	H_k	м	$H_k \cong (0,1 \dots 0,2) H$
5.	Высота отвала с козырьком	$H + H_k$	м	$H + H_k = (1,1 \dots 1,2) H$
6.	Ширина козырька	B_k	м	$B_k = (0,3 \dots 0,5) B$
7.	Радиус кривизны отвала	R	м	$R \cong H$
8.	Ширина ВСН	$B_{\text{ВН}}$	м	$B_{\text{ВН}} = \frac{B}{3 \Pi_{\text{ВН}}}$
9.	Ширина бок. косынок	$B_{\text{БК}}$	м	$B_{\text{БК}} = h_{\text{ВН}} K_{\text{БОК}} t q \gamma$
10.	Высота этих косынок	$H_{\text{БК}}$	м	$h_{\text{ВН}} = 3 h_T$
11.	Угол боковой грани козырька	γ_k	град	$\gamma_k = 35 \dots 45$
12.	Угол наклона козырька	β_k	град	$\beta_k \cong 90 \dots 100$
13.	Угол разгрузки отвала	β_o	град	$\beta_o \cong 30 \dots 80$
14.	Угол резания	α_p	град	$\alpha_p \cong 45 \dots 55$
15.	Угол наклона отвала	ε_o	град	$\varepsilon_o \cong 70 \dots 80$
16.	Параметры скоса: по горизонтали по вертикали	x_1 y_1	м м	$x_1 = \frac{H + H_k - \frac{B}{2} t q \rho}{t q \rho}$ $y_1 = x_1$

Учитывая предложенные формулы и полученную базовую форму отвала бульдозера (см. рисунок 3), нами предложены конструктивные различные формы отвалов с оптимальными параметрами. Они созданы по изложенному выше принципу: адаптация лобовой поверхности отвала к призматической форме перемещаемого грунта.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Из анализа процесса взаимодействия бульдозерного рабочего органа с грунтами разных категорий получены принципиально новые конструкции отвала с боковыми скосами и ножами-уширителями, что обуславливает сохранение объема призмы волочения при ее перемещении, например, при разработке грунтов сыпучих и рыхлых, достигнув тем самым адаптацию лобовой формы отвала к форме траекторией перемещаемой призмы волочения.

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

3. Графоаналитические исследования образования призмы волочения перед отвалом позволили разработать различные конструкции отвалов, оснащенных выступающим средним ножом, боковыми косынками и боковыми уширителями, что позволяет увеличивать производительность бульдозера на 7–10% [2].

4. По представленным в таблицах 1, 2, 3, 4 зависимостям можно произвести выбор и определение оптимальных параметров для сформированных рабочих органов, имеющих различные комбинированные сочетания режущих ножей, боковых косынок, ножей-уширителей, форму и параметры скосов в зависимости от грунтовых условий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хмара Л.А., Басий В.В., Деревянчук М.И., Максик Ю.А. Исследование накопительной способности отвала бульдозера с боковыми ограничивающими элементами // Вестник Харьковского национального автомобильного дорожного университета. 2005. № 2. С.80–84.
2. Хмара Л.А. Анализ главных направлений совершенствования рабочего оборудования бульдозеров // Строительные и дорожные машины. 2005. № 2. С.8–14.
3. Баловнев В.И., Бакатин Ю.П., Кустарев Г.В. [и др.] Машины для строительства и работ в жи-

лищно-коммунальном хозяйстве города и поселка // Строительные и дорожные машины. 1992. № 1.

4. Тургумбаев С. Дж., Кабашев Р.А. Результаты экспериментальных исследований процесса копания грунтов модернизированным рабочим органом под гидростатическим давлением // Вестник СибАДИ. № 2 (54). 2017. С.36–42.

5. Щербаков В.С., Колякин В.И., Беляев В.В. Влияние геометрических параметров ЗТМ на процесс заглубления рабочего органа // Гидропривод и системы управления строительных и дорожных машин. 1989. С. 58– 61.

6. Кабашев Р.А., Сурашов Н.Т., Гудович М.И. Анализ и оценка перспективных конструкций рабочих органов землеройно-транспортных машин // Механизация и автоматизация земляных 1991. С. 24– 27.

7. Жаворонков А.В. Развитие землеройно-транспортной и дорожной техники // Строительные и дорожные машины. 2001. № 8. С. 13– 15.

8. Гутин И.М. Предложения по определению дальности транспортировки горной массы бульдозерами // Колыма. 1969. № 7. С.14–17.

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

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

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

12. Choosing The Right Dozer Blade February 11, 2015 / © 2021 Highlands Publications, Inc. All Rights Reserved // <https://mcsmag.com/choosing-right-dozer-blade/>

13. Бакулин А.В., Харкун Б.И., Уткин В.И. Особенности процесса копания грунта скреперным ковшом с криволинейным днищем // Строительные и дорожные машины. 1991. № 11. С. 6–9.

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

15. Краснонос А.Ю. Математическое моделирование взаимосвязи параметров рабочего оборудования и энергоемкости копания грунта // Журнал Сибирского федерального университета. 2014. № 6. С.685–688.

16. Хмара Л.А. Научное сопровождение строительных и дорожных машин: исследование, расчет, создание, выбор, использование // Вестник Приднестровской государственной академии строительства и архитектуры. 2010. № 7. С.17– 33.

17. Демиденко А.И., Гатыч К.Ю. Расчет усилий копания рабочим оборудованием бульдозера // Вестник СибАДИ. 2017. № 2 (54). С.17–22.

18. Розенфельд Н.В., Доля Ю.А. Нагрузки, действующие на бульдозер при транспортировке грунта // Вестник ХНАДУ. 2014. № 65–66. С. 231–234.

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

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

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

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

REFERENCES

1. Khmara L.A., Basi V.V., Kovelchuk M.I., Maksyuk Yu.A. Issledovanie nakopitel'noj sposobnosti otvala bul'dozera s bokovymi ogranichivajushhimi jelementami [Study of the accumulative ability of a bulldozer dust with side limiting elements] // *Bulletin of the Kharkiv National Road University*, 2005. 2: 80-84.

2. Khmar L.A. Analiz glavnyh napravlenij sovershenstvovaniya rabochego oborudovaniya bul'dozero [Analysis of the main directions of improving work equipment of bulldozers] // *Construction and road vehicles*, 2005. 2: 8-14.

3. Balovnev V.I., Bakatin Yu.P., Kustarev G.V., and others. Mashiny dlja stroitel'stva i rabot v zhilishhno-kommunal'nom hozjajstve goroda i poselka [Machines for construction and work in housing and communal services of the city and village] // *Construction and road vehicles*, 1992. 1.

4. Turgumbayev S. J., Kabashev R.A. Rezul'taty jeksperimental'nyh issledovanij processa kopaniya gruntov modernizirovannym rabochim organom pod gidrostaticheskim davleniem [The results of experimental studies of the process of digging the soils by an upgraded working body under hydrostatic pressure] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017. 2 (54): 36-42.

5. Shcherbakov B.C., Kolyakin V.I., Belyaev V.V. Vlijanie geometricheskikh parametrov ZTM na process zaglublenniya rabocheho organa [The influence of the geometric parameters of the ZTM on the dryness process of the working body] // *Hydraulic engineering and system of management of building and road vehicles / cross-country. Sat Scientific Tr.* Omsk.: MPE, 1989, p. 58-61.

6. Kabashev R.A., Suurashov N.T., Gudovich M.I. Analiz i ocenka perspektivnyh konstrukcij rabochih organov zemlerojno-transportnyh mashin [Analysis and assessment of the promising structures of the working bodies of earthmoving machinery] // *Mechanization*

and automation of earthworks Collection of reports. KISI, 1991.-p.24-27.

7. Zhavoronkov A.V. Razvitie zemlerojno-transportnoj i dorozhnoj tehniki [Development of earthmoving and road equipment] // *Construction and road vehicles*. 2001. 8: 13-15.

8. Gutin I.M. Predlozhenija po opredeleniju dal'nosti transportirovki gornoj massy bul'dozerami [Proposals for determining the range of transportation of mountain mass by bulldozers] // *Kolyma* 1969: 7: 14-17.

9. Jarosław Selech, Dariusz Ulbrich. A Working Design of a Bulldozer Blade As Additional Equipment Of A Compaction Drum Roller // *Poznan University Of Technology / Institute of Machines and Motor Vehicles*, 60-965 Marii Skłodowskiej.-Curie SQ. 5. Poland. 2019.

10. Y.Franco, D.Rubinstein, I.Shmuelvich. PREDICTION OF SOIL-BULLDOZER BLADE INTERACTION USING DISCREETE ELEMENT METHOD // *American Society of Agricultural and BioLogical Engineers. / World Sciencific.-michigan.www.asabe.org*, 2012.

11. Sang-Ho Kim, Yong-Seok Lee. Development of Bulldozer Sensor System for Estimating The Position of Blade Cutting Edge // *Automation In Construction*. 2019.106.

12. Choosising The Right Dozer Blade February 11, 2015 /2021 Highlands Publications, Inc. All Rights Reserved // <https://mcsmag.com/choosing-right-dozer-blade/>

13. Bakulin A.V., Kharkun B.I., Utkin V.I. Osobennosti processa kopaniya grunta skrepernym kovshom s krivolinejnym dnishhem [Features of the process of digging the soil with a crop bucket with a curvilinear bottom] // *Construction and road vehicles*, 1991. 11 : 6-9.

14. Leskovets I.V. Istorija i perspektivy razvitija zemlerojnogo oborudovaniya otval'nogo tipa [History and prospects for the development of dish-type earthmoving equipment] // *Bulletin of the Belarusian University*, 2011, 3 (32): 64-70.

15. Krasnonosov A.Yu. Matematicheskoe modelirovanie vzaimosvjazi parametrov rabocheho oborudovaniya i jenergoemkosti kopaniya grunta [Mathematical modeling of the relationship of the parameters of work equipment and energy intensity of the soil digging] // *Magazine Siberian Federal University Engineering & Technologies*, 2014. 6: 685-688.

16. Khmara L.A. Nauchnoe soprovozhdenie stroitel'nyh i dorozhnyh mashin: issledovanie, raschet, sozdanie, vybor, ispol'zovanie [Scientific support of construction and road machines: research, calculation, creation, choice, use] // *Sat. Scientific Tr. Pridneprovskaya State Academy of Construction and Architecture*, 2010.7:17-33.

17. Demidenko A.I., Gatich K.Yu. Raschet usilij kopaniya rabochim oborudovaniem bul'dozera [Calculation of the efforts of digging by work equipment of the bulldozer] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017. 2 (54):17-22.

18. Rosenfeld N.V., Share Yu.A. Nagruzki, dejstvujushhie na bul'dozer pri transportirovke grunta [The loads acting on the bulldozer during the transportation of the soil] // *Herald Hernad*, 2014. 65-66: 231-234.

19. Zavyalov A.M., Chernyak S.S. Proektirovanie optimal'nyh rezhimov zaglubleniya rezhushhego instrumenta bul'dozera v grunt [Designing optimal modes of the cutting of the cutting tool of the bulldozer into the ground] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2009. 1 (11): 53-60.

20. Berestov E.I., Leskovets I.V. Metodika rascheta geometricheskikh parametrov prizmy volocheniya na otvale bul'dozera [Methods for calculating the geometric parameters of the prism of drawing on the dump of the bulldozer] // *Bulletin of the Belarusian-Russian University* 2009. №2 (23): 6-13.

21. Leskovets I.V., Beresov E.I., Smolyar A.P. Vliyanie parametrov profilja otvala bul'dozera na velichiny sil soprotivleniju kopaniyu [The impact of the parameters of the dust of the bulldozer dust over the amount of power to the resistance of digging] // *Bulletin of the Belarusian University*, 2015 2 (47):12-22.

22. Shcherbakov V.S., Goldin V.N. Osnovnye pokazateli gidravlicheskih impul'snyh sistem stroitel'nyh mashin [Main indicators of hydraulic pulse systems of building machines] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2013. 1 (29): 47-51.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

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

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

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

COAUTHORS' CONTRIBUTION

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

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

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сурашов Нургали Толымбекович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Организация перевозок и движений», акад.

Асмагулаев Руслан Борисович – канд. техн. наук, акад. МТА, директор ТОО «НИИПК Каздоринновация».

Толымбек Дамир Нургалевич – канд. техн. наук, доц., директор «Аруна-АИ».

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Ruslan B. Asmatulaev, Cand. of Sci., Head of NIIPK Kazdorinnovatsia limited liability company.

Damir N. Tolymbek, Cand. of Sci., Associate Professor, the Head of Aruna-AI

Научная статья

УДК 629.1.02

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-678-687>

МОДЕЛЬ НЕУПРАВЛЯЕМОГО СДВИГА НА ПРИМЕРЕ СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНОЙ ТЕХНИКИ

И.П. Трояновская, А.О. Жаков

Южно-Уральский государственный университет,

г. Челябинск, Россия

tripav63@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2763-0515>,andrey.zhakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4403-0776>

АННОТАЦИЯ

Введение. Наличие внешних сил на рабочих орудиях тракторных агрегатов и строительно-дорожных машин часто приводит к неуправляемому отклонению от заданной траектории. Такое движение можно представить как сумму управляемого движения и неуправляемого смещения (сдвига). В настоящее время неуправляемое движение мало изучено в силу отсутствия адекватных моделей сдвига (страгивания). Целью является построение модели неуправляемого сдвига под действием внешней силы, позволяющей определить максимальное значение сдвигающей силы в зависимости от ее направления.

Материалы и методы. Математическая модель предельного равновесия была построена на примере бульдозерного агрегата, работающего с перекосом отвала. Входящие в нее силовые факторы взаимодействия движителя с грунтом сформированы на основе математической теории трения. Модель была усовершенствована путем введения различных коэффициентов сцепления в продольном и поперечном направлениях, что позволило учесть анизотропию взаимодействия гусеничного движителя с грунтом.

Результаты. В результате численного эксперимента построен годограф предельной сдвигающей силы. Его анализ показал, что сдвигающая сила равна пределу сцепления в единственном случае поступательного сдвига. Во всех остальных случаях (при мгновенно вращательном сдвиге) значение предельной сдвигающей силы значительно меньше предела сцепления. Учет анизотропных свойств дополнительно снижает значение предельной сдвигающей силы.

Заключение. Годограф позволяет рассчитать значение предельной поперечной силы и оценить возможность неконтролируемого отклонения машины от заданной траектории. Полученная модель впоследствии может быть использована при разработке системы управления работой беспилотной машины с учетом внешнего воздействия со стороны рабочих орудий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: неуправляемый сдвиг, математическая теория трения, анизотропия взаимодействия, контакт движителя с грунтом, предельная сдвигающая сила, дорожно-строительные машины

Статья поступила в редакцию 04.11.2021; одобрена после рецензирования 23.11.2021; принята к публикации 14.12.2021.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Трояновская И.П., Жаков А.О. Модель неуправляемого сдвига на примере строительно-дорожной техники // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 6(82). С. 678-687. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-678-687>

© Трояновская И.П., Жаков А.О., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-678-687>

MODEL OF UNCONTROLLED DISPLACEMENT ON THE EXAMPLE OF ROAD CONSTRUCTION MACHINES

Irina P. Troyanovskaya, Andrey O. Zhakov

South Ural State University, Cheliabinsk, Russia

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

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

ABSTRACT

Introduction. External forces from the working implements of tractor units or road construction machines often lead to uncontrollable displacement from a given trajectory. This movement is the sum of controlled movement and uncontrolled displacement (start of moving). The lack of adequate models of displacement (start of movement) is the reason for the insufficient study of uncontrolled movement at the present time. The goal is to build a model of uncontrolled displacement under the action of an external force, which allows obtaining the maximum value of the external force, depending on its direction.

Materials and methods. The mathematical model of limiting equilibrium is built on the example of a bulldozer unit with a skewed blade. The force factors of the interaction of the mover with the soil included in the model were formed on the basis of the mathematical theory of friction. The model was improved by introducing different coefficients of adhesion in the longitudinal and transverse directions. This made it possible to take into account the anisotropy of the interaction of the propeller with the ground.

Results. The hodograph of the limiting shift force was constructed as a result of a numerical experiment. His analysis showed that the shift force is equal to the adhesion limit only in the case of translational shear. In all other cases (instantaneous rotational shear) the value of the ultimate shift force is less than the adhesion limit. Anisotropy further reduces the value of the limiting external shear force and rotates the hodograph towards the lowest friction coefficient.

Conclusion. The hodograph allows calculating the value of the limiting shear force and assessing the possibility of an uncontrolled deviation of the machine from a given trajectory. The resulting model will subsequently be used to build a control system for the operation of an unmanned vehicle, taking into account the external influence from the working tools.

KEYWORDS: Uncontrolled displacement; Mathematical theory of friction; Anisotropy of interaction; Contact of the propeller with the ground; Ultimate displacement force; Road construction machines.

The article was submitted 04.11.2021; approved after reviewing 23.11.2021; accepted for publication 14.12.2021.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods.

There is no conflict of interest.

For citation: Troyanovskaya I.P., Zhakov A.O. Model of uncontrolled displacement on the example of road construction machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (6): 678-687. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-678-687>

© Troyanovskaya I.P., Zhakov A.O., 2021



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

ВЕДЕНИЕ

Строительно-дорожные машины, в отличие от других типов самоходной техники, характеризуются особым отношением к грунту¹. Для них грунт не только внешняя среда, обеспечивающая взаимодействие движителя с грунтом, но и рабочее тело², свойства которого во многом определяют производительность работы [1, 2]. В отличие от автомобилей и других транспортных машин строительно-дорожные машины взаимодействуют с грунтом не только движителем, но и рабочим орудием. Порой внешние силы со стороны рабочего орудия приводят к неуправляемому сдвигу (смещению) и последующему уводу (отклонению) машины от управляемого движения³. Классическим примером может служить работа автогрейдера⁴ по укладке и расширению дорожного полотна [3]. В этом случае рабочее орудие вынесено вбок, и действующая на него сила сопротивления способна разворачивать машину (Рисунок 1).

Аналогичная ситуация наблюдается при расчистке дорог от снега [4, 5]. За счет неравномерного набора снежной массы результирующая внешняя сила сопротивления смещается ближе к краю отвала. В случае перекоса отвала сила сопротивления, направленная по

нормали к его поверхности, приобретает еще и боковую составляющую, что тоже может дестабилизировать прямолинейное движение машины (Рисунок 2). Для сохранения прямолинейного движения водителю приходится постоянно подправлять машину, что приводит к его повышенной утомляемости.

Неуправляемый сдвиг под действием внешних сил со стороны рабочего орудия наблюдается порой и при работе землеройной техники: например, бульдозеров [6, 7] и автогрейдеров (при перекосе отвала), рыхлителей и корчевателей (при смещении сопротивления на крайний зуб), экскаваторов (при боковом смещении стрелы) и др.

Научная проблема состоит в том, что неуправляемое движение пока мало изучено, несмотря на широкое распространение при работе строительно-дорожных машин и различных тракторных агрегатов. В настоящее время основное внимание уделяется моделированию управляемого движения⁵ [8, 9]. Научные труды [3, 10, 11, 12, 13, 14] по исследованию курсовой устойчивости тракторных агрегатов и строительно-дорожных машин показали, что результирующее движение представляет собой совокупность управляемого движения и неуправляемого отклонения (сдвига) машины под действием внешних сил.



Рисунок 1 – Укладка и расширение дорожных обочин

Figure 1 – Laying and widening of road shoulders

¹ Позин Б.М., Трояновская И.П. Тяговая характеристика трактора (основы теории и расчет). Челябинск. 2016. 84 с.

² Баловнев В.И., Глаголев С.Н., Данилов Р.Г., Кустарев Г.В., Шестопалов К.К., Герасимов М.Д. Машины для земляных работ. Конструкция, расчет, потребительские свойства. В 2 томах. Белгород. 2011.

³ Огай В.А., Довбыш В.О., Медведев Е.В. Увод от управляемого движения строительно-дорожных машин под действием внешних сил // Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства: труды IV Международной научно-технической конференции. 2015. С. 455–457.

⁴ Баловнев В.И., Данилов Р.Г., Кустарев Г.В., Селиверстов Н.Д. Автогрейдеры (Устройство, основы расчета). Москва. 2014. 144 с.

⁵ Носов С.В. Математическое моделирование динамики наземных транспортно-технологических средств при взаимодействии с деформируемым опорным основанием. Липецк. 2016. 164 с.



Рисунок 2 – Расчистка дорог от снега

Figure 2 – Clearing snow from roads

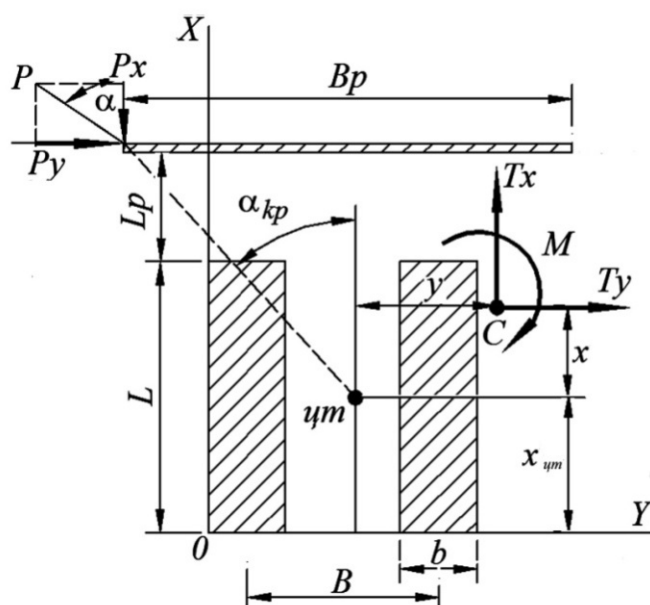


Рисунок 3 – Силовая схема при сдвиге бульдозера

Figure 3 – Force scheme of the bulldozer sliding

Эксперименты [15] доказывают, что пассивный (неуправляемый) сдвиг наблюдался не всегда. Иногда начало скольжения машины по грунту начинается под действием силы, много меньшей предела сцепления.

Цель исследования – построение математической модели неуправляемого сдвига машины для расчета предельного значения внешней сдвигающей силы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Характер неуправляемого сдвига определяется положением линии действия внешней

силы со стороны рабочего орудия относительно центра тяжести машины. В случае, когда сдвигающая сила проходит через этот центр, имеет место поступательный сдвиг. Во всех других случаях сдвиг представляет собой мгновенно вращательное скольжение [16, 17].

Уравнения предельного равновесия

Модель предельного сдвига рассмотрим на примере гусеничного бульдозерного агрегата, когда внешняя сила сопротивления смещена на край отвала (Рисунок 3).

Для момента начала движения можно записать уравнения предельного равновесия [18].

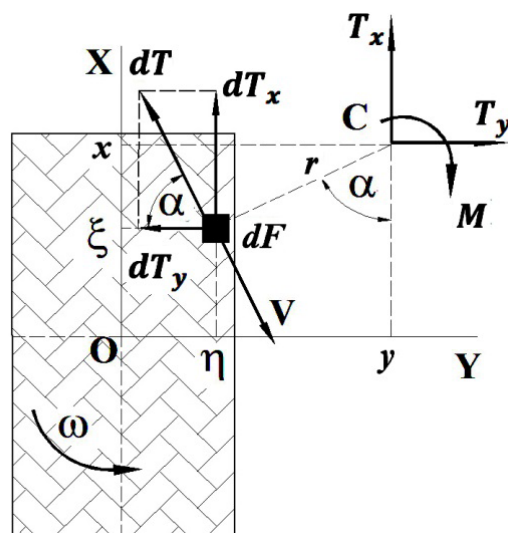


Рисунок 4 – Схема сил в контакте с грунтом при мгновенно вращательном скольжении

Figure 4 – Scheme of forces in contact with the ground for instant rotational sliding

Система уравнений предельного состояния равновесия имеет вид

$$\left. \begin{aligned} T_x - P_x &= 0, \\ T_y + P_y &= 0, \\ M + P_y(L + Lp - x_{um} - x) - P_x(0,5Bp + y) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где T_x, T_y – проекции силы в контакте движителя с грунтом, Н; M – момент в контакте движителя с грунтом, Нм; P_x, P_y – проекции внешней сдвигающей силы со стороны рабочего орудия, Н; $M(P_x), M(P_y)$ – момент внешней силы относительно центра сдвига (точка С) бульдозера, Нм; L, B – продольная база и колея бульдозера, м; Lp – расстояние отвала относительно трактора, м; Bp – ширина отвала, м; y_{um} – продольная координата центра тяжести бульдозера, м; x, y – координаты мгновенного центра сдвига относительно центра тяжести бульдозера, м.

Силовые факторы в контакте движителя с грунтом

В уравнения равновесия (1) кроме внешней силы входят силовые факторы, возникающие в контакте движителя с грунтом. Адекватность любой модели определяется принятыми в ней допущениями. При описании сил в контакте с грунтом были приняты следующие допущения:

– природа сдвига одинакова для колесной и гусеничной машины (различие только в описании площадки контакта);

– контакт движителя с грунтом рассматривается в виде плоских площадок;

– элементарные силы dT в контакте движителя с грунтом представляют собой силы трения;

– формирование сил трения основано на математической теории трения⁶.

При начале скольжения элементарные силы в контакте с грунтом достигают своего предельного по сцеплению значения $dT = \varphi dN$ (где φ – коэффициент трения, dN – элементарное нормальное усилие). Каждая элементарная сила направлена dT противоположно скорости V предполагаемого сдвига, что в случае мгновенно вращательного скольжения перпендикулярно расстоянию каждой точки контакта до мгновенного центра скольжения С (Рисунок 4).

Тогда результирующие силы в контакте движителя с грунтом, приведенные к мгновенному центру скольжения С имеют вид [19, 20]:

$$\left. \begin{aligned} T_x &= \frac{\varphi dN}{dF} \iint \frac{y-\eta}{\sqrt{(y-\eta)^2 + (x-\xi)^2}} dF, \\ T_y &= -\frac{\varphi dN}{dF} \iint \frac{x-\xi}{\sqrt{(y-\eta)^2 + (x-\xi)^2}} dF, \\ M &= \frac{\varphi dN}{dF} \iint \sqrt{(y-\eta)^2 + (x-\xi)^2} dF, \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

⁶ Опейко Ф.А. Mathematical Theory of Friction. Minsk. 1971. 149 p.

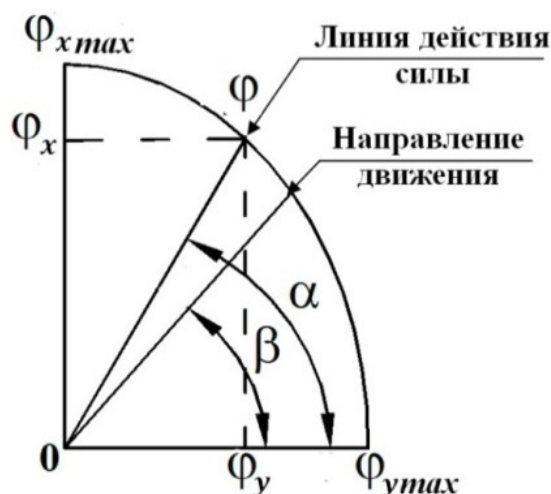


Рисунок 5 – Голограф коэффициента анизотропного трения

Figure 5 – Hodograph of the coefficient of anisotropic friction

где dF – элементарная площадка в контакте с координатами ξ, η , Н; x, y – координаты мгновенного центра скольжения C , м.

Согласно (2), силовые факторы T_x, T_y, M , являются функциями координат x, y мгновенного центра C скольжения, положение которого определяется линией действия внешней силы P . Для каждой линии действия внешней силы P соответствует единственный мгновенный центр скольжения C и единственное предельное значение сдвигающей силы $P_{\max}$ ⁷. [24]:

Влияние анизотропии

Взаимодействие гусеничного движителя с грунтом в продольном и поперечном направлениях отличаются. В продольном направлении начало смещения машины относительно грунта происходит за счет смятия грунта (за счет упругих свойств почвы), а в поперечном направлении – за счет среза (грунтозацепы сразу врезаются в грунт). Анизотропия взаимодействия характеризуется различными коэффициентами сцепления φ_x, φ_y в продольном

и поперечном направлении. При этом направление сдвига (предполагаемого движения) не совпадает с направлением сил в контакте, а отклоняется в сторону наименьшего сцепления⁸ (Рисунок 5).

Учет анизотропных свойств взаимодействия позволил усовершенствовать модель Ф.А. Опейко и силовые факторы (2) приобрели вид [21]:

$$\left. \begin{aligned} T_x &= \frac{dN}{dF} \iint \varphi_x \frac{y-\eta}{\sqrt{(y-\eta)^2 + (x-\xi)^2}} dF, \\ T_y &= -\frac{dN}{dF} \iint \varphi_y \frac{x-\xi}{\sqrt{(y-\eta)^2 + (x-\xi)^2}} dF, \\ M &= \frac{dN}{dF} \iint \frac{\varphi_x(y-\eta)^2 + \varphi_y(x-\xi)^2}{\sqrt{(y-\eta)^2 + (x-\xi)^2}} dF. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Математическая модель предельного сдвига

Поставив силовые факторы (2), (3) в уравнения предельного равновесия (1), получили математическую модель сдвига

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN}{dF} \iint \varphi_x \frac{y-\eta}{\sqrt{(y-\eta)^2 + (x-\xi)^2}} dF - P_x &= 0, \\ -\frac{dN}{dF} \iint \varphi_y \frac{x-\xi}{\sqrt{(y-\eta)^2 + (x-\xi)^2}} dF + P_y &= 0, \\ \frac{dN}{dF} \iint \frac{\varphi_x(y-\eta)^2 + \varphi_y(x-\xi)^2}{\sqrt{(y-\eta)^2 + (x-\xi)^2}} dF + P_y(L + Lp - x_{um} - x) - P_x(0,5Bp + y) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

⁷ Опейко Ф.А. Mathematical Theory of Friction. Minsk. 1971. 149 p.

⁸ Опейко Ф.А. Анизотропное трение // Труды МИМЭСХ. 1948. С.18–22.

В качестве неизвестных выступают координаты мгновенного центра скольжения C и предельное значение внешней сдвигающей силы P . Это позволило при заданной точке приложения внешней силы (край отвала) исследовать весь диапазон возможных ее направлений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе разработанной математической модели (4) был проведен численный эксперимент. В результате построен годограф предельной сдвигающей силы, позволяющий определить значение от угла α ее наклона к продольной оси машины (Рисунок 6).

Максимальное значение сдвигающей силы kH , равное пределу сцепления (где G – вес машины), соответствует направлению поступательного сдвига. При любом отклонении от этого направления значение максимальной сдвигающей силы меньше предела сцепления. Это объясняется наличием кроме результирующей силы дополнительного момента трения. Наименьшее значение сдвигающей силы kH наблюдается в направлении перпендикулярном поступательному сдвигу.

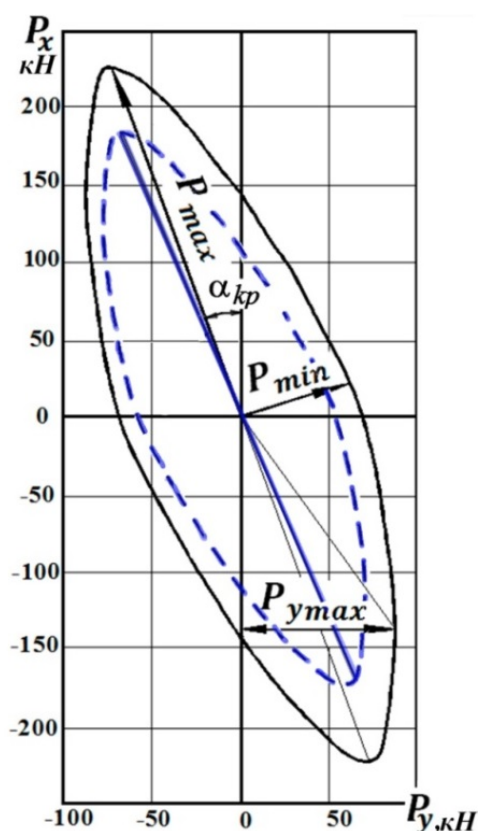


Рисунок 6 – Годограф предельной сдвигающей силы P_{max}

Figure 6 – Hodograph of ultimate shear force P_{max}

Иногда в прикладных задачах необходимо определить составляющую сдвигающего усилия в заданном направлении. Например, максимальные значения продольной (тяговой) или боковой (поперечной) составляющей. Годограф позволяет это сделать. При kH , а к H .

Учет анизотропных свойств взаимодействия движителя с грунтом приводит к дополнительному уменьшению предельной сдвигающей силы и развороту направления поступательного сдвига в сторону наименьшего коэффициента сцепления (штриховая линия на Рисунке 6). Так, при kH и максимальное сдвигающее усилие уменьшается до kH , тяговое усилие kH . Чем больше различие в значениях продольного и поперечного коэффициента сцепления, тем больше разворот годографа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Причиной отклонения от прямолинейного движения строительно-дорожной машины является сдвиг под действием внешней силы со стороны рабочего орудия. Модель неуправляемого сдвига представляет собой систему уравнений предельного равновесия машины. Формирование силовых факторов в контакте движителя с грунтом на основе математической теории трения, что позволило установить взаимосвязь между силой и моментом трения. Новизна модели заключается в расширении области применения математической теории трения, т. е. распространение ее на неуправляемый сдвиг. Совершенствование модели путем введения различных коэффициентов сцепления в продольном и поперечном направлении позволило учесть анизотропные свойства взаимодействия гусеницы с грунтом. Полученная модель впоследствии может быть использована при разработке системы управления работой беспилотной машины с учетом внешнего воздействия со стороны рабочих орудий.

На примере бульдозера Б12, работающего с перекосом отвала, был построен годограф предельной сдвигающей силы. Анализ результатов показал, что сдвигающая сила равна пределу по сцеплению kH только в случае поступательного сдвига, когда линия действия внешней силы проходит через центр масс машин. Во всех остальных случаях сдвиг является мгновенно вращательным и значение предельной сдвигающей силы меньше предела сцепления. Наименьшее значение (kH) наблюдается в направлении, перпендикулярном поступательному сдвигу.

Учет анизотропии приводит к дополнительному снижению предельной сдвигающей силы и смещению направления поступательного сдвига в сторону наименьшего сцепления. Для бульдозерного агрегата весом максимальная сдвигающая сила составила кН (при и , при этом тяговое усилие на гусенице равно кН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мерданов Ш.М., Закирзаков Г.Г., Конев В.В., Половников Е.В., Красиков А.А. Определение показателей эксплуатационных свойств современных строительно-дорожных машин // Фундаментальные исследования. 2016. № 12-2. С. 312–317.
2. Kozbagarov R.A., Taran M.V., Zhussupov K.A., Kanazhanov A.E., Kamzanov N.S., Kochetkov A.V. Increasing the efficiency of motor graders work on the basis of working elements perfection. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. 2021. vol. 1(445), pp. 98-105. doi:10.32014/2021.2518-170X.14
3. Shevchenko V., Chaplyhina O., Pimonov I., Reznikov O., Ponikarovska S. Mathematical model of a motor-grader movement in the process of performing working operations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. vol. 985(1). no. 012009. doi:10.1088/1757-899X/985/1/012009
4. Баловнев В.И., Данилов Р.Г. Снегопогрузчики // Строительные и дорожные машины. 2020. № 1. С. 3–9.
5. Zonta T., Selvanathan J., Patel J., Wilson K., Kaura H., Berry C., Tayefeh M., Barari A. Autonomous snowblower utilizing internet of things for minimal power consumption. In 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON 2021 – Proceedings). 2021. pp. 686-69. doi:10.1109/INDUSCON51756.2021.9529823
6. Савельев А.Г., Михайловская В.А. Максимально возможные нагрузки, действующие на отвал бульдозера при принятых расчетных положениях // Техника и технология транспорта. 2019. № 5(13). 41 с.
7. Kaukarov A., Kokodeeva N., Kochetkov A., Yankovsky L., Chelpano I. Capture of Large Objects by the Earthmoving Machine's Implement During Operation on Motor and Toting Roads. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. vol. 1116 AISC, pp. 285-295. doi:10.1007/978-3-030-37919-3_28
8. Du J., Zhou H., Jin X. Vehicle motion simulation method in urban traffic scene. Lecture notes in computer science (including subseries lecture notes in artificial intelligence and lecture notes in bioinformatics). 2020. vol. 12341 LNCS, pp. 312-321. doi:10.1007/978-3-030-60816-3_34
9. Kotiev G., Padalkin B., Miroshnichenko A., Stadukhin A., Kositsyn B. A Theoretical study on the high-speed electric tracked vehicle mobility. IOP Conference series: Materials science and engineering. 2019. vol. 820(1). no. 012012. doi:10.1088/1757-899X/820/1/012012

10. Keller A., Aliukov S., Anchukov V. Studies of stability and control of movement of multipurpose vehicle. Lecture notes in engineering and computer science. 2017. vol. 2230, pp. 815-820.

11. Игнатов С.Д., Портнова А.А. Способы решения проблемы управляемости дорожных машин // Архитектура. Строительство. Транспорт. Технологии. Инновации: материалы Международного конгресса СибАДИ. 2013. С. 51–57.

12. Ермаков Б.Е. Боковой увод двухзвенного транспортера при его движении по криволинейной траектории // Механизация строительства. 2012. № 2 (812). С. 27–31

13. Сергеев Н.В., Сенькевич С.Е., Чичиль Р.А. Курсовая устойчивость агрегата // Вестник ВИАХС. 2017. № 1. С. 61–66.

14. Stroganov Yu.N., Lukashuk O.A., Akulova A.A. Movement stability of tractor unit. ACM International Conference Proceeding Series. 2018. Part F137690. pp. 117-120. doi:10.1145/3191477.3191501

15. Андреева Е.В. Экспериментальные исследования пассивного поворота гусеничной машины при страгивании // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. 2005. № 3. 613 с.

16. Troyanovskaya I.P., Zhakov A.O., Starunova I.N. Mathematical model of passive withdrawal of a tractor unit. IOP Conference series: Earth and environmental Science. 2021. vol. 659(1), no. 012081. doi:10.1088/1755-1315/659/1/012081

17. Андреева Е.В. Пассивный поворот гусеничной машины (задача страгивания) // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. 2005. № 3. 611 с.

18. Казаченко Г.В., Басалай Г.А., Тройнич В.А. Уравнения равновесия при уводе гусеничной машины и их исследование // Горная механика и машиностроение. 2020. № 1. С. 17–22.

19. Вязников М.В. Использование теории комбинированного трения при составлении математической модели криволинейного движения гусеничных машин // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 12. С. 279–290. doi: 10.7463/0815.9328000

20. Troyanovskaya I., Ulanov A., Zhakov A., Voinash S. Friction forces at the wheel's contact with the ground in a turning vehicle, Tribology in industry. 2019. vol. 41, no. 2. pp. 166-171. doi:10.24874/ti.2019.41.02.03

21. Жаков А.О., Трояновская И.П. Влияние анизотропии на взаимодействие гусеничного движителя с грунтом при повороте машины // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 2. С. 43–49. doi:10.31992/0321-4443-2020-2-43-49

REFERENCES

1. Merdanov Sh.M., Zakirzakov G.G., Konev V.V., Polovnikov E.V., Krasikov A.A. Opredeleniye pokazateley ekspluatatsionnykh svoystv sovremennykh stroitel'no-dorozhnykh mashin [Definition of indicators performance characteristics of modern building and

road machines] *Basic research*. 2016. 12(2): 312-317. (in Russian)

2. Kozbagarov R.A., Taran M.V., Zhussupov K.A., Kanazhanov A.E., Kamzanov N.S., Kochetkov A.V. Increasing the efficiency of motor graders work on the basis of working elements perfection. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2021. 1(445): 98-105. doi:10.32014/2021.2518-170X.14

3. Shevchenko V., Chaplyhina O., Pimonov I., Reznikov O., Ponikarovska S. Mathematical model of a motor-grader movement in the process of performing working operations // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 985(1): 012009. doi:10.1088/1757-899X/985/1/012009

4. Balovnev V.I., Danilov R.G. Snegopogruzchiki [Snow loaders] *Construction and road machines*. 2020. 1: 3-9. (in Russian)

5. Zonta T., Selvanathan J., Patel J., Wilson K. Kaura H., Berry C, Tayefeh M., Barari A. Autonomous snowblower utilizing internet of things for minimal power consumption. In 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON 2021 – Proceedings). 2021: 686-69. doi:10.1109/INDUSCON51756.2021.9529823

6. Savelyev A.G., Mikhaylovskaya V.A. Maximum possible loads acting on the blade bulldozer under the assumed settlement provisions. [Maksimal'no vozmozhnyye nagruzki, deystvuyushchiye na otval bul'dozera pri prinyatykh raschetnykh polozheniyakh] *Wheeled and tracked vehicle technology*. 2019. 5(13): 41. (in Russian)

7. Kaukarov A., Kokodeeva N., Kochetkov A., Yankovsky L., Chelpano I. Capture of Large Objects by the Earthmoving Machine's Implement During Operation on Motor and Toting Roads. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. 1116 AISC, pp. 285-295. doi:10.1007/978-3-030-37919-3_28

8. Du J., Zhou H., Jin X. Vehicle motion simulation method in urban traffic scene. *Lecture notes in computer science (including subseries lecture notes in artificial intelligence and lecture notes in bioinformatics)*. 2020. 12341 LNCS: 312-321. doi:10.1007/978-3-030-60816-3_34

9. Kotiev G., Padalkin B., Miroshnichenko A., Stadukhin A., Kositsyn B. A Theoretical study on the high-speed electric tracked vehicle mobility. *IOP Conference series: Materials science and engineering*. 2019. 820(1): 012012. doi:10.1088/1757-899X/820/1/012012

10. Keller A., Aliukov S., Anchukov V. Studies of stability and control of movement of multipurpose vehicle. *Lecture notes in engineering and computer science*. 2017. 2230: 815-820.

11. Ignatov S.D., Portnova A.A. Sposoby resheniya problemy upravlyayemosti dorozhnykh mashin [Methods for solving the problem of control of road ve-

hicles]. *Materials of the international congress SibADI: Architecture. Building. Transport. Technologies. Innovations*. 2013: 51-57. (in Russian)

12. Ermakov B.E. Bokovoy uvod dvukhzvennogo transportera pri yego dvizhenii po krivolineynoy trayektorii [Lateral withdrawal of the two-link transporter at its movement on curvilinear trajectory]. *Mechanization of construction*. 2012, 2(812): 27-31. (in Russian)

13. Sergeev N.V., Senkevich S.E., Chichil R.A. Heading stability of the unit. [Kursovaya ustoychivost' agregata] *Bulletin of the all-Russian scientific research institute of agricultural electrification*. 2017. 1: 61-66. (in Russian)

14. Stroganov Yu.N., Lukashuk O.A., Akulova A.A. Movement stability of tractor unit. *ACM International Conference Proceeding Series*. 2018. Part F137690: 117-120. doi:10.1145/3191477.3191501

15. Andreeva E.V. Jeksperimental'nye issledovaniya passivnogo povorota gusenichnoy mashiny pri stragivaniy // *Inzhenerno-tehnicheskoe obespechenie APK. Referativnyy zhurnal*. 2005. 3: 613.

16. Troyanovskaya I.P., Zhakov A.O., Starunova I.N. Mathematical model of passive withdrawal of a tractor unit. *IOP Conference series: Earth and environmental Science*. 2021. 659(1): 012081. doi:10.1088/1755-1315/659/1/012081

17. Andreeva E.V. Eksperimental'nyye issledovaniya passivnogo povorota gusenichnoy mashiny pri stragivaniy [Experimental studies of passive rotation caterpillar with breakaway]. *Engineering and technical support of the agro-industrial complex. Abstract journal*. 2005. 3: 613. (in Russian)

18. Kazachenko G.V., Basalai R.A., Troinich V.A. Uravneniya ravnovesiya pri uvode gusenichnoy mashiny i ikh issledovaniye [Equations of equilibrium at slipping a track machine and their study]. *Mining mechanics and mechanical engineering*. 2020. 1: 17-22. (in Russian)

19. Vyaznikov M.V. Using the theory of combined friction when making mathematical models of curvilinear motion of tracked vehicles. [Ispol'zovaniye teorii kombinirovannogo treniya pri sostavlenii matematicheskoy modeli krivolineynogo dvizheniya gusenichnykh mashin] *Science and education of the Bauman MSTU*. 2014. 12: 279-290. doi: 10.7463/0815.9328000 (in Russian)

20. Troyanovskaya I., Ulanov A., Zhakov A., Voynash S. Friction forces at the wheel's contact with the ground in a turning vehicle, *Tribology in industry*. 2019. 41(2): 166-171. doi:10.24874/ti.2019.41.02.03

21. Zhakov A.O., Troyanovskaya I.P. The effect of anisotropy on the interaction of the caterpillar propeller with the soil during the vehicle turn. [Vliyaniye anizotropii na vzaimodeystviye gusenichnogo dvizhitel'ya s gruntom pri povorote mashiny] *Tractors and agricultural machines*. 2020. 2: 43-49. doi:10.31992/0321-4443-2020-2-43-49 (in Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Трояновская И.П. – 50%.
Жаков А.О. – 50%.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Irina P. Troyanovskaya – 50%.
Andrey O. Zhakov – 50%.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Irina P Troyanovskaya, Dr. of Sci., Professor, the
Wheeled and Tracked Vehicles Department.

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

Научная статья

УДК 621.879.064

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-688-698>

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОПАНИЯ ГРУНТА СФЕРИЧЕСКИМ КОВШОМ ЭКСКАВАТОРА

Г.Г. Бурый*Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия**buryy1989@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5008-9176>*

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье приведена новая конструкция ковша одноковшового гидравлического экскаватора, позволяющая увеличить производительность данных машин. Увеличение производительности достигается за счет установки ковшей большего объема без изменения характеристик гидропривода. Целью представленной работы является подбор объема сферического ковша для осуществления процесса копания. Задачей исследований является получение зависимостей скоростей ковша и грунта от параметров процесса копания. Подбор объема сферического ковша позволит определить, насколько он может быть увеличен по сравнению с объемом серийного ковша для осуществления процесса копания.

Материалы и методы. Процесс копания новым ковшом был рассмотрен в виде двухмассовой реологической модели Кельвина–Фойгта. Данная модель была описана системой дифференциальных уравнений второго порядка. В системе решалась задача Коши, что позволило определить общее решение уравнения, удовлетворяющего двум уравнениям системы. В итоге были определены производные от перемещений ковша и грунта, которые есть не что иное, как скорости ковша и грунта.

Результаты. Решение приведенной системы позволило получить зависимости скоростей ковша и масс грунта от параметров процесса копания. Осуществление процесса копания возможно при положительных значениях скоростей. При подстановке в зависимости параметров процесса при условии положительности скоростей можно определить объем сферического ковша.

Практическое значение. Для упрощения и применения на практике полученных зависимостей был составлен алгоритм для расчета объема сферического ковша. Представленный алгоритм может быть реализован в программе для ЭВМ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: математическая модель, грунт, копание, экскаватор, ковш, дифференциальные уравнения, сила сопротивления копанию, сила гидроцилиндра, масса грунта, объема ковша

БЛАГОДАРНОСТЬ. Автор выражает благодарность рецензентам данной работы.

Статья поступила в редакцию 28.10.2021; одобрена после рецензирования 15.11.2021; принята к публикации 14.12.2021.

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: Бурый Г.Г. Математическая модель копания грунта сферическим ковшом экскаватора // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 6(82). С. 688-698. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-688-698>

© Бурый Г.Г., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-688-698>

MATHEMATICAL MODEL OF SOIL DIGGING SPHERICAL EXCAVATOR BUCKET

Grigoriy G. Buriy

Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia
buryy1989@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5008-9176>

ABSTRACT

Introduction. The article presents a new design of a bucket of a single bucket hydraulic excavator, which allows you to increase the performance of these machines. Increased efficiency is achieved due to the installation of buckets of larger volume without changing characteristics of hydraulic drive. The purpose of the presented work is to select the volume of the spherical ladle for the digging process. The task of research is to obtain the dependencies of ladle and soil speeds on the parameters of the digging process. Selecting the volume of the spherical ladle will determine how much it can be increased compared to the volume of the serial ladle to carry out the digging process.

Materials and methods. The process of digging a new bucket was considered in the form of a two-scale Kelvin-Voigt rheology model. This model was described by a system of second-order differential equations. The system solved the Cauchy problem, which made it possible to determine the general solution of the equation satisfying the two equations of the system. As a result, derivatives from ladle and soil movements were determined, which are nothing more than ladle and soil speeds.

Results. The solution of the above system made it possible to obtain dependencies of ladle speeds and soil masses on parameters of the digging process. The digging process is possible at positive speed values. When substituting depending on the process parameters under the condition of velocity positivity, you can determine the volume of the spherical ladle.

Practical significance. To simplify and put into practice the obtained dependencies, an algorithm was compiled to calculate the volume of the spherical ladle. The presented algorithm can be implemented in a computer program.

KEYWORDS: mathematical model, soil, digging, excavator, ladle, differential equations, force of resistance to digging, force of hydraulic cylinder, mass of soil, volume bucket.

The article was submitted 28.10.2021; approved after reviewing 15.11.2021; accepted for publication 14.12.2021.

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: Buriy G. G. Mathematical model of soil digging spherical excavator bucket . The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2021; 18 (6): 688-698. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-688-698>

© Buriy G.G., 2021



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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Рассмотрена конструкция нового ковша одноковшового гидравлического экскаватора. Приведено ее преимущество по сравнению с серийной версией.

2. Рассмотрена схема и модель процесса копания грунта новым ковшом.

3. Приведено решение модели процесса копания, представленное в виде системы дифференциальных уравнений второго порядка. Результатом решения стали зависимости скоростей ковша и грунта от параметров процесса.

4. Представлен алгоритм подбора объема нового ковша в соответствии с параметрами процесса копания.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка грунта на сегодняшний день является востребованной операцией в сфере строительства и эксплуатации инженерных сооружений, а также при добыче полезных ископаемых. Основной машиной для проведения данной операции является одноковшовый гидравлический экскаватор. Для выполнения соответствующих операций, будь то строительство здания или разработка карьера, используется определенное количество данных машин. Количество используемых одноковшовых гидравлических экскаваторов напрямую зависит от производительности данных машин, которая зависит от объема ковша. Для возможности установки на экскаватор ковша

большого объема была разработана его новая конструкция, названная «сферической» по форме конструкции. Целью представленной работы является подбор объема сферического ковша для осуществления процесса копания. Объектом исследования в работе является процесс копания грунта сферическим ковшом. Предметом исследования в работе является математическое описание процесса копания грунта сферическим ковшом. Задачей исследований является получение зависимостей скоростей ковша и грунта от параметров процесса копания.

Рассмотрим конструкцию сферического ковша (рисунок 1).

Ось поворота ковша крепится к рукояти, сама же сферическая конструкция поворачивается вокруг оси гидроцилиндром поворота ковша. Траектория движения сферической конструкции позволяет снизить значение силы сопротивления копанию по сравнению с силой сопротивления, действующей на ковши стандартных конструкций. Снижение сил сопротивления копанию позволит использовать ковши большего объема при неизменных характеристиках гидропривода, что приведет к изъятию большего объема грунта за цикл работы экскаватора. Для подтверждения гипотезы о сокращении сил сопротивления копанию грунта сферическим ковшом необходимо математическое исследование данного процесса, итогом которого должна стать зависимость скорости копания грунта сферическим ковшом от известных параметров [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

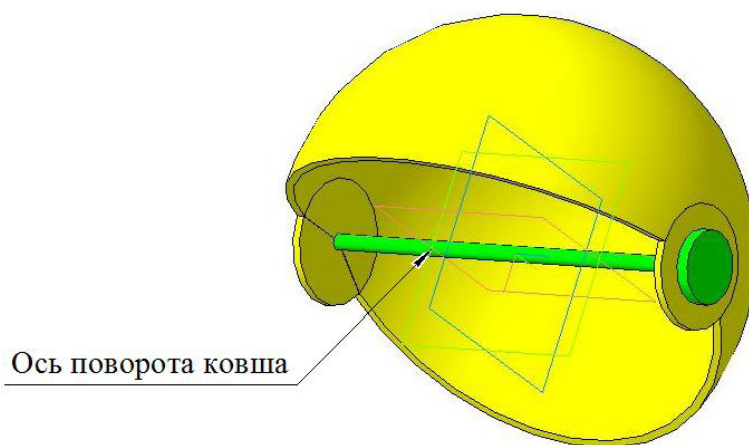


Рисунок 1 – Ковш сферической формы

Figure 1 – Spherical bucket

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Рассмотрим в разрезе расчётную схему процесса внедрения сферического ковша в грунт, представленную на рисунке 2.

На рисунке 2 приведены обозначения следующих параметров: m_1 – масса сферического ковша, кг; m_2 – масса грунта, перемещающегося перед кромкой ковша, кг; m_3 – масса грунта, перемещающегося за счет сил трения, кг; F_1 – сила гидроцилиндра поворота ковша, Н; F_2 – сила сопротивления грунта массой m_2 , Н; F_3 – сила сопротивления грунта массой m_3 , Н; h_3 – толщина массы грунта m_3 , м; R – внутренний радиус ковша, м; B – толщина стенки ковша, м; φ – угол поворота ковша, рад.

Массу грунта m_3 можно определить по формуле

$$m_3 = \rho \cdot \varphi \cdot 0,67 \cdot (2h_3^3 + 6R^2h_3 + 3B^2h_3 + 3Bh_3^2 + 6RBh_3), \quad (1)$$

где ρ – плотность грунта, кг/м³; φ – угол поворота ковша, рад; R – внутренний радиус ковша, м; h_3 – толщина бокового грунта, м; B – толщина стенки ковша, м.

Объем нового ковша определим по формуле

$$V = 2,1 \cdot R^3. \quad (2)$$

Процесс копания на рисунке 2 представляет собой вовлечение в движение с ковшом масс грунта m_2 , m_3 , определение которых будет являться задачей дальнейших исследований. Изучение силы F_2 планируется в последующих исследованиях, сила F_2 постоянна. Сила F_3 – параметр, изменяющийся во времени, изучение которого планируется в последующих исследованиях. Сила гидроцилиндра поворота ковша F_1 затрачивается на преодоление силы F_3 сопротивления грунта массой m_3 , силы F_2 сопротивления грунта массой m_2 [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17].

При составлении расчетной схемы, показанной на рисунке 2, были приняты следующие допущения:

- 1) массы $m_1 + m_2$, m_3 являются элементами с сосредоточенными параметрами;
- 2) ковш внедряется в горизонтальную поверхность грунта;
- 3) максимальная толщина копания равна R ;
- 4) масса $m_1 + m_2$ принимается как абсолютно жесткое тело;
- 5) силы F_1 и F_2 неизменны на протяжении процесса внедрения;
- 6) масса $m_1 + m_2$ неизменна на протяжении процесса внедрения;

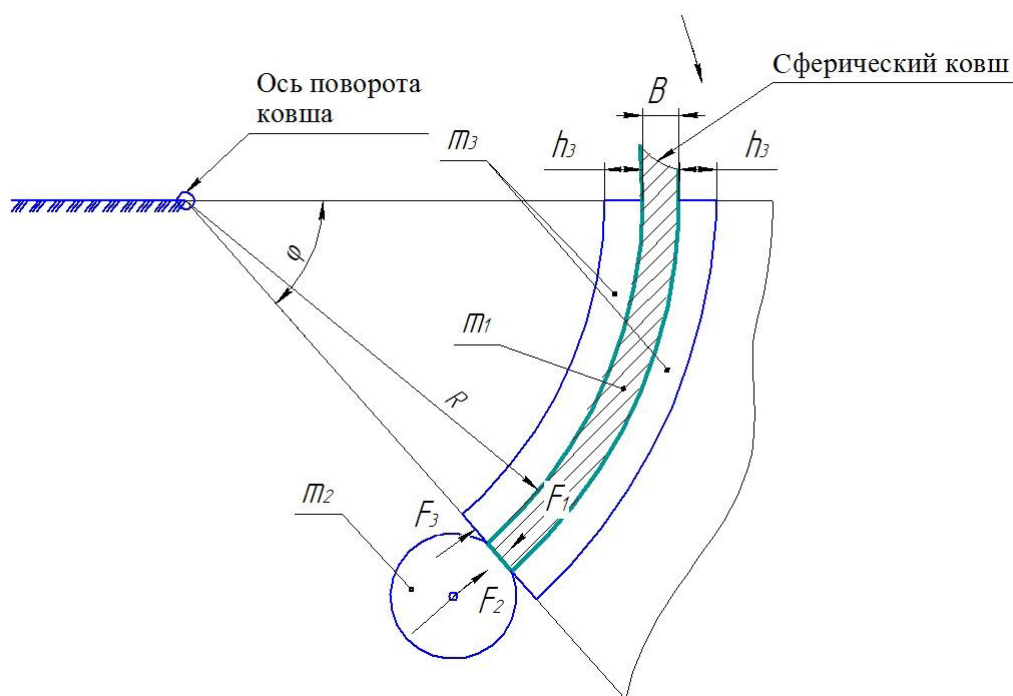


Рисунок 2 – Расчётная схема процесса копания грунта сферическим ковшом

Figure 2 – Calculation diagram of soil digging process by spherical bucket

7) масса грунта m_3 представляется упруго-вязкой однородно-сжимаемой средой.

Математическое описание процесса внедрения ковша в грунт рассмотрим в виде реологической модели Кельвина–Фойгта, представленной на рисунке 3.

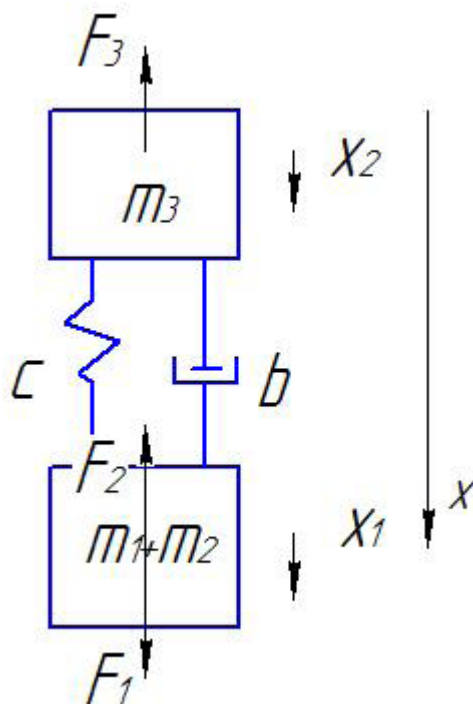


Рисунок 3 – Реологическая модель процесса внедрения ковша в грунт

Figure 3 – Rheological model of ladle introduction into soil

На рисунке 3, помимо масс m_1+m_2 и m_3 , представлены следующие обозначения: x_1 – перемещения грунта массой m_1+m_2 , м; x_2 – перемещения грунта массой m_3 , м; b – коэффициент вязкого трения грунта, Н·с/м; c – коэффициент жесткости грунта, Н/м; t – время, с.

Опишем системой уравнений (3) и (4) процесс копания грунта сферическим ковшом¹ [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25]:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2) \cdot \ddot{x}_1 + b \cdot \left(\dot{x}_1 - \dot{x}_2 \right) + c \cdot (x_1 - x_2) = F_1 - F_2 & (3) \end{cases}$$

$$\begin{cases} m_3 \cdot \ddot{x}_2 + b \cdot \left(\dot{x}_2 - \dot{x}_1 \right) + c \cdot (x_2 - x_1) = -F_3 & (4) \end{cases}$$

Сложим левые и правые части уравнений (3) и (4) и определим $\ddot{x}_1$:

$$\ddot{x}_1 = \frac{-m_3 \cdot \ddot{x}_2 + F_1 - F_2 - F_3}{(m_1 + m_2)} \quad (5)$$

Проинтегрируем выражение (5) по времени t и получим выражения (6) и (7):

¹ Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем/ В.П. Тарасик. Мн.: Дизайн ПРО, 2004. 640 с.

$$\dot{x}_1 = \frac{-m_3 \cdot \ddot{x}_2 + F_1 \cdot t - F_2 \cdot t - F_3 \cdot t + C_1}{(m_1 + m_2)}; \quad (6)$$

$$x_1 = \frac{-m_3 \cdot x_2 + 0,5 \cdot F_1 \cdot t^2 - 0,5 \cdot F_2 \cdot t^2 - 0,5 \cdot F_3 \cdot t^2 + C_1 \cdot t + C_2}{(m_1 + m_2)}. \quad (7)$$

Подставляя в выражения (6) и (7) начальные условия при $t=0$, $x_1(0) = 0$, $x_2(0) = 0$, $\dot{x}_1(0) = 0$, $\dot{x}_2(0) = 0$, получим, что $C_1=0$, $C_2=0$.

Подставим выражения (5), (6) и (7) в уравнение (3), получим

$$\begin{aligned} & -m_3 \cdot \ddot{x}_2 - F_3 + b \cdot \left(-\frac{m_3 \cdot \dot{x}_2}{(m_1 + m_2)} - \dot{x}_2 \right) + b \cdot \left(\frac{F_1 \cdot t - F_2 \cdot t - F_3 \cdot t + C_1}{(m_1 + m_2)} \right) + \\ & + c \cdot \left(\frac{-m_3 \cdot x_2}{(m_1 + m_2)} - x_2 \right) + \\ & + c \cdot \left(\frac{0,5 \cdot F_1 \cdot t^2 - 0,5 \cdot F_2 \cdot t^2 - 0,5 \cdot F_3 \cdot t^2 + C_1 \cdot t + C_2}{(m_1 + m_2)} \right) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & -m_3 \cdot \ddot{x}_2 - b \cdot \dot{x}_2 \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) - c \cdot x_2 \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) \\ & = -b \cdot \left(\frac{F_1 \cdot t - F_2 \cdot t - F_3 \cdot t + C_1}{(m_1 + m_2)} \right) - c \cdot \left(\frac{0,5 \cdot F_1 \cdot t^2 - 0,5 \cdot F_2 \cdot t^2 - 0,5 \cdot F_3 \cdot t^2 + C_1 \cdot t + C_2}{(m_1 + m_2)} \right) + F_3. \end{aligned} \quad (9)$$

Полное решение уравнения (9) будет складываться из общего решения x_2^0 , описывающего свободные колебания системы и частного решения x_2^* , которое описывает вынужденные колебания системы.

Определим общее решение для однородного уравнения

$$-m_3 \cdot \ddot{x}_2 - b \cdot \dot{x}_2 \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) - c \cdot x_2 \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) = 0. \quad (10)$$

Приведем уравнение (10) к характеристическому виду где z корень уравнения

$$A \cdot z^2 + B \cdot z + C = 0; \quad (11)$$

$$A = -m_3; \quad (12)$$

$$B = -b \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right); \quad (13)$$

$$C = -c \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right). \quad (14)$$

Получим следующие корни уравнения (11):

$$z_1 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}; \quad (15)$$

$$z_2 = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}. \quad (16)$$

Общее решение уравнения (9) запишем в виде

$$x_2^0 = U_1 \cdot e^{z_1 \cdot t} + U_2 \cdot e^{z_2 \cdot t}. \quad (17)$$

Для определения постоянных U_1 и U_2 продифференцируем выражение (17):

$$\dot{x}_2^0 = z_1 \cdot U_1 \cdot e^{z_1 \cdot t} + z_2 \cdot U_2 \cdot e^{z_2 \cdot t}. \quad (18)$$

Подставим в выражения (17) и (18) начальные условия $x_2(0) = 0$; $\dot{x}_2(0) = 0$ таким образом, получим что $U_1 = 0$, $U_2 = 0$. Таким образом, общее решение уравнения (9) равно 0.

Подберем частное решение уравнения (9) и запишем его в виде выражения (19) с коэффициентами M , N и L :

$$x_2^* = Mt^2 + Nt + L. \quad (19)$$

Найдем производные выражения (19):

$$\dot{x}_2 = 2Mt + N; \quad (20)$$

$$\ddot{x}_2 = 2M. \quad (21)$$

Подставим выражения (19), (20) и (21) в уравнение (9) и получим

$$\begin{aligned} & -m_3 \cdot 2M - b \cdot 2Mt \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) - b \cdot N \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) - \\ & - c \cdot Mt^2 \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) - \\ & - c \cdot Nt \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) - c \cdot L \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) \\ & = -b \cdot \left(\frac{F_1 \cdot t - F_2 \cdot t - F_3 \cdot t + C_1}{(m_1 + m_2)} \right) - \\ & - c \cdot \left(\frac{0,5 \cdot F_1 \cdot t^2 - 0,5 \cdot F_2 \cdot t^2 - 0,5 \cdot F_3 \cdot t^2 + C_1 \cdot t + C_2}{(m_1 + m_2)} \right) + F_3 \end{aligned} \quad (22)$$

Преобразуем уравнение (22):

$$\begin{aligned}
 & -c \cdot M \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) \cdot t^2 - (2b \cdot M + c \cdot N) \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) \cdot t - \\
 & - m_3 \cdot 2M - c \cdot L \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) - b \cdot N \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) \\
 & = - \frac{0,5 \cdot c \cdot (F_1 - F_2 - F_3)}{m_1 + m_2} \cdot t^2 - \frac{(b \cdot (F_1 - F_2 + F_3) + c \cdot C_1)}{m_1 + m_2} \cdot t - \frac{(b \cdot C_1 + c \cdot C_2)}{m_1 + m_2} + F_3
 \end{aligned} \quad (23)$$

Неизвестные коэффициенты M, N и L удовлетворяют системе уравнений

$$\left\{ \begin{aligned} -c \cdot M \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) &= - \frac{0,5 \cdot c \cdot (F_1 - F_2 - F_3)}{m_1 + m_2} \end{aligned} \right. \quad (24)$$

$$\left\{ \begin{aligned} - (2b \cdot M + c \cdot N) \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) &= - \frac{(b \cdot (F_1 - F_2 + F_3) + c \cdot C_1)}{m_1 + m_2} \end{aligned} \right. \quad (25)$$

$$\left\{ \begin{aligned} - m_3 \cdot 2M - c \cdot L \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) - b \cdot N \cdot \left(\frac{m_3 + m_1 + m_2}{(m_1 + m_2)} \right) &= - \frac{(b \cdot C_1 + c \cdot C_2)}{m_1 + m_2} + F_3 \end{aligned} \right. \quad (26)$$

Из уравнения (24) определим M:

$$M = \frac{0,5 \cdot (F_1 - F_2 - F_3)}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (27)$$

Подставим выражение (27) в уравнение (25) и определим N:

$$N = \frac{C_1}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (28)$$

Подставим выражения (27) и (28) в уравнение (26) и определим L:

$$L = \frac{C_2}{m_1 + m_2 + m_3} - \frac{F_3 \cdot (m_1 + m_2)}{c \cdot (m_1 + m_2 + m_3)} - \frac{m_3 \cdot (F_1 - F_2 - F_3) \cdot (m_1 + m_2)}{c \cdot (m_1 + m_2 + m_3)^2} \quad (29)$$

Таким образом, частное решение уравнения (9) запишем в виде

$$\begin{aligned}
 x_2^* &= \frac{0,5 \cdot (F_1 - F_2 - F_3)}{m_1 + m_2 + m_3} t^2 + \frac{C_1}{m_1 + m_2 + m_3} t + \frac{C_2}{m_1 + m_2 + m_3} - \\
 & - \frac{F_3 \cdot (m_1 + m_2)}{c \cdot (m_1 + m_2 + m_3)} - \frac{m_3 \cdot (F_1 - F_2 - F_3) \cdot (m_1 + m_2)}{c \cdot (m_1 + m_2 + m_3)^2}
 \end{aligned} \quad (30)$$

Запишем полное решение уравнения (9)

$$x_2 = \frac{0,5 \cdot (F_1 - F_2 - F_3)}{m_1 + m_2 + m_3} t^2 - \frac{F_3 \cdot (m_1 + m_2)}{c \cdot (m_1 + m_2 + m_3)} - \frac{m_3 \cdot (F_1 - F_2 - F_3) \cdot (m_1 + m_2)}{c \cdot (m_1 + m_2 + m_3)^2} \quad (31)$$

Чтобы найти скорость массы грунта m_3 , продифференцируем выражение (31) по времени

$$\dot{x}_2 = \frac{F_1 - F_2 - F_3}{m_1 + m_2 + m_3} \cdot t \quad (32)$$

Подставляя выражение (32) в выражение (6), получим скорость масс $m_1 + m_2$:

$$\dot{x}_1 = \frac{(1 - m_3) \cdot (F_1 - F_2 - F_3) \cdot t}{(m_1 + m_2) \cdot (m_1 + m_2 + m_3)} \quad (32)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные зависимости (32) и (33) можно применить для определения объема V нового ковша при реализации процесса копания сферическим ковшом. Блок-схема алгоритма определения объема V представлена на рисунке 4.

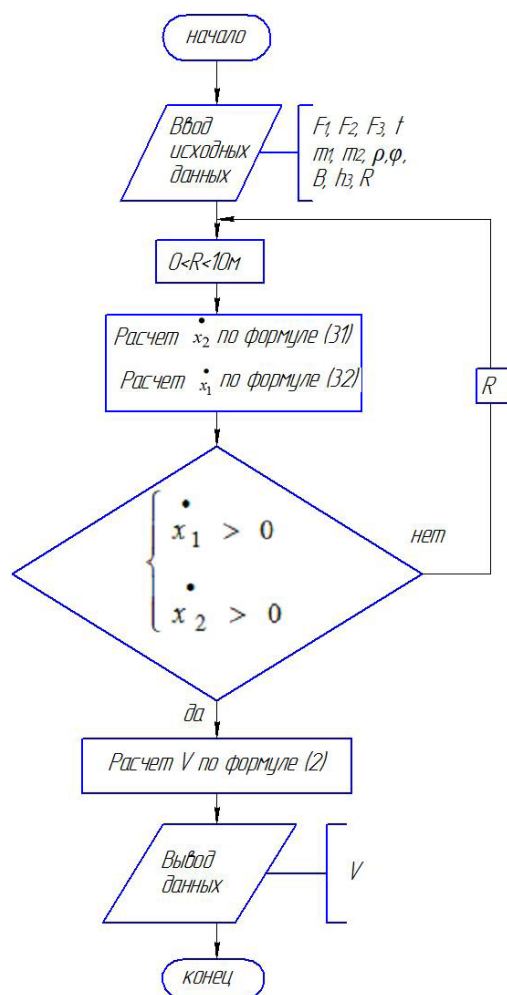


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма определения объема V

Figure 4 – Flowchart for volume determination V

Суть работы с алгоритмом, блок-схема которого представлена на рисунке 4, заключается в следующем: задаются исходные данные, в том числе и радиус ковша R , по которым

рассчитываются значения скоростей $\dot{x}_1$ и $\dot{x}_2$. Затем при соблюдении условий положитель-

ных значений $\dot{x}_1$ и $\dot{x}_2$ правильно подобранный радиус R подставляется в формулу для определения объема нового ковша V . Если условия не выполнены, тогда в формулы подставляется другое значение R из диапазона от 0 до 10 м, до тех пор пока условия не будут выполнены и не будет подобран радиус R . При невыполнении условий расчет проводится повторно, до тех пор пока условия не будут выполнены. Данный алгоритм для практического применения может быть реализован в программе для ЭВМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в работе алгоритм расчета оптимального объема сферического ковша может быть использован на практике следующим образом. В организации присутствует экскаватор с серийным ковшом. Изначально известна сила F_1 , создаваемая гидроцилиндром поворота ковша, а также другие параметры процесса. Определение некоторых из них планируется в дальнейших исследованиях, а именно F_2 , F_3 , m_2 , h_3 . Принимается фиксированная толщина B ковша, значение его радиуса R , по которым рассчитывается его масса m_1 . Плотность грунта ρ принимается для наиболее тяжело разрабатываемого грунта. Угол поворота ковша ϕ принимается менее 90° , так как именно при таких его значениях силы сопротивления копанию максимальны. Алгоритм позволит подобрать объем сферического ковша, который будет больше, чем у серийного ковша. Сферический ковш с рассчитанным объемом можно будет установить на рассматриваемый экскаватор, что повысит производительность машины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лукашук О.А. Закономерности формирования режимных параметров главных механизмов карьерного экскаватора в процессе экскавации горных пород // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 3 (143). С. 14–17.
2. Баловнев В.И., Данилов Р.Г., Улитич О.Ю. Исследование управляемых ножевых систем землеройно-транспортных машин // Строительные и дорожные машины. 2017. № 2. С. 12–15.

3. Kujundžić T. Influence of crushed rock properties on the productivity of a hydraulic excavator/ Kujundžić T., Klanfar M., Korman T., Briševac Z.// *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021. T. 11. №5. С. 1-15.
4. Choudhary B.S. Effect of blast induced rock fragmentation and muckpile angle on excavator performance in surface mines//*Mining of Mineral Deposits*. 2019. T. 13. №3. С. 119-126.
5. Niskanen I. 4D modeling of soil surface during excavation using a solid-state 2D profilometer mounted on the arm of an excavator/ Niskanen I., Immonen M., Makkonen T., Tyni P., Hiltunen M., Kolli T., Heikkilä R., Keränen P., Hallman L., Kostamovaara J., Louhisalmi Y. 2020. T. 112. С. 103-112.
6. Xu G. High-gain observer-based sliding mode control for hydraulic excavators/ Xu G., Yu Z., Lu N., Lyu G.// *Harbin Gongcheng Daxue Xuebao*. 2021. T. 42. №6. С. 885-892.
7. Yu Y. Energy saving of hybrid hydraulic excavator with innovative powertrain/ Yu Y., Do T.C., Park Y., Ahn K.K.// *Energy Conversion and Management*. 2021. T. 244.
8. Dao H.V. High accuracy contouring control of an excavator for surface flattening tasks based on extended state observer and task coordinate frame approach/ Dao H.V., Nguyen D.G., Ahn K.K., Na S.// *Automation in Construction*. 2021. T. 130.
9. Бурый Г.Г., Потеряев И.К., Скобелев С.Б., Ковалевский В.Ф. Исследование сил сопротивления резанию на новой конструкции ковша гидравлического экскаватора // *Горное оборудование и электромеханика*. 2019. № 2 (142). С. 46–51.
10. Бурый Г.Г., Потеряев И.К., Скобелев С.Б., Ковалевский В.Ф. Сравнение процесса копания стандартным ковшом экскаватора и ковшом новой конструкции // *Горное оборудование и электромеханика*. 2020. № 1(147). С. 37–44.
11. Баловнев В.И., Данилов Р.Г., Улитич О.Ю. Стенд для исследования процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин // *Строительные и дорожные машины*. 2020. № 8. С. 3–15.
12. Берестов Е.И. Влияние трения грунта по поверхности ножа на сопротивление резанию // *Строительные и дорожные машины*. 2010. № 11. С. 34–38.
13. Сёмкин Д.С. О влиянии скорости рабочего органа на силу сопротивления резанию грунта // *Вестник СибАДИ*. 2017. № 1. С. 37–43.
14. Николаев В.А. Анализ взаимодействия кромки лезвия консольного ножа с грунтом // *Вестник СибАДИ*. 2020. № 2. С. 172–181.
15. Тарасов М.А. Моделирование параметров функционирования выемочной машины с вибрационным воздействием на горные породы // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2019. Т. 11, № 1(39). С. 85–97.
16. Трояновская И.П., Разношинская А.В., Козьминых В.А., Лещенко Е.А. Экспериментальные исследования процесса промышленного рыхления грунта // *Горный журнал*. 2021. № 5. С. 87–90.
17. Кузнецов И.С. Теоретические исследования процесса взаимодействия резца фрезерного рабочего оборудования экскаватора с грунтом // *Вестник СибАДИ*. 2021. Т. 18, № 1 (77). С. 42–50.
18. Константинов Ю.В. Методика расчёта сопротивления и момента сопротивления резанию почвы прямым пластинчатым ножом фрезы // *Тракторы и сельхозмашины*. 2019. № 5. С. 31–39.
19. Николаев В.А. Определение скорости цепей и размеров пласта грунта, отрезаемого ковшом агрегата для удаления верхнего слоя грунта с подстилающего слоя автодороги // *Вестник СибАДИ*. 2020. № 1. С. 32–43.
20. Николаев В.А. Затраты энергии на резание грунта ковшом агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодороги // *Вестник СибАДИ*. 2020. № 6. С. 676–688.
21. Шабанова Г.И., Савельев С.В., Бурый Г.Г. Математическое описание колебательной системы «вибрационный рабочий орган-грунт» // *Вестник СибАДИ*. 2013. №3 (31). С. 102–107.
23. Тарасик В.П. Физические основы процесса демпфирования колебаний в системе подвески автомобиля // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2019. № 1(62). С. 62–77.
24. Зеньков С.А., Минеев Д.А. Определение кинематических параметров ковша экскаватора // *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2019. № 3. С. 30–33.
25. Tan N.D. Dynamic simulation of a hydraulic excavator to determine the joint reaction forces of boom, stick, bucket, and driving forges of hydraulic cylinders/ Tan N.D.// *Inzynieria Mineralna*. 2020. T. 1. №1. С. 131-137.

REFERENCES

1. Lukashuk O.A. Zakonomernosti formirovaniya rezhimnyh parametrov glavnyh mehanizmov kar'ernogo jekskavatora v processe jekskavacii gornyh porod [Patterns of formation of regime parameters of the main mechanisms of the quarry excavator in the process of excavation of rocks]//*Mining equipment and electromechanics*. 2019. 3 (143): 14-17.
2. Balovnev V.I., Danilov R.G., Ulitich O.Yu. Issledovanie upravlyaemyh nozhevyh sistem zemlerojno-transportnyh mashin [Study of controlled knife systems of earth-moving vehicles]//*Construction and road machines*. 2017. 2: 12-15.
3. Kujundžić T. Influence of crushed rock properties on the productivity of a hydraulic excavator/ Kujundžić T., Klanfar M., Korman T., Briševac Z.// *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021. 5: 1-15.
4. Choudhary B.S. Effect of blast induced rock fragmentation and muckpile angle on excavator performance in surface mines//*Mining of Mineral Deposits*. 2019. 3: 119-126.
5. Niskanen I. 4D modeling of soil surface during excavation using a solid-state 2D profilometer mounted on the arm of an excavator/ Niskanen I., Immonen M., Makkonen T., Tyni P., Hiltunen M., Kolli T., Heikkilä R., Keränen P., Hallman L., Kostamovaara J., Louhisalmi Y.. 2020. 112: 103-112.

6. Xu G. High-gain observer-based sliding mode control for hydraulic excavators/ Xu G., Yu Z., Lu N., Lyu G.// *Harbin Gongcheng Daxue Xuebao*. 2021. 6: 885-892.
7. Yu Y. Energy saving of hybrid hydraulic excavator with innovative powertrain/ Yu Y., Do T.C., Park Y., Ahn K.K.// *Energy Conversion and Management*. 2021. 244.
8. Dao H.V. High accuracy contouring control of an excavator for surface flattening tasks based on extended state observer and task coordinate frame approach/ Dao H.V., Nguyen D.G., Ahn K.K., Na S.// *Automation in Construction*. 2021. 130.
9. Buriy G.G., Poteryaev I.K., Skobelev S.B., Kovalevsky V.F. Issledovanie sil soprotivleniya rezaniju na novoj konstrukcii kovsha gidravlicheskogo jekska- vatora [Study of the forces of resistance to cutting on the new structure of the ladle of a hydraulic excava- tor]//*Mining equipment and electromechanics*. 2019. 2: 46-51.
10. Buriy G.G., Poteryaev I.K., Skobelev S.B., Kovalevsky V.F. Sravnenie processa kopanija standar- tnykh kovshom jekska vatora i kovshom novoj konstruk- cii [Comparison of the digging process with a standard excavator bucket and a new design bucket]//*Mining equipment and electromechanics*. 2020. 1: 37-44.
11. Balovnev V.I., Danilov R.G., Ulitich O.Yu. Stend dlja issledovaniya processov vzaimodejstviya so sredoj rabochih organov dorozhno-stroitel'nyh mashin [Stand for research of processes of interaction with the environment of working bodies of road construction machines]//*Construction and road machines*. 2020. 8: 3-15.
12. Berestov E.I. Vlijanie treniya grunta po poverh- nosti nozha na soprotivlenie rezaniju [Influence of soil friction on the knife surface on cutting resistance]//*Con- struction and road machines*. 2010. 11: 34-38.
13. Semkin D.S. O vlijanii skorosti rabocheho or- gana na silu soprotivleniya rezaniju grunta [On the influ- ence of the speed of the working body on the strength of resistance to cutting of the ground]// *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017. 1. : 37-43. (In Russ.)
14. Nikolaev V.A. Analiz vzaimodejstviya kromki lezvija konsol'nogo nozha s gruntom [Analysis of the interaction of the blade edge of the cantilever knife with the ground]// *The Russian Automobile and Highway In- dustry Journal*. 2020. 2: 172-181. (In Russ.)
15. Tarasov M.A. Modelirovanie parametrov funk- cionirovaniya vyemочноj mashiny s vibracionnym vozdejstviem na gornye porody [Modeling of param- eters of the extraction machine functioning with vibration impact on rocks]//*Sustainable development of moun- tain areas*. 2019. 1: 85-97.
16. Troyanovskaya I.P., Raznoshinskaya A.V., Kozminykh V.A., Leshchenko E.A. Jeksperimental'nye issledovaniya processa promyshlennogo ryhleniya grunta [Experimental studies of the process of industrial tillage of soil]//*Mining journal*. 2021. 5: 87-90.
17. Kuznetsov I.S. Teoreticheskie issledovaniya processa vzaimodejstviya rezca frezernogo raboche- go oborudovaniya jekska vatora s gruntom [Theoretical studies of the process of interaction of the cutter of the milling working equipment of the excavator with the soil]// *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021. 1: 42-50.
18. Konstantinov Yu.V. Metodika raschjota sopro- tivlenija i momenta soprotivleniya rezaniju pochvy pr- jamym plastinchatym nozhom frezy [Methodology for calculating the resistance and moment of resistance to cutting the soil with a straight plate cutter]//*Tractors and agricultural machines*. 2019. 5: 31-39. (In Russ.)
19. Nikolaev V.A. Opredelenie skorosti cepej i razmerov plasta grunta, otrezaemogo kovshom agre- gata dlja udalenija verhnego sloja grunta s podstila- jushhego sloja avtodorogi [Determination of the speed of the chains and dimensions of the soil formation cut off by the bucket of the unit to remove the upper layer of soil from the underlying layer of the highway]// *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020. 1 : 32-43. (In Russ.)
20. Nikolaev V.A. Zatraty jenerгии na rezanie grunta kovshami agregata nepreryvnogo dejstviya dlja formirovaniya podstilajushhego sloja avtodorogi [Ener- gy costs for cutting the soil with buckets of a continuous unit to form the underlying layer of the highway]// *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020. 6: 676-688. (In Russ.)
21. Shabanova G.I., Savelyev S.V., Buriy G.G. Matematicheskoe opisanie kolebatel'noj sistemy «vi- bracionnyj rabochij organ-grunt» [Mathematical de- scription of the oscillatory system "vibrational working organ-soil"]// *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2013. 3: 102-107. (In Russ.)
22. Tarasik V.P. Fizicheskie osnovy processa dempfirovaniya kolebanij v sisteme podveski avtomobilja [The physical foundations of the process of damp- ing oscillations in the suspension system of the car]// *Bulletin of the Belarusian-Russian University*. 2019. 1 : 62-77.
23. Zenkov S.A., Mineev D.A. Opredelenie ki- nematicheskikh parametrov kovsha jekska vatora [De- termination of kinematic parameters of the excavator ladle]//*Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2019. 3: 30-33. (In Russ.)
24. Tan N.D. Dynamic simulation of a hydrau- lic excavator to determine the joint reaction forces of boom, stick, bucket, and driving forges of hydraulic cylinders/ Tan N.D.// *Inzynieria Mineralna*. 2020. 1. : 131-137.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Бурый Григорий Геннадьевич – канд. техн. наук., доц. кафедры «Автомобили и энергетиче- ские установки».

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Grigoriy G. Buriy, Cand. of Sci., Associate Professor, the Automobiles and Energy Systems Department

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

Научная статья
УДК 656.13.08
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-700-711>

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОПРЕДЕЛЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

А.Г. Шевцова

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия

shevcova-anastasiya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8973-9271>

АННОТАЦИЯ

Введение. Большое количество погибших на дорогах Российской Федерации является весомой государственной проблемой, для снижения данного показателя на национальном уровне разрабатываются различные целевые программы. Для оценки достижения установленных целевых программ необходим математический анализ определенных показателей безопасности дорожного движения, позволяющий установить наиболее точную математическую модель, описывающую определенные взаимосвязи рассматриваемых показателей для последующего прогноза и оценки достижения установленных целевых показателей, что позволит оценить эффективность определенных ориентиров государственной политики в рассматриваемой области.

Методы и материалы. В научно-исследовательской работе применены методы статистического и математического анализа, модели определения состояния безопасности дорожного движения на различных уровнях – мировом, государственном и региональном, зависящих от различных параметров.

Результаты. Предложена математическая модель оценки показателей безопасности дорожного движения по результату анализа параметров транспортного и социального риска, определена их невысокая взаимосвязь и установлена возможность использования их как независимых параметров для оценки состояния безопасности дорожного движения на национальном уровне.

Заключение. Установлено отсутствие тесной взаимосвязи между показателем социального риска и автомобилизацией, измеряемой в количестве автомобилей на 1000 жителей (значение коэффициента корреляции составляет 0,422), что позволяет судить о наличии иных факторов, оказывающих влияние на рассматриваемый параметр.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: математическая модель, транспортный риск, социальный риск, автомобилизация, модель Смита

Статья поступила в редакцию 16.10.2021; одобрена после рецензирования 22.11.2021; принята к публикации 14.12.2021.

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: Шевцова А.Г. Математический анализ определенных показателей безопасности дорожного движения в Российской Федерации // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 6(82). С. 700-711. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-700-711>

© Шевцова А.Г., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-700-711>

MATHEMATICAL ANALYSIS OF CERTAIN ROAD SAFETY INDICATORS IN THE RUSSIAN FEDERATION

Anastasia G. Shevtsova

V. G. Shukhova Belgorod State Technological University
shevcova-anastasiya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8973-9271>

ABSTRACT

Introduction. A large number of fatalities on the roads of the Russian Federation is a significant state problem; to reduce this indicator, various target programs are being developed at the national level. To assess the achievement of the established target programs, it is necessary to perform a mathematical analysis of certain road safety indicators, which makes it possible to establish the most accurate mathematical model describing certain interrelationships of the indicators under consideration for the subsequent forecast and assessment of the achievement of the established target indicators, which will allow assessing the effectiveness certain guidelines of state policy in the area under consideration.

Methods and materials. In the research work, methods of statistical and mathematical analysis, models for determining the state of road safety at different levels - world, state and regional, depending on various parameters are used.

Results. A mathematical model for assessing road safety indicators based on the analysis of transport and social risk parameters is proposed, their low relationship is determined and the possibility of using them as independent parameters for assessing the state of road safety at the national level is established.

Conclusion. The absence of a close relationship between the indicator of social risk and motorization, measured in the number of cars per 1000 inhabitants (the value of the correlation coefficient is 0,422), was found, which allows one to judge the presence of other factors influencing the parameter under consideration.

KEYWORDS: mathematical model, traffic risk, social risk, motorization, Smeed's model

The article was submitted 16.10.2021; approved after reviewing 22.11.2021; accepted for publication 14.12.2021.

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: Shevtsova A.G. Mathematical analysis of certain road safety indicators in the Russian Federation. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2021; 18 (6): 700-711. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-700-711>

© Shevtsova A.G., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

В большинстве стран мира вопрос безопасности дорожного движения является одним из основных в государственной политике, который находит свое отражение во многих стратегических и целевых программах. В Российской Федерации согласно Указу Президента от 21.07. 2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» основной задачей государственной политики является сохранение населения, здоровья и благополучия людей. Высокая смертность на дорогах Российской Федерации в сравнении с иными мировыми странами стимулирует разработку новых направлений в оценке данной проблемы и возможных путей ее решения. Рассматривая опыт мировых стран, наиболее предпочтительным в данном случае является опыт Швеции, которая еще в 1997 г. разработала концепцию Vision Zero, согласно которой дорожно-транспортная система должна быть спроектирована так, чтобы иметь дело с тем фактом, что люди совершают ошибки, которые могут иметь катастрофические последствия, в целом система должна быть адаптирована к психологическим и физическим условиям и ограничениям человека. Следуя определенной концепции, были разработаны основные законодательные документы, в том числе и транспортная стратегия, и, выполняя анализ таких показателей безопасности дорожного движения, как количество погибших в ДТП и социальный риск, можно судить о том, что политика, определенная правительством Швеции, дала свои положительные результаты, так за период с 2000 по 2020 г. количество погибших на дорогах было снижено с 591 чел. (2000 г.) до 204 чел. (2020 г.), значение социального риска с 6,7 (2000 г.) до 2,0 (2020 г.). С учетом положительной динамики политики Швеции в области безопасности дорожного движения многие мировые страны аналогичным образом взяли политику Vision Zero за основу при разработке законодательных актов в рассматриваемой области [1, 2].

Следуя политике мировых стран и опираясь на их положительный опыт, в Российской Федерации 12 декабря 2017 г. был подписан меморандум по продвижению «Нулевого травматизма». Несмотря на положительные результаты действующих национальных федеральных целевых программ в области безопасности дорожного движения (БДД), на сегодняшний день перед государством в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 204 стоит задача

по снижению социального риска до показателя 4 к 2024 г.

Для достижения установленного целевого показателя необходима планомерная работа в области научного обоснования данной проблемы, а именно условий и факторов, оказывающих влияние на возникновение дорожно-транспортных происшествий [3, 4] и последующих практических рекомендаций по минимизации их влияния, что будет способствовать возможному достижению, установленному целевому показателю. Следуя определенному направлению, можно сказать, что практические рекомендации в соответствии с принятой концепцией нулевой смертности сегодня реализуются довольно основательно, в рамках действующего национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» происходит строительство автомобильных дорог и приведение существующих в соответствие с действующими нормативными требованиями [5, 6].

Одним из основных исследований в области научного обоснования является математический анализ определенных показателей безопасности дорожного движения, что позволяет в дальнейшем оценить перспективу достижения установленного целевого ориентира. В результате установления необходимости выполнения научных изысканий в данной области для выполненного научного исследования определена основная цель – обоснование применения определенной математической модели при установлении взаимосвязи национальных показателей транспортного и социального риска.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В результате анализа ряда научно-исследовательских работ установлено, что в зависимости от уровня оцениваемого показателя безопасности дорожного движения возможно использовать различные математические модели (рисунок 1).

Для выполнения сравнения состояния безопасности дорожного движения на мировом уровне применимы модели, представленные на рисунке 1, которые представляют собой зависимости различных параметров. В результате своих исследований Е. Тимо установил взаимосвязь таких параметров, как число погибших в дорожно-транспортных происшествиях и общенациональным пробегом автомобилей, аналогичную взаимосвязь между данными параметрами установил С. Оппе, определив наиболее точную функциональ-

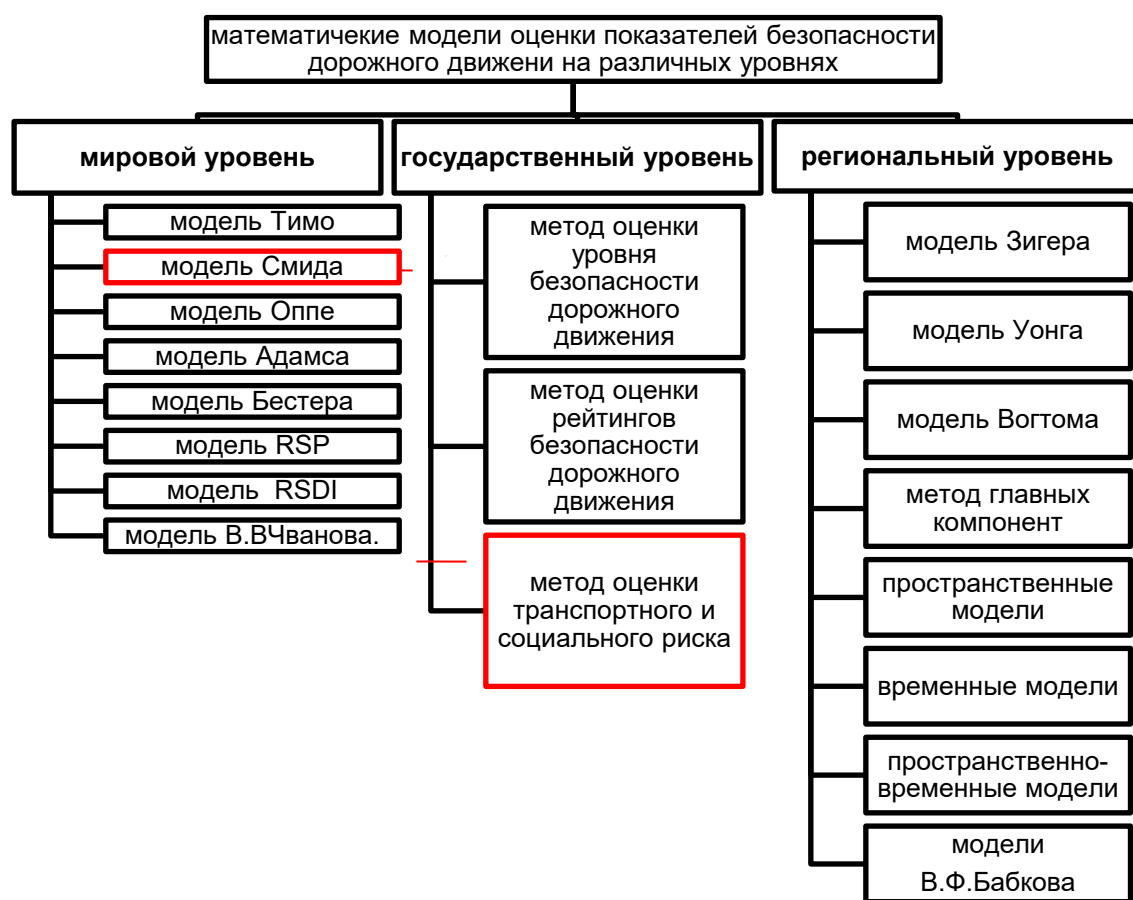


Рисунок 1 – Математические модели оценки показателей безопасности дорожного движения

Figure 1 – Mathematical models for assessing road safety indicators

ную зависимость, описываемую экспоненциальной функцией. С. Адамс также установил определенную взаимосвязь рассматриваемых параметров, описываемых логарифмической математической моделью. Отечественный ученый В.В. Чванов в качестве инструмента для возможной оценки состояния безопасности дорожного движения в различных мировых странах для последующей оценки их между собой предложил шкалу качественной оценки с определенными значениями показателей аварийности.

Одним из основных признаков, позволяющих отнести данные модели к моделям мирового уровня, является возможность применения их для сравнения положения мировых стран в области безопасности дорожного движения, в основном представленные исследователи установили определенные взаимосвязи, описанные математически по результату экспериментальных исследований, выполненных в масштабах определенного количества мировых стран.

На сегодняшний день в результате отсутствия многих показателей в мировых базах данных, например, таких как IRTAD (International Road Traffic and Accident Database), APRAD (Asia Pacific Road Accident Database), CARE (Community Road Accident Database), большинство моделей не могут быть применимы для сравнения состояния безопасности мировых стран. В данном случае наиболее совершенной в плане установленных взаимосвязей и возможности применения является модель Р. Смида, которая позволила установить взаимосвязь между количеством погибших в ДТП в любой стране с количеством зарегистрированных транспортных средств и численностью населения:

$$\frac{F}{V} = \alpha \left(\frac{V}{P} \right)^{-\beta}, \quad (1)$$

где F – количество погибших в ДТП; V – количество зарегистрированных транспортных средств; P – численность населения; $\alpha = 0,003$; $\beta = 2/3$.

В результате того, что в большинстве мировых стран есть параметры, входящие в состав установленной взаимосвязи – математической модели (1), модель Р. Смида на протяжении многих лет позволяет осуществить оценку состояния безопасности дорожного движения.

Преобразования, по выражению определенных показателей из представленной модели (1), позволили многим ученым, в том числе и отечественным, установить определенную взаимосвязь между транспортным и социальным риском и выразить данные параметры. Так, в недавнем исследовании, выполненном М.Я. Бликиным и Е.М. Решетовой [7], была представлена математическая модель, устанавливающая взаимосвязь между показателем транспортного риска (TR) и автомобилизацией (ML), полученная в результате выражения определенных показателей из первоначальной модели Р. Смида (1):

$$TR = 3(ML/1000)^{-2/3}. \quad (2)$$

Кроме этого, авторами в результате работы с мировыми и отечественными базами данных был построен точечный график, отражающий изменение рассматриваемых показателей – транспортного риска от автомобилизации для таких стран, как США, Великобритания и Россия и приведен график, построенный с использованием показателей автомобилизации от 240 авт./1000 жителей до 460 авт./1000 жителей и рассчитанных для них и транспортных рисков с применением модели (2). В этом же исследовании представлены аргументированные выводы для интерпретации расположения установленных точек для рассматриваемых стран относительно расположения графика – модель Смида:

1. Если координатные точки транспортных рисков по мере роста автомобилизации находятся выше кривой Смида, то отношение нации к гибели людей на дорогах следует считать вполне амбивалентным, а национальное самообучение заведомо неэффективным.

2. Если те же точки лежат в разумно узком коридоре от кривой Смида, то национальное самообучение в целом соответствует среднемировым тенденциям. При этом отступления от кривой Смида в ту или иную сторону обусловливаются особенностями национального менталитета.

3. Если те же точки находятся радикально ниже кривой Смида, то процесс национально-го самообучения следует признать успешным

и, соответственно, автомобилизированное сообщество уверенно идет по пути «К нулю» (следует концепции Vision Zero).

В качестве модели, позволяющей оценить состояние безопасности движения и результативность принимаемых мер по улучшению ситуации в масштабах государства согласно выполненной классификации (см. рисунок 1), может выступить отечественный метод оценки уровня безопасности движения, позволяющий рассчитать уровень безопасности движения с учетом анализа участков дорожного движения и степени их опасности почти идентичным методом, активно применяемым в зарубежных странах является метод оценки рейтингов безопасности дорожного движения (метод RPS – Road Protection Scope), позволяющий установить рейтинг опасности в зависимости от видов происшествий.

В связи с тем, что во многих странах при повышении уровня безопасности движения ведется активная государственная политика, находящая свое отражение в мировых транспортных стратегиях и в том числе транспортной стратегии Российской Федерации [8, 9, 10] и целевых программах, результатом эффективности которых являются целевые показатели, одним из которых является социальный и транспортный риск. Поэтому в качестве альтернативного метода, позволяющего оценить безопасность дорожного движения в рамках государства, может стать метод оценки транспортного и социального риска (см. рисунок 1).

Для достижения основной цели исследования в рамках выполненных научных изысканий и математического анализа рассматриваемых показателей – транспортного и социального риска – и проведены работы по определению их взаимосвязи.

Также следует отметить, что согласно представленной классификации математических моделей (см. рисунок 1), модели, отнесенные к моделям регионального уровня, позволяют осуществить прогноз возникновения ДТП в основном с учетом геометрических и транспортных характеристик в масштабах определенного участка для субъекта (региона) Российской Федерации.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В научных работах Е.И. Шаврак [11,12] представлены результаты математических преобразований модели Смида, позволяющих установить взаимосвязь социального риска и автомобилизации

$$C = 3(A)^{1/3}, \quad (3)$$

где C – число погибших в расчете на 100 000 чел.; A – количество автомобилей на 1000 жителей.

Таким образом, согласно представленным математическим зависимостям (2) и (3), показатели транспортного и социального риска зависят от автомобилизации, возможно предположить что между данными показателями существует определенная взаимосвязь.

Профессор В.М. Курганов в исследовании¹ по результату анализа транспортного и социального риска в регионах Российской Федерации установил между данными показателями определенную взаимосвязь:

$$RH = 4,223RT^{0,824}, \quad (4)$$

где RT – уровень транспортного риска в регионе, погибших на 10 тыс. транспортных средств; RH – уровень социального риска в регионе, погибших на 100 тыс. населения.

В результате автором был сформулирован вывод о нецелесообразности применения данных показателей в качестве независимых оценок, из-за того что тесная взаимосвязь между ними была установлена и определялась коэффициентом корреляции – 0,866 для регионов Российской Федерации.

В связи с тем что применить данные параметры предлагается в качестве параметров оценки состояния безопасности дорожного движения в масштабах Российской Федерации (государственный уровень), в рамках данной работы осуществлена выборка необходимых для расчета данных за долгосрочный период 1995–2015 гг. (таблица 1). Данные в столбцах 2–4 (см. таблицу 1) установлены с использованием официального источника Росстат.

Согласно распоряжению Министерства внутренних дел Российской Федерации от 12 февраля 2019 г. № 1/1291 методика расчета значения показателя «Количество погибших в ДТП», показатель «Количество погибших в ДТП», определяемый как социальный риск, рассчитывается по формуле

$$КП=ЧП/NA*100000, \quad (5)$$

где $КП$ – количество погибших (число лиц, погибших в дорожно-транспортных происшествиях, на 100 тыс. населения); $ЧП$ – число лиц, погибших в дорожно-транспортных происшествиях; N – численность населения в Российской Федерации; 100 000 – коэффициент перевода полученного значения в условные единицы.

Согласно определению, отраженному в ранее действующих официальных целевых программах по безопасности дорожного движения 2006–2012 гг. и 2013–2020 гг., транспортный риск – количество лиц, погибших в результате дорожно-транспортных происшествий, на 10 тыс. транспортных средств. Руководствуясь данным определением можно установить расчетную формулу

$$КП= ЧП/NA*100000, \quad (6)$$

где $КП$ – количество погибших (число лиц, погибших в дорожно-транспортных происшествиях, на 10 тыс. транспортных средств); $ЧП$ – число лиц, погибших в дорожно-транспортных происшествиях; NA – количество транспортных средств; 10000 – коэффициент перевода полученного значения в условные единицы.

Для уточнения определенных искомым параметров в рамках исследования уточнены их обозначения, так уровень социального риска принят к обозначению как CP , уровень транспортного риска TP , тогда с учетом принятых обозначений в рамках исследования формулы (7) и (8) интерпретируются следующим образом:

$$CP = ЧП/N*100000, \quad (7)$$

$$TP = ЧП/NA*10000, \quad (8)$$

где CP – социальный риск (число лиц, погибших в дорожно-транспортных происшествиях, на 100 тыс. населения); TP – транспортный риск (число лиц, погибших в дорожно-транспортных происшествиях, на 10 тыс. транспортных средств).

Для установления зависимости TP и CP построен точечный график (рисунок 2) и осуществлен математико-статистический анализ (таблица 2).

¹ Курганов В.М. Математико-статистический анализ транспортного и социального рисков автомобилизации / В.М. Курганов // В сборнике: Развитие теории и практики автомобильных перевозок, транспортной логистики. Сборник научных трудов кафедры «Организация перевозок и управление на транспорте» в рамках Международной научно-практической конференции. Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ). 2016. С. 90–97.

Таблица 1
Значения социального и транспортного риска и показателей,
необходимых для их расчета за период 1995–2019 гг.

Table 1
Values of social and transport risk and indicators required for their
calculation for 1995 – 2019 period

Год	Количество погибших в ДТП, чел.	Численность населения, чел.	Количество зарегистрированных транспортных средств, ед.	СР	ТР
1995	32 791	148 375 787	14 971 590	22,10	21,90
1996	29 468	148 160 129	16 446 700	19,89	17,92
1997	27 665	147 915 361	18 032 590	18,70	15,34
1998	29 021	147 670 784	19 303 400	19,65	15,03
1999	29 718	147 214 776	20 246 590	20,19	14,68
2000	29 594	146 596 869	20 902 490	20,19	14,16
2001	30 916	145 976 482	21 899 290	21,18	14,12
2002	33 243	145 306 497	23 245 890	22,88	14,30
2003	35 602	144 648 618	24 241 790	24,61	14,69
2004	34 506	144 067 316	25 148 800	23,95	13,72
2005	33 957	143 518 814	26 554 000	23,66	12,79
2006	32 724	143 049 637	27 838 490	22,88	11,75
2007	33 308	142 805 114	30 491 090	23,32	10,92
2008	29 936	142 742 366	33 221 090	20,97	9,01
2009	27 659	142 785 348	34 298 600	19,37	8,06
2010	26 567	142 849 468	35 677 280	18,60	7,45
2011	27 953	142 960 908	37 851 400	19,55	7,38
2012	27 991	143 201 721	40 324 500	19,55	6,94
2013	27 025	143 506 995	42 921 490	18,83	6,30
2014	26 958	146 090 613	45 344 390	18,45	5,95
2015	23 114	146 405 999	46 221 880	15,79	5,00
2016	20 308	146 674 541	47 805 790	13,85	4,25
2017	19 088	146 842 401	49 493 100	13,00	3,86
2018	18 214	146 830 575	50 152 700	12,40	3,63
2019	16 981	146 764 655	51 087 490	11,57	3,32

В результате анализа математических функций, с помощью которых возможно установить зависимость между рассматриваемыми параметрами транспортного и социального риска, установлено, что самый высокий коэффициент корреляции обеспечивается степенной функцией, при которой $R^2 = 0,7087$, данное значение позволяет судить о имеющейся взаимосвязи между рассматриваемыми параметрами аналогично зависимости, установленной в своем исследовании Р. Смидом.

Основная цель исследования заключается в обосновании применения определенной математической модели при установлении взаимосвязи национальных показателей транспортного и социального риска, которая по результату математическо-статистического анализа аналогична существующей модели

взаимосвязи количества погибших с численностью населения и автомобилизацией и описывается степенной функцией. Но оценку данных показателей предлагается осуществлять в рамках государственного уровня, поэтому еще одной задачей исследования будет являться установление математической модели определения транспортного и социального риска в зависимости от автомобилизации.

Для установления математической функции, позволяющей установить зависимость рассматриваемых параметров, определенных с использованием национального подхода, установленного в распоряжении Министерства внутренних дел Российской Федерации от 12 февраля 2019 г. № 1/1291, построен точечный график для показателей Российской Федерации за долгосрочный период 1995–2019 гг. (си-

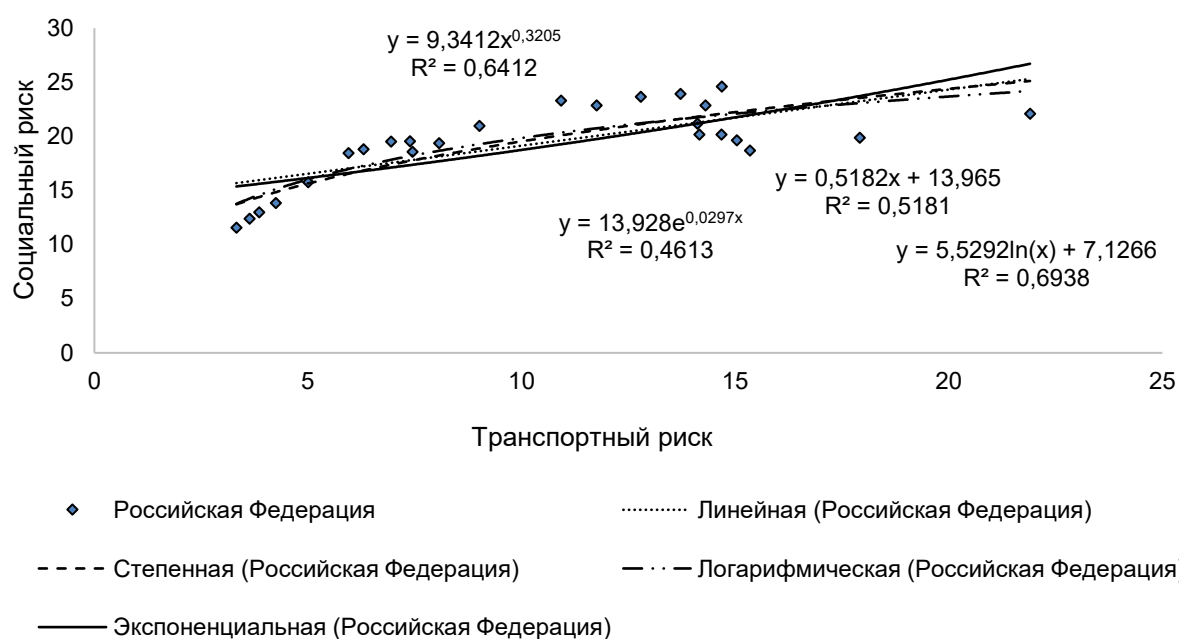


Рисунок 2 – Точечный график транспортного и социального риска Российской Федерации за период 1995–2019 гг.

Figure 2 – Dot graph of the transport and social risk of the Russian Federation for the period 1995–2019

Таблица 2
Результаты оценки математико-статистической связи между транспортным и социальным риском

Table 2
The results of evaluating the mathematical and statistical relationship between transport and social risk

Наименование функции	Уравнение функции	Величина корреляции(R^2)
Линейная	$y = 0,5182x + 13,965$	$R^2 = 0,5181$
Степенная	$y = 9,3412x^{0,3205}$	$R^2 = 0,7087$
Логарифмическая	$y = 5,5292\ln(x) + 7,1266$	$R^2 = 0,6938$
Экспоненциальная	$y = 13,928e^{0,0297x}$	$R^2 = 0,5188$

ний цвет точек) и указаны точки транспортного риска, рассчитанные с использованием модели Смида (зеленый цвет точек).

Оценка показателей по транспортному риску (рисунок 3) в целом по стране позволяет судить о возможности применения полученной математической модели – степенной функции по аналогии с законом Смида, величина аппроксимации при применении установленной функции составляет 0,9162, что свидетель-

ствует о высокой взаимосвязи рассматриваемых параметров

$$y = 12190x^{-1,348}. \quad (9)$$

Идентичная процедура выполнена и для установления зависимости между социальным риском и автомобилизацией (рисунок 4), в данном случае связь является не явной, в связи с тем что корреляция составляет менее 0,5 (0,422), теперь уравнение степенной

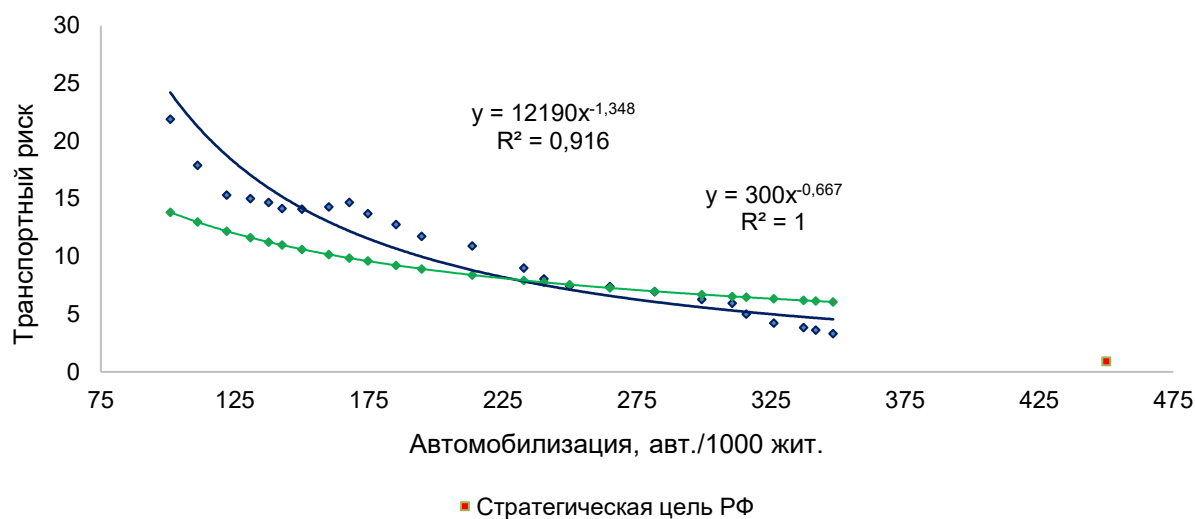


Рисунок 3 – Точечные графики транспортного риска и автомобилизации для Российской Федерации за период 1995–2019 гг. (где значение транспортного риска рассчитано по установленной методике РФ с применением формулы (8) – синий цвет точек и с применением закона Смида – зеленый цвет точек)

Figure 3 – Dot graphs of the transport risk and motorization of the Russian Federation for 1995-2019 period. (determined by using formula (8) - the blue color of the dots and using Smeed's law - the green color of the dots)

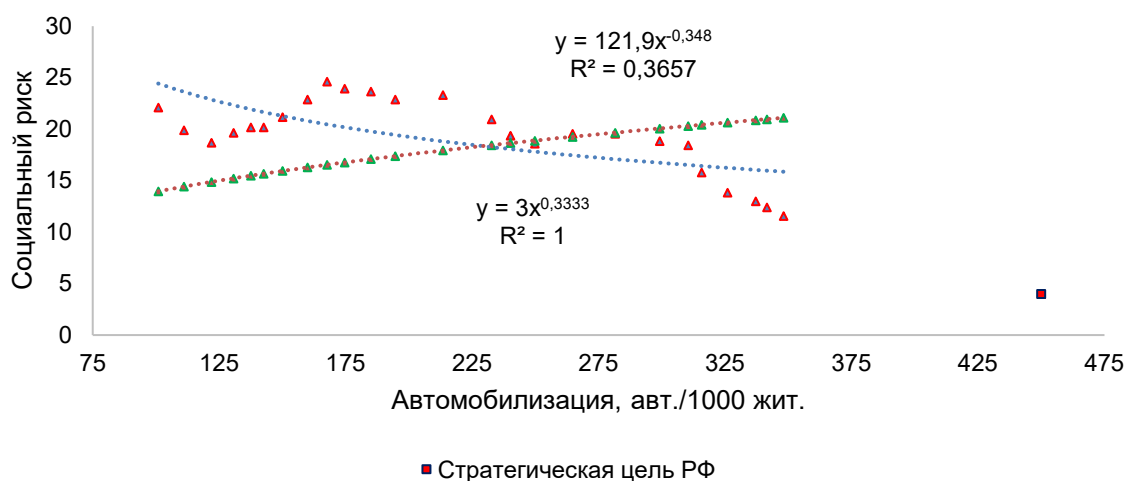


Рисунок 4 – Точечные график социального риска и автомобилизации Российской Федерации за период 1995–2019 гг. (где значение социального риска рассчитано по установленной методике РФ, с применением формулы (7) – синий цвет точек и с применением закона Смида – зеленый цвет точек)

Figure 4 – Dot graphs of social risk and motorization of the Russian Federation for the period 1995-2019. (determined by using formula (7) - the blue color of the points and using Smeed's law – the green color of the points)

функции, которое очень точно описывает полученные зависимости по закону Смида для существующих статистических показателей выглядит следующим образом:

$$y = 121,9x^{-0,348}. \quad (10)$$

В данном случае применение установленной модели не представляется возможным в связи с отсутствием взаимосвязи между рассматриваемыми параметрами.

ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненные математические изыскания позволили установить наличие некоторой взаимосвязи между рассматриваемыми параметрами для оценки безопасности дорожного движения – транспортного и социального риска и определить математические функции для их расчета в зависимости от уровня автомобилизации в качестве подхода для оценки их изменения в рамках страны на национальном уровне. В результате выполненного математического анализа статистических данных была высокая взаимосвязь между параметром транспортного риска и автомобилизацией и установлена математическая модель данной зависимости, описываемая аналогично модели Смида, степенной функцией. Оценка по социальному риску не позволила установить тесную взаимосвязь, характеризующую высоким значением коэффициента корреляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установленный национальный целевой ориентир в области безопасности дорожного движения, заключающийся в снижении количества погибших в дорожно-транспортных происшествиях до 4 чел. на 100 тыс. населения к 2024 г., в целом способствует активизации различных процессов улучшения состояния системы ВАДС научной и практической направленности [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25]. Для оценки возможности достижения установленного целевого показателя применяются различного рода прогнозные модели. Так, в качестве применения модели для оценки таких показателей безопасности дорожного движения, как транспортный и социальный риск, в рамках данной работы были проведены исследования и получены следующие результаты:

1. Осуществлена систематизация существующих математических моделей для оценки показателей безопасности дорожного движения на различных уровнях – мировом, национальном и региональном.

2. Предложена модель оценки показателей безопасности дорожного движения по результату анализа параметров транспортного и социального риска, определена их невысокая взаимосвязь и установлена возможность использования как независимых параметров для оценки рассматриваемого показателя на национальном уровне.

3. Полученная математическая модель определения транспортного риска, позволяющая установить тесную взаимосвязь с автомобилизацией (значение коэффициента корреляции составляет 0,9162), аналогична модели Смида.

4. Установлено отсутствие тесной взаимосвязи между показателем социального риска и автомобилизацией, измеряемой в количестве автомобилей на 1000 жителей (значение коэффициента корреляции составляет 0,422), что позволяет судить о наличии иных факторов, оказывающих влияние на рассматриваемый параметр.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шевцова А.Г. Динамика реализации программы Vision Zero в мировых странах // Мир транспорта и технологических машин. 2021. № 3 (74). С. 35–42.
2. Зейналов Ф.Н. О применимости шведской программы повышения безопасности дорожного движения Vision Zero к российской действительности // Научный вестник Орловского юридического института МВД России имени В.В. Лукьянова. 2020. № 1 (82). С. 92–98.
3. Новиков И.А., Кравченко А.А., Шевцова А.Г., Васильева В.В. Научно-методологический подход к снижению аварийности на дорогах Российской Федерации // Мир транспорта и технологических машин. 2019. № 3 (66). С. 58–64.
4. Капитанов В.Т., Чубуков А.Б., Сильянов В.В., Моница О.Ю. О факторах, определяющих дорожно-транспортную аварийность в регионах России // Наука и техника в дорожной отрасли. 2019. № 4 (90). С. 18–23.
5. Старовойт Р.В. Безопасные и качественные автомобильные дороги – главный проект федерального дорожного агентства // Транспортная стратегия – XXI век. 2016. № 34. С. 28–29.
6. Аверин А.Н., Ляхов В.П., Керимов О.Ю., Разумец В.М. Решение проблемы безопасных и качественных автомобильных дорог в национальном проекте // Наука и образование: хозяйство и экономика; предпринимательство; право и управление. 2019. № 5 (108). С. 115–118.
7. Блинкин М.Я., Решетова Е.М. Институциональные новации и математические модели Рубена Смида в свете современных российских транспортных реалий // Городские исследования и практики. 2019. Т. 4, № 1 (14). С. 43–63.

8. Соколов М. Транспортная стратегия России на период до 2030 года // Транспортная стратегия – XXI век. 2013. № 22. С. 7–9.

9. Сергеев В.И., Федоренко А.И., Герами В.Д. Роль логистики в развитии транспортного комплекса РФ: в разрезе корректировки транспортной стратегии РФ на период до 2030 года // Логистика и управление цепями поставок. 2012. № 6 (53). С. 7–25.

10. Коваленко Н.В., Безновская В.В., Скороходова А.В. Современные тенденции развития транспортного комплекса Российской Федерации // Междугородный технико-экономический журнал. 2017. № 3. С. 25–31.

11. Шаврак Е.И. Анализ некоторых аспектов транспортных рисков // Безопасность жизнедеятельности. 2009. № 1 (97). С. 17–22.

12. Шаврак Е.И. Автомобильные риски: корреляционный анализ // Мир транспорта. 2009. Т. 7. № 2 (26). С. 126–131.

13. Боровской А.Е., Воля П.А., Новиков И.А., Шевцова А.Г. Распределение состава транспортного потока на примере городской агломерации «Белгород» // Мир транспорта и технологических машин. 2015. № 4 (51). С. 103–110.

14. Novikov, A., Glagolev, S., Novikov, I., Shevtsova, A. Information technologies and management of transport systems development of the approach to assessing adaptation of the intersection transport model / A. Novikov, S. Glagolev, I. Novikov, A. Shevtsova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering this link is disabled, 2019, 632(1), 012052

15. Glagolev, S., Shevtsova, A., Shekhovtsova, S. Basis for application of new-generation anti-icing materials as an efficient way to reduce the accident rate on roads in winter / S. Glagolev, A. Shevtsova, S. Shekhovtsova // Transportation Research Procedia Volume 36, 2018, Pages 193-198

16. Dorokhin S.V., Novikov A.N., Zelikov V.A., Strukov Y.V., Novikov I.A., Shevtsova A.G., Likhachev D.V. Investigation of methods for calculating duration of light signal regulation cycle / S.V. Dorokhin, A.N. Novikov, V.A. Zelikov, Y.V. Strukov, I.A. Novikov, A.G. Shevtsova, D.V. Likhachev // Journal of Physics: Conference Series, 2018, Volume 1015, Issue 3, 032128

17. Novikov A., Novikov I., Shevtsova A. Modeling of traffic-light signalization depending on the quality of traffic flow in the city / A. Novikov, I. Novikov, A. Shevtsova // Journal of Applied Engineering Science. 2019. Т. 17. № 2. С. 175-181.

18. Novikov A., Shevtsova A., Vasilieva V. Development of approach to reduce number of accidents caused by drivers / A. Novikov, A. Shevtsova, V. Vasilieva // Transportation Research Procedia, 2020, 50, pp. 491–498.

19. Евтюков С.А., Подопригора Н.В. Совершенствование методики вычисления остановочного пути // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 4 (33). С. 214–219.

20. Петров А.И., Евтюков С.А. Новая антиэнтропийная концепция организованности систем

обеспечения безопасности дорожного движения // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 1 (72). С. 184–193.

21. Жанказиев С.В., Воробьев А.И., Морозов Д.Ю. Тенденции развития автономных интеллектуальных транспортных систем в России // Транспорт Российской Федерации. 2016. № 5 (66). С. 26–28.

22. Поляков А.С., Жанказиев С.В. Повышение эффективности функционирования транспортного комплекса города // Наука и техника в дорожной отрасли. 2016. № 4 (78). С. 3–6.

23. Новиков А.Н., Еремин С.В., Шевцова А.Г. Основные принципы расчета программы светофорного регулирования на основе управляемых сетей и потока насыщения // Вестник СибАДИ. 2019. Т. 16. № 6 (70). С. 680–691.

24. Жигадло А.П., Дорохин С.В., Лихачев Д.В. Новый подход к вводу дополнительной левоповоротной секции светофорного регулирования // Вестник СибАДИ. 2019. Т. 16. № 4 (68). С. 432–445.

25. Кравченко П.А., Олещенко Е.М. Системный подход в управлении безопасностью дорожного движения в Российской Федерации // Транспорт Российской Федерации. 2018. № 2 (75). С. 14–18.

REFERENCES

1. Shevtsova A.G. Dinamika realizacii programmy Vision Zero v mirovyh stranah [Dynamics of the Vision Zero Program Implementation in World Countries] // *World of Transport and Technological Machines*. 2021.3 (74): 35-42. (in Russian)

2. Zeynalov F.N. O primenimosti shvedskoj programmy povysheniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya Vision Zero k rossijskoj dejstvitel'nosti [On the applicability of the Swedish program for improving road safety "Vision Zero" to the Russian reality] // *Scientific Bulletin of the Oryol Legal Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia named after V.V. Lukyanov*. 2020. 1 (82): 92-98. (in Russian)

3. Novikov I.A., Kravchenko A.A., Shevtsova A.G., Vasilyeva V.V. Nauchno-metodologicheskij podhod k snizheniju avarijnosti na dorogah Rossijskoj Federacii [Scientific and methodological approach to reducing accidents on the roads of the Russian Federation] // *World of Transport and Technological Machines*. 2019. 3 (66): 58-64. (in Russian)

4. Captains VT, Chubukov AB, Silyanov VV, Monina O.Yu. O faktorah, opredelajushhih dorozhno-transportnuju avarijnost' v regionah Rossii [On the factors determining road traffic accidents in the regions of Russia] // *Science and technology in the road industry*. 2019. 4 (90): 18-23. (in Russian)

5. Starovoit R.V. Bezopasnye i kachestvennye avtomobil'nye dorogi – glavnyj proekt federal'nogo dorozhnogo agentstva [Safe and high-quality highways - the main project of the federal road agency] // *Transport strategy - XXI century*. 2016. 34: 28-29.

6. Averin A.N., Lyakhov V.P., Kerimov O.Yu., Razumets V.M. Reshenie problemy bezopasnyh i kachestvennyh avtomobil'nyh dorog v nacional'nom proekte [Solving the problem of safe and high-quality highways in the national project] // *Science and Education: Econ-*

omy and Economy; entrepreneurship; law and governance. 2019. 5 (108): 115-118.

7. Blinkin M. Ya., Reshetova E. M. Institucional'nye novicii i matematicheskie modeli Rubena Smida v sveste sovremennyh rossijskih transportnyh realij [Institutional innovations and mathematical models of Ruben Smid in the light of modern Russian transport realities] // *Urban studies and practices*. 2019. 4. 1 (14): 43-63.

8. Sokolov M. Transportnaja strategija Rossii na period do 2030 goda [Transport strategy of Russia for the period up to 2030] // *Transport strategy - XXI century*. 2013. 22: 7-9. (in Russian)

9. Sergeev V. I., Fedorenko A. I., Gerami V. D. Rol' logistiki v razvitii transportnogo kompleksa RF: v razreze korrekcirovki transportnoj strategii RF na period do 2030 goda [The role of logistics in the development of the transport complex of the Russian Federation: in the context of adjusting the transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030] // *Logistics and supply chain management*. 2012. 6 (53): 7-25. (in Russian)

10. Kovalenko N. V., Beznovskaya V. V., Skorokhodova A. V. Sovremennye tendencii razvitiya transportnogo kompleksa Rossijskoj Federacii [Modern trends in the development of the transport complex of the Russian Federation] // *International technical-economic journal*. 2017. 3: 25-31. (in Russian)

11. Shavrak E. I. Analiz nekotoryh aspektov transportnyh riskov [Analysis of some aspects of transport risks] // *Life safety*. 2009. 1 (97): 17-22. (in Russian)

12. Shavrak E. I. Avtomobil'nye riski: korrelyacionnyj analiz [Automotive risks: correlation analysis] // *World of Transport*. 2009. 2 (26): 126-131. (in Russian)

13. Borovskoy A. E., Volya P. A., Novikov I. A., Shevtsova A. G. Raspredelenie sostava transportnogo potoka na primere gorodskoj aglomeracii «Belgorod» [Distribution of the composition of the traffic flow on the example of the urban agglomeration "Belgorod"] // *World of Transport and Technological Machines*. 2015. 4 (51): 103-110. (in Russian)

14. Novikov, A., Glagolev, S., Novikov, I., Shevtsova, A. Information technologies and management of transport systems development of the approach to assessing adaptation of the intersection transport model / A. Novikov, S. Glagolev, I. Novikov, A. Shevtsova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering this link is disabled*, 2019, 632 (1), 012052

15. Glagolev, S., Shevtsova, A., Shekhovtsova, S. Basis for application of new-generation anti-icing materials as an efficient way to reduce the accident rate on roads in winter / S. Glagolev, A. Shevtsova, S. Shekhovtsova // *Transportation Research Procedia* 2018. 36: 193-198 (in Russian)

16. Dorokhin S. V., Novikov A. N., Zelikov V. A., Strukov Y. V., Novikov I. A., Shevtsova A. G., Likhachev D. V. Investigation of methods for calculating duration of light signal regulation cycle / S. V. Dorokhin, A. N. Novikov, V. A. Zelikov, Y. V. Strukov, I. A. Novikov, A. G. Shevtsova, D. V. Likhachev // *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1015, 3: 032128 (in Russian)

17. Novikov A., Novikov I., Shevtsova A. Modeling of traffic-light signalization depending on the quality of traffic flow in the city / A. Novikov, I. Novikov, A.

Shevtsova // *Journal of Applied Engineering Science*. 2019. 17(2): 175-181. (in Russian)

18. Novikov A., Shevtsova A., Vasilieva V. Development of approach to reduce number of accidents caused by drivers / A. Novikov, A. Shevtsova, V. Vasilieva // *Transportation Research Procedia*, 2020, 50: 491-498.

19. Evtyukov S. A., Podoprigora N. V. Sovershenstvovanie metodiki vychisleniya ostanovoch'nogo puti [improvement of the methodology for calculating the stopping distance] // *Bulletin of civil engineers*. 2012. 4 (33): 214-219.

20. Petrov A. I., Evtyukov S. A. Novaja antientropijnaja koncepcija organizovannosti sistem obespechenija bezopasnosti dorozhnogo dvizhenija [New anti-entropic concept of organization of road safety systems] // *Bulletin of civil engineers*. 2019. 1 (72): 184-193.

21. Zhankaziev S. V., Vorobiev A. I., Morozov D. Yu. Tendencii razvitiya avtonomnyh intellektual'nyh transportnyh sistem v Rossii [Trends in the development of autonomous intelligent transport systems in Russia] // *Transport of the Russian Federation*. 2016. 5 (66): 26-28. (in Russian)

22. Polyakov A. S., Zhankaziev S. V. Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovaniya transportnogo kompleksa goroda [Improving the efficiency of the city's transport complex functioning] // *Science and technology in the road industry*. 2016. 4 (78): 3-6. (in Russian)

23. Novikov A. N., Eremin S. V., Shevtsova A. G. Osnovnye principy rascheta programmy svetofornogo regulirovaniya na osnove upravlyaemyh setej i potoka nasyshheniya [Basic principles of calculating a traffic light control program based on controlled networks and saturation flow] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019. 16. 6 (70): 680-691. (in Russian)

24. Zhigadlo A. P., Dorokhin S. V., Likhachev D. V. Novyj podhod k vvodu dopolnitel'noj levopovorotnoj sekcii svetofornogo regulirovaniya [A new approach to the introduction of an additional left-turn section of traffic light regulation] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019. 16. 4 (68): 432-445. (in Russian)

25. Kravchenko P. A., Oleshchenko E. M. Sistemnyj podhod v upravlenii bezopasnost'ju dorozhnogo dvizhenija v Rossijskoj Federacii [A systematic approach to road safety management in the Russian Federation] // *Transport of the Russian Federation*. 2018. 2 (75): 14-18. (in Russian)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Шевцова Анастасия Геннадьевна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Эксплуатация и организация движения автотранспорта», e-mail: shevcova-anastasiya@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Anastasia G. Shevtsova – Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor of the Traffic Operation and Organization Department, V.G. Shukhova Belgorod State Technological University.

Научная статья

УДК 656.1

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-712-719>

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КЛИМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ АВТОМОБИЛЯ В УСЛОВИЯХ ЖАРКОГО КЛИМАТА

И.Н. Якунин¹, Н.Н. Якунин², А.Ф. Фаттахова², Ш.М. Минатуллаев³

¹АО «Биотехальянс», г. Москва, Россия,

²Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия,

³Дагестанский государственный аграрный университет имени М.М. Джамбулатова,

Республика Дагестан, г. Махачкала, Россия

btarf@btarf.com, <https://orcid.org/0000-0003-4932-5714>

yakunin-n@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7240-4982>

alm-fed@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7244-7184>

interpol1199@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3831-688X>

АННОТАЦИЯ

Введение. Смена зимнего сезона на летний сопровождается резким ростом аварийности на дорогах, при этом количество аварий имеет прямую зависимость от температуры воздуха. Причиной является неблагоприятное воздействие высоких температур и солнечной активности, которые создают в салоне автомобиля эффект «парной».

В данной статье произведён анализ тепловых полей водителя, находящегося в салоне автомобиля, в жаркое время года при разных режимах компенсации теплового эффекта. Высокие температуры способны оказывать значительное негативное влияние на состояние водителя. Этим обусловлена актуальность рассматриваемого вопроса.

Материалы и методы. В работе замер температуры и освещённости произведён с помощью электронного термометра TP101 и люксметра Мегеон-21550. Визуализация тепловых полей внешнего и внутреннего пространства автомобиля произведена с помощью тепловизора Testo-875. По завершении съёмки тепловых полей данные обрабатывались с помощью специализированного программного обеспечения.

Результаты. Основным результатом работы являются характеристика и распределение тепловых полей водителя, находящегося в салоне автомобиля с открытым окном, с кондиционером и системой «климат-контроль» в условиях высоких температур окружающего воздуха, которые позволят разработать меры по повышению надёжности водителя и минимизации аварийности. Эти результаты представляют научную новизну исследования.

Обсуждение и заключение. Применение результатов работы позволит выработать рекомендации комплексным автотранспортным предприятиям по организации работы их технических и эксплуатационных служб с учетом температур в летнее время.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: солнечная активность, высокие температуры воздуха, безопасность дорожного движения, тепловые поля, система «климат-контроль»

Статья поступила в редакцию 20.10.2021; одобрена после рецензирования 08.12.2021; принята к публикации 14.12.2021.

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: Якунин И.Н., Якунин Н.Н., Фаттахова А.Ф., Минатуллаев Ш.М. Результаты исследования эффективности климатических систем автомобиля в условиях жаркого климата // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 6(82). С. 712-719. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-712-719>

© Якунин И.Н., Якунин Н.Н., Фаттахова А.Ф., Минатуллаев Ш.М., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-712-719>

RESULTS OF A STUDY THE EFFICIENCY OF AUTOMOBILE CLIMATE SYSTEMS IN HOT CLIMATES

Ivan N. Yakunin¹, Nikolay N. Yakunin², Almira F. Fattakhova², Shamil M. Minatullaev³

¹AO Biotechalliance,
Moscow, Russia

²Orenburg State University,
Orenburg, Russia

³M.M. Dzhambulatov Dagestan State Agrarian University,
Republic of Dagestan, Makhachkala, Russia
btarf@btarf.com, <https://orcid.org/0000-0003-4932-5714>
yakunin-n@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7240-4982>
alm-fed@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7244-7184>
interpol1199@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3831-688X>

ABSTRACT

Introduction. The change of a winter season to a summer season is accompanied by a sharp increase in accidents on the roads; at the same time, the number of accidents is directly dependent on the air temperature. The reason for this is the adverse effects of high temperatures and solar activity, which create a "steam room" effect in the car interior.

This article analyzes the thermal fields of the driver, who is in the car, in the hot season with different modes of compensation of the thermal effect. High temperatures can have a significant negative impact on the driver's condition. This is due to the relevance of the issue under consideration.

Materials and methods. In the work, the temperature and illumination were measured using an electronic TP101 thermometer and a Megeon-21550 luxmeter. Visualization of the thermal fields of the external and internal space of the car was made using a Testo 875 thermal imager. Upon completion of the survey of thermal fields, the data was processed using specialized software.

Results. The main result of the work is the characteristic and distribution of the thermal fields of the driver, who is in the car, with an open window, with air conditioning and a climate control system in high ambient temperatures, which will allow to develop measures to improve the reliability of the driver and minimize accidents. These results represent the scientific novelty of the study.

Discussion and conclusion. The application of the results of the work will make it possible to develop recommendations for complex motor transport enterprises on the organization of their technical and operational services, taking into account temperatures in the summer

KEYWORDS: solar activity, high air temperatures, road safety, thermal fields, climate control system.

The article was submitted 20.10.2021; approved after reviewing 08.12.2021; accepted for publication 14.12.2021.

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: Yakunin I.N., Yakunin N.N., Fattakhova A.F., Minatullaev S.M. Results of a study the efficiency of automobile climate systems in a hot climate. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2021; 18 (6): 712-719. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-712-719>

© Yakunin I.N., Yakunin N.N., Fattakhova A.F., Minatullaev S.M., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Согласно официальной статистике¹, в период с мая по октябрь, с ростом температуры воздуха, происходит увеличение числа дорожно-транспортных происшествий (ДТП), приходящихся на тысячу зарегистрированных транспортных средств. В работе [1] определена прямая зависимость аварийности от количества дней в месяце со среднесуточной температурой, превышающей 25 °С. Данное значение является верхним пределом в диапазоне комфортных значений температуры².

Известно, что как увеличение температуры, так и интенсивности солнечной активности уменьшают тормозной путь³, что указывает на человеческий фактор как основную причину роста аварийности. Согласно официальной статистике, основными причинами снижения пропускной способности УДС в 75% являются водители и в 12% – неблагоприятные погодноклиматические условия [2]. Человек как звено системы «водитель-автомобиль-дорога-среда» (ВАДС) является не только основным, но и самым неустойчивым звеном. По своей природе человек характеризуется непостоянством, способностью к изменению, в связи с чем проблема надежности водителя сложна своей многоплановостью. При балансе звеньев системы вероятность ДТП незначительна. Дисбаланс хотя бы одного звена приводит к дисбалансу всей системы и росту вероятности ДТП.

Воздействие солнечного излучения на состояние водителя может быть как прямым, так и косвенным. К первому относятся эффекты солнечного ослепления [2], снижения уровня комфорта и уменьшения метеорологического состояния видимости. Наибольшее отрицательное воздействие эффекта солнечного ослепления наблюдается весной и осенью, когда время восхода и захода солнца совпадают с утренним или вечерним пиковым временем интенсивности движения. В эти периоды года возрастает количество аварий, совершенных в условиях эффекта солнечного ослепления.

К косвенным эффектам относятся: тепловой удар, увеличение времени реакции водителя, снижение уровня внимания, негативное влияние на оперативную память и мышление.

В обзоре [3] обобщены результаты исследований, посвященных тепловому комфорту в кабине автомобиля. Данная работа классифицирует влияние высоких температур и солнечной активности на физиологические и психологические аспекты водителя. Авторы ряда работ приходят к выводу, что как высокие значения температур, так и наличие прямых солнечных лучей оказывают негативное влияние на состояние водителей и в конечном счете на повышение аварийности.

Работы [4, 5, 6, 7, 8, 9] посвящены моделированию тепловых полей в кабине водителя в разных условиях движения и состояний окружающей среды. В работах [10, 11] приведены результаты численного моделирования тепловых процессов и климатических условий в салоне автомобиля с целью определения потоков тепла, способствующих созданию комфортной обстановки.

В работах [12, 13, 14] показано, что наличие прямых солнечных лучей снижает уровень комфорта, а также приводит к увеличению температуры в салоне автомобиля даже при наличии климатической установки.

Таким образом, солнечная активность и высокие температуры способны оказывать значительное негативное влияние на состояние водителя и через это на аварийность на дорогах. Данные эффекты должны быть учтены в первую очередь при организации регулярных грузовых и пассажирских перевозок.

Учитывая, что в настоящее время эффекты высоких температур и солнечной активности игнорируются автотранспортными предприятиями при работе с водителями, целью данной работы явилось установление закономерностей распределения температурных полей внутри салона автомобиля в жаркое время для последующего управления безопасностью дорожного движения.

¹ Показатели состояния безопасности дорожного движения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://stat.gibdd.ru> (дата обращения: 21.09.2021).

² Буракова Л.Н. Температура воздуха в салоне автомобиля и ее влияние на безопасность дорожного движения // Л.Н. Буракова, Е.А. Черменина, И.А. Анисимов: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции «Организация и безопасность дорожного движения». Тюмень: ТюмГНГУ. 2013 С. 24–28.

³ Балакина Е.В., Кочетков А.В. Коэффициент сцепления шины с дорожным покрытием: монография. М.: Инновационное машиностроение. 2017. 292 с.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Замер температуры и освещённости – количественной меры солнечной радиации, производили с помощью электронного термометра TP101 и люксметра Мегаон-21550. Визуализация тепловых полей внешнего и внутреннего пространства автомобиля производили с помощью тепловизора Testo-875. По завершении съёмки тепловых полей данные обрабатывались с помощью специализированного программного обеспечения.

Теплосъёмка производилась при температуре воздуха 35 °С снаружи автомобиля, в его салоне во время движения при открытых и закрытых окнах, в условиях работы кондиционера и установки «климат-контроль».

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для разработки мер по минимизации аварийности, возникающей в результате воздействия солнечной активности и высоких температур, необходимо понимать процессы, происходящие в месте пребывания водителя.

Для этого фиксировалось поле температур внешней и внутренней поверхностей автомобиля с построением профилей отдельных участков. На рисунке 1, а показано поле температур автомобиля, на рисунке 1, б – температурный профиль заднего крыла в жаркое время года. Съёмка произведена во время наибольшей солнечной активности – в 14:00 по местному времени. Солнечное излучение составило 102 клк. Из рисунка 1 видно, что при попадании прямых солнечных лучей корпус автомобиля прогревается относительно рав-

номерно. Высокая поверхностная температура наблюдается не только для металлического корпуса, но и для стеклянной поверхности. В данном случае температура корпуса транспортного средства варьируется от 53 до 73 °С.

Учитывая, что кузов транспортных средств состоит из материала с высокой теплопроводностью, очевидна тесная связь температуры корпуса автомобиля с микроклиматом салона, который, кроме того, зависит также и от переноса тепла, от внутренней поверхности салона к водителю.

На рисунке 2 показано поле температур в салоне автомобиля.

Температура части панели, пребывающей в тени, находится в диапазоне 50–55 °С. Такой же диапазон температур имеет потолок и сиденья автомобиля при отсутствии отвода тепла. Такой нагрев, как было показано ранее, приводит к росту влажности и вместе с этим создаёт парниковый эффект, усиливающий теплообмен в организме человека, что негативно скажется на надёжности водителя и, как следствие, на аварийной обстановке.

Попадание солнечных лучей увеличивает температуру внутренней поверхности приблизительно на 20 °С, усиливает стресс водителя, тем самым усугубляя неблагоприятную обстановку. При попадании прямых солнечных лучей как температура корпуса, так и температура деталей салона транспортного средства зависит от их цвета. Разница температур чёрной и белой поверхностей составляет приблизительно 12 °С в меньшую сторону для элементов белого цвета и в большую – для чёрного.

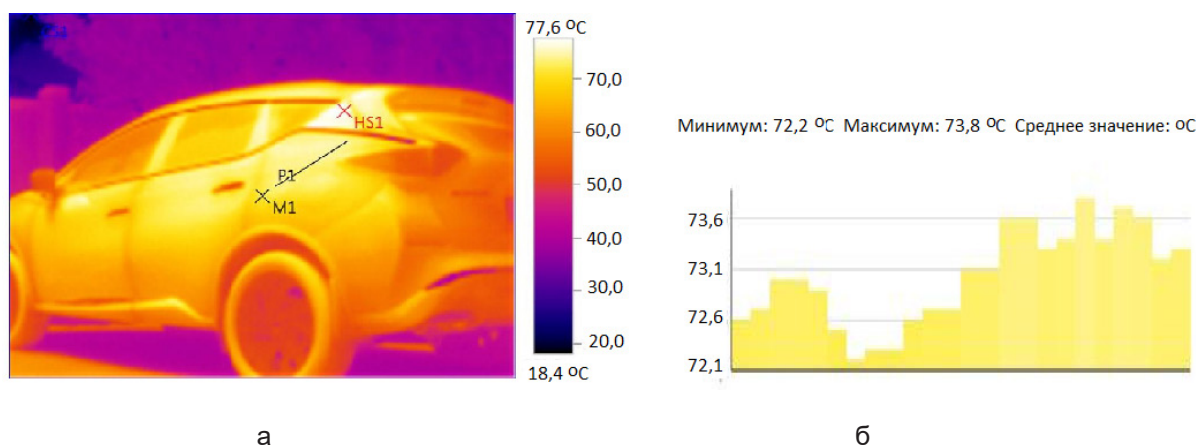


Рисунок 1 – Поле температур автомобиля:
а – общий вид; б – температурный профиль линии, изображённой на рисунке 1, а

Figure 1 – Temperature field of the car:
a) general view; b) temperature profile of the line shown in Fig. 1a

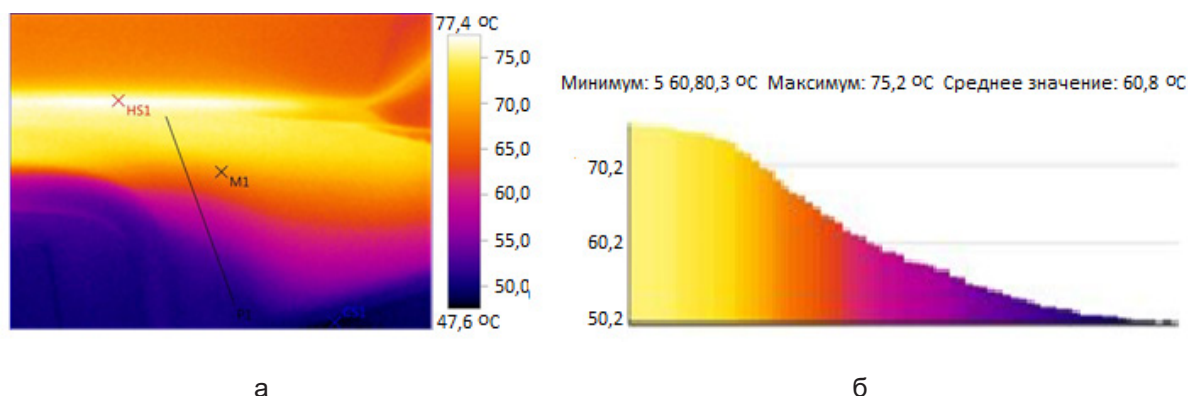


Рисунок 2 – Поле температур панели автомобиля:
а – общий вид; б – температурный профиль линии сверху вниз

Figure 2 – Temperature field of the car panel:
a) general view; b) temperature profile of the line from top to bottom

На рисунке 3 показано поле температур в салоне автомобиля с водителем внутри (см. рисунок 3, а) и температурный профиль одежды водителя (см. рисунок 3, б). Из рисунка видны две области перегрева организма водителя: его одежда, температура которой в данном случае лежит в диапазоне от 37 до 40 °С, и верхняя часть головы, температура которой лежит в интервале 39–42 °С.

Видно, что одежда играет роль ретранслятора тепла, получаемого от воздуха и солнечных лучей. Повышенная температура головы может быть обусловлена нахождением вблизи неё нагретого потолка.

Резюмируя полученные данные, можно сказать, что снижение надёжности водителя в летний период обусловлено попаданием пря-

мых солнечных лучей в салон автомобиля, неблагоприятным полем температур и влажности в салоне. В случае неработающей климатической установки и закрытых окон, при наличии прямых солнечных лучей влажность в салоне всегда превышает влажность окружающей среды. Поэтому, по нашему мнению, мероприятия по снижению описанного эффекта должны разрабатываться в трёх направлениях.

Во-первых, необходимо минимизировать попадание прямых солнечных лучей в салон транспортного средства. Во-вторых, необходимо максимально, насколько это возможно, приблизить микроклимат в салоне транспортного средства к диапазону комфортных температур и влажности. В-третьих, перед началом

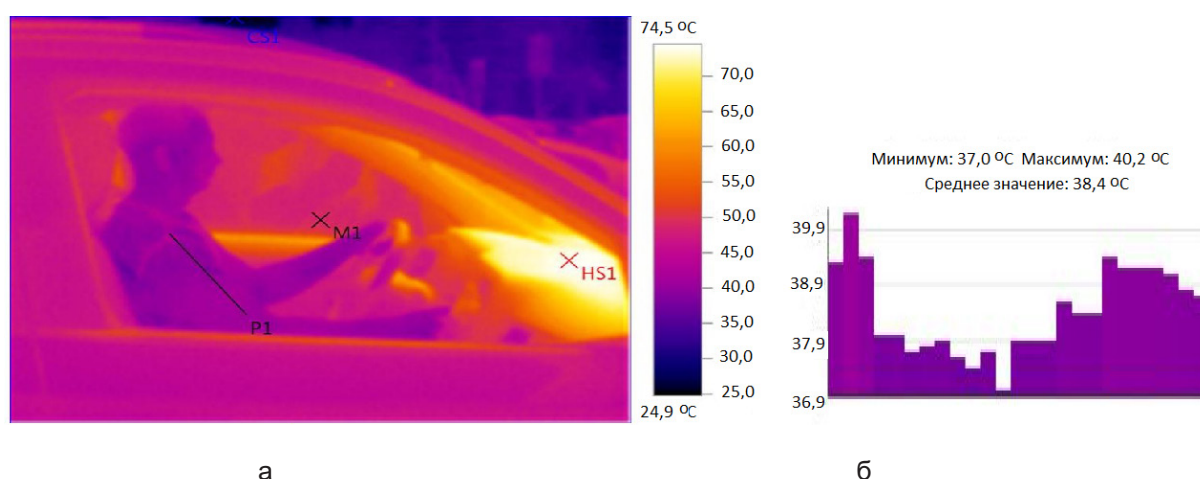


Рисунок 3 – Поле температур салона автомобиля с водителем внутри:
а – общий вид; б – температурный профиль линии сверху вниз

Figure 3 – Temperature field of a car interior with a driver inside:
a) general view; b) temperature profile of the line from top to bottom

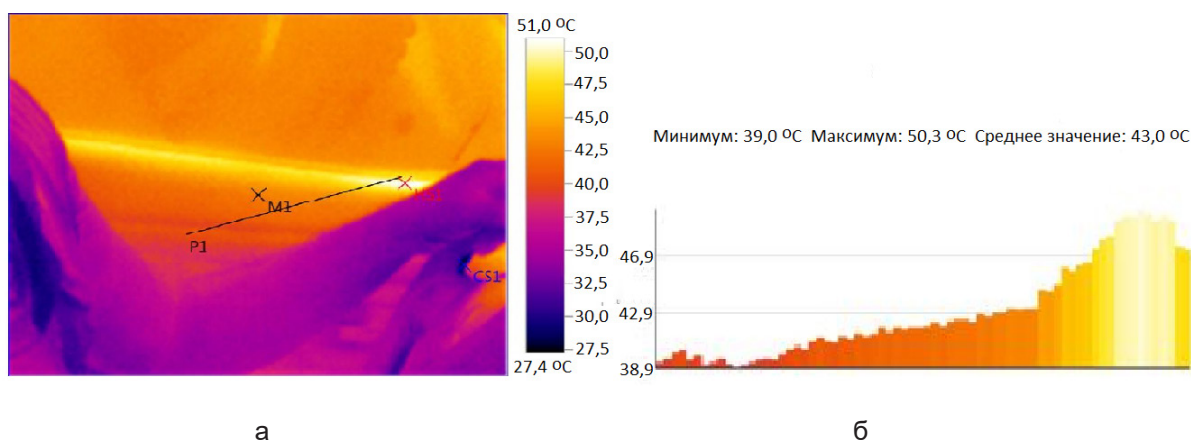


Рисунок 4 – Поле температур в салоне автомобиля с включенным кондиционером и частично освещённой поверхности
а – общий вид; б – температурный профиль линии сверху вниз

Figure 4 – The temperature field in the interior of a car with the air conditioner on and of a partially illuminated surface
a) general view; b) temperature profile of the line from top to bottom

движения водитель должен обращать внимание на погоду, относясь к обстановке с высокой температурой и солнечной активностью как к потенциально опасной.

Снижение влажности в салоне происходит при движении с открытым окном, а при работе кондиционера или системы «климат-контроль» влажность воздуха быстро снижается до уровня влажности окружающей среды. Кроме уменьшения влажности, значительных положительных эффектов от проветривания салона не обнаружено. Поэтому данный способ компенсации рассматриваемого негативного эффекта далее разбираться не будет.

Наиболее распространённым способом отвода тепла, эффективно осушающим воздух и тем самым снижающим скорость нагрева тела, является кондиционер.

Работа кондиционера производит как локальное охлаждение участков пространства до комфортных значений температур, так и общее снижение температуры в салоне на 10–15 °C. Недостаток работы кондиционера заключается в локализации его действия, что может привести к перегреву необдуваемых участков тела. Так, направленный в лицо холодный поток воздуха создаёт дискомфорт у водителя, а отсутствие прямого отвода тепла от головы – её перегрев.

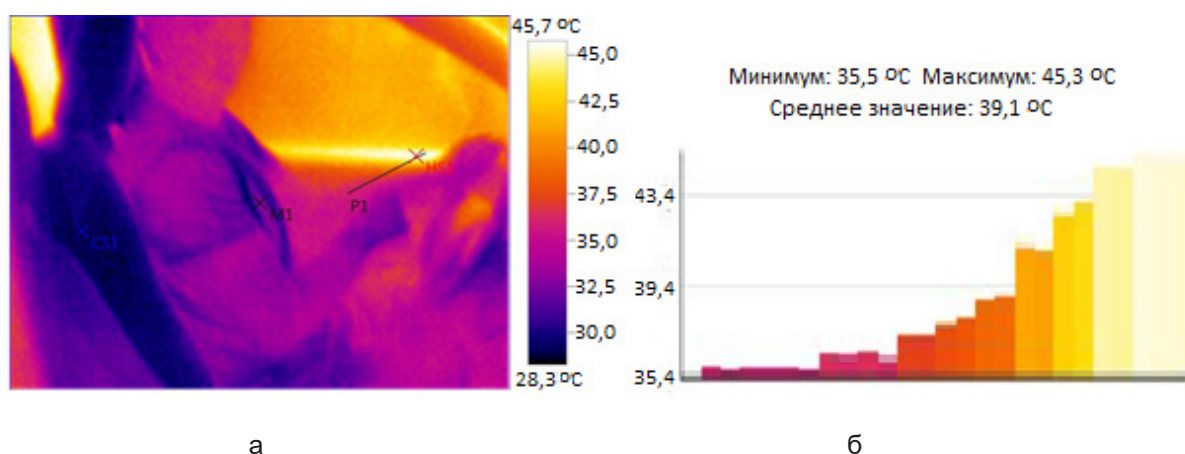


Рисунок 5 – Поле температур в салоне автомобиля с включенной системой «климат-контроль» и частично освещённой поверхности
а – общий вид; б – температурный профиль линии сверху вниз

Figure 5 – The temperature field in the interior of the car with the climate control system turned on and of the partially illuminated surface
a) general view; b) temperature profile of the line from top to bottom

Из картины распределения температур, приведённой на рисунке 4, видно, что кондиционер частично компенсирует нагрев поверхностей, снижая температуру освещённой части от 23 до 50 °С, а неосвещённой – от 15 до 40 °С. Температура одежды при этом варьируется в пределах 29–33 °С.

Таким образом, более эффективный теплоотвод производится с самой горячей поверхности, а одежда при этом перестаёт быть вторичным источником тепла.

На рисунке 5 показано распределение температур в салоне автомобиля в условиях работы системы «климат-контроль».

Из сравнения рисунков 5, а и 4, а видно, что при использовании системы «климат-контроль» поле распределения температур становится более размытым, что указывает на эффект выравнивания температурных полей, вызванный равномерным охлаждением салона транспортного средства. К такому же выводу можно прийти при сравнении рисунков 4, б и 5, б. Это же сравнение приводит к выводу, что система «климат-контроля» эффективнее, чем кондиционер снижает температуру внутренней поверхности салона автомобиля. Температура освещённой и неосвещённой поверхностей при работе системы «климат-контроль» на 5 °С ниже этих показателей при работе кондиционера и составляет 45 и 35 °С соответственно. Температура тела и одежды при этом лежит в диапазоне от 30 до 36 °С.

Таким образом, использование системы «климат-контроль» является наиболее эффективным из существующих способов компенсации эффекта высокой температуры. Однако также сказывается негативное воздействие прямых солнечных лучей, оказывающих ослепляющее воздействие и ухудшающих субъективное восприятие окружающей обстановки водителями.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена актуальная научно-практическая задача, основным результатом которой являются характеристика и распределение температурных полей в салоне автомобиля в период высоких температур воздуха и солнечной активности во время движения при открытых и закрытых окнах, в условиях работы кондиционера и системы «климат-контроля». Эти результаты представляют научную новизну исследования.

На основании полученных результатов можно утверждать о необходимости повышения ответственности службы безопасности дорожного движения АТО за работу водителей

при высоких температурах воздуха и солнечной активности. Кроме этого, с целью повышения безопасности дорожного движения всех его участников необходимо предусмотреть наличие на дорогах информационных табло о высоких температурах воздуха. Данные заключения носят рекомендательный характер. Авторами планируется продолжить работу в развитии этих рекомендаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Якунин И.Н., Меньших О.М., Шунгулов Д.М. Исследование влияния высокой температуры окружающей среды на безопасность автотранспортного процесса // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2019. № 7. С.138–145.
2. Пегин П. А. Статистический анализ влияния эффекта солнечного ослепления на тяжесть дорожно-транспортных происшествий // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2010. № 1(16). С. 99–108.
3. A. Alahmera Ahmed Mayyasb Abed A.MayyasbM.A.OmarbDongriShan. Vehicular thermal comfort models; a comprehensive review // Applied Thermal Engineering. Volume 31, Issues 6–7, May 2011, Pages 995–1002.
4. Khatoon, S., Kim, M.-H. Thermal comfort in the passenger compartment using a 3-D numerical analysis and comparison with Fanger's comfort models. *Energies* 2020, 13(3), 690.
5. Horobet, T., Danca, P., Nastase, I., Bode, F. Preliminary research on virtual thermal comfort of automobile occupants // E3S Web of Conferences 32, 01022 (2018).
6. Samrendra Singh, HesamAbbassi. 1D/3D transient HVAC thermal modeling of an off-highway machinery cabin using CFD-ANN hybrid method // Applied Thermal Engineering Volume 135, 5 May 2018, Pages 406–417.
7. Zhang, H., Arens, E., Huizenga, C., Han, T.: Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: part I: local sensation of individual body parts. *J. Build. Environ.* 45, 380–388 (2010).
8. Fiala, D., Lomas, K.J., Stohrer, M.: Computer prediction of human thermoregulatory responses to a wide range of environmental conditions. *Int. J. Biometeorol.* 45, 143–159 (2001)
9. Lorenz, M., Fiala, D., Spinnler, M., Sattelmayer, T.: A Coupled Numerical Model to Predict Heat Transfer and Passenger thermal Comfort in Vehicle Cabins, SAE International, 2014–01-0664 (2014).
10. Horobet, T., Danca, P., Nastase, I., Bode, F. Preliminary research on virtual thermal comfort of automobile occupants // E3S Web of Conferences 32, 01022 (2018).
11. Dancă, P., Bode, F., Năstase, I., Croitoru, C.V., Meslem, A. Experimental and numerical study of the air distribution inside a car cabin // E3S Web of Conferences 85, 02014 (2019).
12. Yang, R., Zhang, H., You, S., Zheng, X., Ye, T. Study on the thermal comfort index of solar radiation

conditions in winter // *Building and Environment* Volume 167, January 2020, 106456.

13. Xu, C., Li, S., Zhang, X. Application of the CPMV index to evaluating indoor thermal comfort in winter: Case study on an office building in Beijing // *Building and Environment* Volume 162, September 2019, 106295.

14. Chen, K., Kaushik, S., Han, T.: Thermal Comfort Prediction and Validation in a Realistic Vehicle Thermal Environment, SAE International, 2012–01-0645 (2012).

REFERENCES

1. Yakunin IN, Menshikh OM, Shungulov D.M. Issledovanie vliyaniya vysokoy temperatury okruzhayushchey sredy na bezopasnost' avtotransportnogo processa [Investigation of the influence of high ambient temperature on the safety of the motor transport process] // *Intellect. Innovation. Investments* 2019. 7: 138-145. (in Russian)

2. Pegin, P.A. Statisticheskij analiz vliyaniya jeffekta solnechnogo osleplenija na tjazhest' dorozhno-transportnyh proisshestvij [Statistical analysis of the effect of solar blinding on the severity of road traffic accidents] // *Bulletin of the Pacific State University*. 2010. 1 (16): 99-108. (in Russian)

3. A.AlahmeraAhmedMayyasbAbed A. MayyasbM.A.OmarbDongriShan. Vehicular thermal comfort models; a comprehensive review // *Applied Thermal Engineering*. Volume 31, Issues 6–7, May 2011, Pages 995-1002.

4. Khatoun, S., Kim, M.-H. Thermal comfort in the passenger compartment using a 3-D numerical analysis and comparison with Fanger's comfort models. *Energies* 2020, 13(3): 690.

5. Horobet, T., Danca, P., Nastase, I., Bode, F. Preliminary research on virtual thermal comfort of automobile occupants // *E3S Web of Conferences* 32, 01022 (2018).

6. SamrendraSingh, HesamAbbassi. 1D/3D transient HVAC thermal modeling of an off-highway machinery cabin using CFD-ANN hybrid method // *Applied Thermal Engineering* 135, 5 May 2018, Pages 406-417.

7. Zhang, H., Arens, E., Huizenga, C., Han, T.: Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: part I: local sensation of individual body parts. *J. Build. Environ.* 45, 380–388 (2010).

8. Fiala, D., Lomas, K.J., Stohrer, M.: Computer prediction of human thermoregulatory responses to a wide range of environmental conditions. *Int. J. Biometeorol.* 45, 143–159 (2001).

9. Lorenz, M., Fiala, D., Spinnler, M., Sattelmayer, T.: A Coupled Numerical Model to Predict Heat Transfer and Passenger thermal Comfort in Vehicle Cabins, SAE International, 2014–01-0664 (2014).

10. Horobet, T., Danca, P., Nastase, I., Bode, F. Preliminary research on virtual thermal comfort of automobile occupants // *E3S Web of Conferences* 32, 01022 (2018).

11. Dancă, P., Bode, F., Năstase, I., Croitoru, C.V., Meslem, A. Experimental and numerical study of the air distribution inside a car cabin // *E3S Web of Conferences* 85, 02014 (2019).

12. Yang, R., Zhang, H., You, S., Zheng, X., Ye, T. Study on the thermal comfort index of solar radiation conditions in winter // *Building and Environment* Volume 167, January 2020, 106456.

13. Xu, C., Li, S., Zhang, X. Application of the CPMV index to evaluating indoor thermal comfort in winter: Case study on an office building in Beijing // *Building and Environment* Volume 162, September 2019, 106295.

14. Chen, K., Kaushik, S., Han, T.: Thermal Comfort Prediction and Validation in a Realistic Vehicle Thermal Environment, SAE International, 2012–01-0645 (2012).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Якунин И.Н. Постановка задачи и проведение экспериментальной части исследования.

Якунин Н.Н. Статистическая обработка экспериментальных данных и выявление закономерностей.

Фаттахова А.Ф. Анализ ранее выполненных работ по тематике исследования.

Минатуллаев Ш.М. Проведение экспериментальной части исследования.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Ivan N. Yakunin. The statement of the task and experimental part of the study.

Nikolay N. Yakunin. Statistical processing of experimental data and patterns identification.

Almira F. Fattakhova. Analysis of previous work on the topic of the study.

Shamil M. Minatullaev Experimental part of the study

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Якунин Иван Николаевич – ведущий инженер по буровым растворам АО «Биотехальянс».

Якунин Николай Николаевич – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой автомобильного транспорта.

Фаттахова Альмира Файзулловна – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры автомобильного транспорта.

Минатуллаев Шамиль Минатуллаевич – канд. техн. наук, доц. кафедры технической эксплуатации автомобилей.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivan N. Yakunin – Leading Drilling Fluid Engineer AO Biotechalliance,

Nikolay N Yakunin – Dr. of Sci., Professor, Head of the Automobile Transport Department, Orenburg State University,

Almira F. Fattakhova – Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor of the Automobile Transport Department, Orenburg State University,

Shamil M. Minatullaev – Cand. of Sci., Associate Professor of the Automobile Technical Operation Department, M.M. Dzhambulatov Dagestan State Agrarian University

Научная статья

УДК 656.1, 625.748, 621.311.25

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-720-733>

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ ДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОТ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ

И.А. Анисимов¹, В.Е. Костин², В.С. Орлов², Д.Н. Паутов², А.С. Поляков³, А.В. Шурупов⁴

¹ ООО «Смарт СИ», г. Тюмень, Россия,

² ООО «Запсибэнергоаудит», г. Тюмень, Россия,

³ Российский университет транспорта, г. Москва, Россия,

⁴ ГБУ «МосТрансПроект», г. Москва, Россия

tkcc@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6712-9867>,

vekostin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5947-7327>,

orlov.vs@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3454-8221>,

pautov.dn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3714-0715>,

aspolyakov@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0002-2061-8890>,

alexey.shurupov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0972-4964>

АННОТАЦИЯ

Введение. С целью повышения безопасности и снижения аварийности объекты транспортной инфраструктуры оборудуются все большим числом дополнительных светосигнальных и осветительных устройств. В работе рассмотрены вопросы электрификации объектов транспортной инфраструктуры, проанализированы варианты организации автономного электроснабжения этих объектов, дана оценка возможностей применения различных типов генераторов, использующих возобновляемые источники электрической энергии.

Материалы и методы. Для проведения исследования авторами разработан экспериментальный образец автономного генератора, встраиваемого в искусственную дорожную неровность.

Результаты. Произведена оценка потребления электрической энергии светосигнальным и осветительным оборудованием нерегулируемого пешеходного перехода и выработки электрической энергии экспериментальным образцом генератора, встраиваемого в искусственную дорожную неровность.

Обсуждение и заключение. Дана оценка эффективности разработанного генератора, встраиваемого в искусственную дорожную неровность, для обеспечения электрической энергией светового оборудования нерегулируемого пешеходного перехода, выявлена недостаточная производительность экспериментального образца. Определены задачи дальнейшего исследования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автономный электрический генератор, искусственная дорожная неровность, электроснабжение объектов дорожной инфраструктуры

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы выражают благодарность С.О. Евстропову за помощь в разработке платы управления и Д.А. Дедюхину за помощь в разработке механической части автономного электрического генератора, встраиваемого в искусственную дорожную неровность, а также А.А. Восканяну за помощь в проведении натурных испытаний автономного электрического генератора, встраиваемого в искусственную дорожную неровность.

Статья поступила в редакцию 11.10.2021; одобрена после рецензирования 08.12.2021; принята к публикации 14.12.2021.

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: Электроснабжение объектов дорожной инфраструктуры от альтернативных источников / Анисимов И.А., Костин В.Е., Поляков А.С. [и др.] // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 6(82). С. 720-733. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-720-733>

© Анисимов И.А., Костин В.Е., Орлов В.С., Паутов Д.Н., Поляков А.С., Шурупов А.В., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-720-733>

POWER SUPPLY OF ROAD INFRASTRUCTURE OBJECTS FROM ALTERNATIVE SOURCES

Ilya A. Anisimov¹, Vadim E. Kostin², Vladimir S. Orlov², Dmitry N. Pautov²,
Alexander S. Polyakov³, Alexey V. Shurupov⁴

¹ OOO Smart SI, Tyumen, Russian Federation

² OOO Zapsibenergoaudit, Tyumen, Russian Federation

³ Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation

⁴ MosTransProekt State Budgetary Institution, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. To improve safety and reduce accidents, transport infrastructure facilities are equipped by the new additional light-signaling and lighting devices. The article discusses the electrification of transport infrastructure facilities, analyzes the options for implementing autonomous power supply of these facilities, and assesses the possibilities of using various types of generators on renewable energy sources.

Materials and methods. An experimental model of a generator based on alternative energy sources, built into a speed bump has been developed and manufactured.

Results. An assessment of the energy consumed by the light-signaling and lighting equipment of an unregulated pedestrian crossing and the electrical energy generated by an experimental model of a generator built into speed bump has been made.

Discussion and conclusions. An assessment of the efficiency of the developed generator, built into a speed bump, to provide electrical energy to the lighting equipment of an unregulated pedestrian crossing, was carried out, and the insufficient performance of the experimental sample was revealed. It is planned to solve these problems during the continuation of the study.

KEYWORDS: electric generator, speed bump, power supply of road infrastructure facilities

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors would like to thank Stanislav O. Evstropov for his help in developing the control board, Denis A. Dedyukhin for his help in developing the mechanical part of an autonomous electric generator built into an artificial road roughness, Armen A. Voskanyan for help in carrying out field tests of an autonomous electric generator built into an artificial road roughness.

The article was submitted 11.10.2021; approved after reviewing 08.12.2021; accepted for publication 14.12.2021.

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: Anisimov I.A., Kostin V.E., Orlov V.S., Pautov D.N., Polyakov A.S., Shurupov A.V. Power supply of road infrastructure objects from alternative sources. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2021; 18 (6): 720-733. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-720-733>

© Anisimov I.A., Kostin V.E., Orlov V.S., Pautov D.N., Polyakov A.S., Shurupov A.V., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения безопасности дорожного движения и снижения аварийности происходит увеличение оснащённости дорог элементами дорожной инфраструктуры: камеры для фотовидеофиксации дорожных событий, подсветка пешеходных переходов, установка светофоров на пешеходных переходах, подсветка дорожных знаков, установка устройств, предупреждающих водителя о приближении пешехода к переходу, а пешехода – о приближении автомобиля. Внедрение этих устройств в перспективе должно позволить решить поставленные задачи, но все эти устройства в процессе работы используют электрическую энергию, поэтому требуют либо подключения к электрической сети, что не всегда возможно, либо автономного электроснабжения. Это поднимает актуальность разработок в области электрогенераторов малой мощности, размещаемых в непосредственной близости от дорожного полотна или непосредственно на нём.

Авторами было принято решение провести изучение мирового опыта в области разработок автономных генераторов, использующих как возобновляемые источники энергии, так и кинетическую энергию движущихся транспортных средств. Проведенный научно-патентный поиск выявил несколько типов электрических генераторов:

- использующие энергию солнца [1, 2, 3, 4];
- использующие энергию ветра [5];

– использующие энергию движущихся транспортных средств [6, 7, 8];

– комбинированные установки, объединяющие в своем составе несколько установок предыдущих типов [9, 10, 11, 12].

Установки, использующие энергию солнца, и часть установок, использующих энергию ветра, предполагают размещение на открытых пространствах, что существенно ограничивает область их применения. Снижение солнечной активности в зимний период также накладывает существенные ограничения на возможности их применения [13, 14, 15, 16].

Вторая часть установок, основанных на использовании энергии ветра, использует энергию быстро движущихся потоков транспортных средств, что ограничивает область их применения автомагистралями. Для решения задач энергообеспечения объектов дорожной инфраструктуры, связанных с повышением безопасности пешеходных переходов, в условиях плотной городской застройки указанные типы энергогенерирующих установок не подходят [13, 17]. Поэтому авторы обратили особое внимание на установки, использующие кинетическую энергию движущихся транспортных средств. Особый интерес вызвали генераторы, встраиваемые в искусственную дорожную неровность. Выделено три основных типа подобных установок:

- с механической передачей энергии на генератор¹ [18, 19];
- с передачей энергии на генератор через пневматическую систему² [18, 20];

¹ Патент на полезную модель № RU205403 U1 Российская Федерация, МПК F03G 7/08. Дорожная энергетическая установка : № 2021110180 : заявл. 12.04.2021 : опубл. 13.07.2021 / Ю.М. Ляшенко, А.В. Прудий, М.Н. Колесник.

Патент № 2379550 C2 Российская Федерация, МПК F03G 7/08. Дорожное энергетическое устройство : № 2007148399/06 : заявл. 24.12.2007 : опубл. 20.01.2010 / А.С. Алиев, Р.А. Алиев, Р.Г. Казимагомедов, Ш.А. Магомедов.

Патент № 2743232 C1 Российская Федерация, МПК H02K 7/06, F03G 7/08. Энергогенерирующий привод для искусственной дорожной неровности : № 2019140803 : заявл. 10.12.2019 : опубл. 16.02.2021 / В.А. Дмитриев.

Патент № US4238687 United States, МПК F03G7/08, H02K7/1853. Highway turbine : №965177 : заявл. 30.11.1978, опубл. 09.12.1980 / Santiago Martinez

Патент № US8123431 United States, МПК E01F13/123, E01C9/00, F03G7/08, H02K7/1853, H02K7/06. Road-based electricity generator : № US13/108295 : заявл. 16.05.2011 : опубл. 28.02.2012 / Ron Chen, Zichron Ya'acov

Патент № WO1999066202A1 Slovakia, МПК F03G7/08. A method and a device for transformation and use of excessive kinetic and potential energy in deceleration/braking of moving bodies for production of electric power : № PCT/SK1998/000007 : заявл. 23.06.1998 : опубл. 23.12.1998 / Miroslav Remeta

Патент № US6204568B1 United States, МПК F04B33/00. Traffic-based energy conversion system: № 297251 : заявл. 16.09.1999 : опубл. 20.03.2001 / John Runner

² Патент № US1771200 United States, МПК F04B35/00. Traffic air compressor : № 402210 : заявл. 24.10.1929 : опубл. 22.07.1930 / Akers Oscar Balard

Патент № US2471673 United States, МПК F04B33/00. Weight-operated air pump : № 632527 : заявл. 03.12.1945 : опубл. 31.05.1949 / Charles Cote

Патент № US4173431 United States, МПК F04B 9/02; F04B 35/00. Road vehicle-actuated air compressor and system therefor : № 869780 : заявл. 16.01.1978 : опубл. 06.11.1979 / Roland L. Smith

• с выработкой электрической энергии пьезоэлементами³ [21, 22, 23, 24, 25].

Использование генераторов на пьезоэлементах ограничено их низким КПД и высокой стоимостью. Изготовление генераторов с пневматической передачей ограничивает значительные изгибающие нагрузки, изгибающие шток и сам поршень, приводящие к нарушению соосности, увеличению износа и ускоренному выходу генератора из строя. Поэтому в качестве основной схемы разрабатываемого устройства был выбран вариант с механической передачей энергии на генератор.

Однако все предполагаемые прототипы обладали рядом существенных недостатков. В патентах RU205403 «Дорожная энергетическая установка», US4238687 «Дорожный генератор», US8123431 «Дорожный электрический генератор» устройство предполагает нарушение целостности дорожного полотна и установку генератора в специальное помещение под дорогой, что на практике сложно реализуется и требует существенных затрат. Аналогично и в патенте RU2379550 «Дорожное энергетическое устройство», но в нем к необходимости создания помещения под дорогой добавляется общая сложность конструкции. Устройство

из патента RU2743232 «Энергогенерирующий привод для искусственной дорожной неровности» лишено указанных выше недостатков, так как размещается над дорожным полотном, но его установка без доработки невозможна вследствие ряда причин: нарушение действующих нормативов в связи с размещением непредусмотренных устройств на дорожном полотне, низкая надежность конструкции, снижение видимости и уменьшение тротуарного полотна, а также низкая антивандальная стойкость по причине размещения генератора над поверхностью земли. Авторами было принято решение на основе этих изделий разработать собственное устройство для проверки технической возможности изготовления подобного генератора, а также опытного определения возможных энергетических характеристик подобной установки на натурной модели.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Функциональная схема разработанного устройства представлена на рисунке 1, фотоизображение образца, установленного на экспериментальной площадке, приведено на рисунке 2.

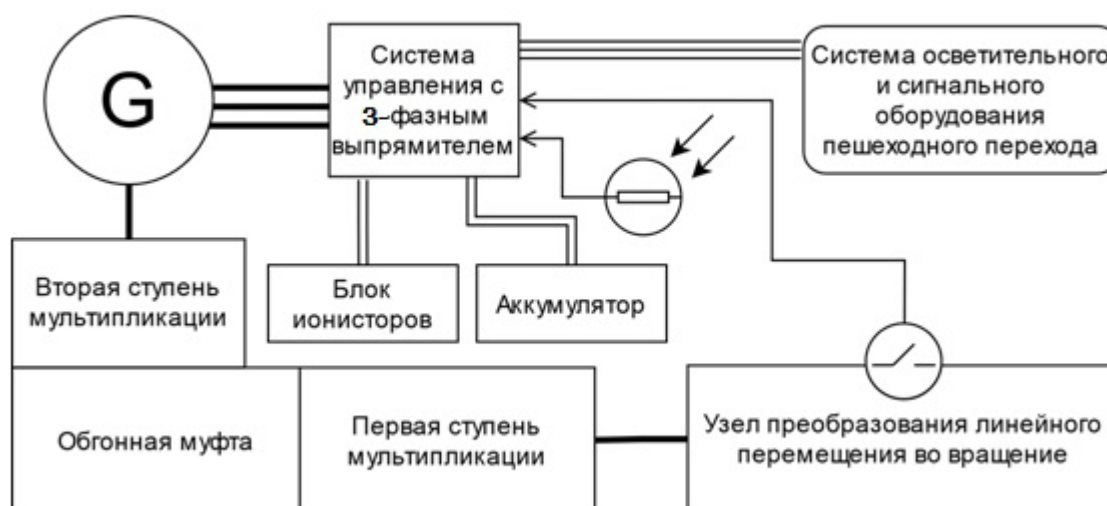


Рисунок 1 – Функциональная схема устройства

Figure 1 - Functional diagram of the device

³ Патент на полезную модель № 189058 U1 Российская Федерация, МПК F03G 7/08, H01M 10/60. Мобильный электромеханический генератор энергии : № 2019100133 : заявл. 09.01.2019 : опубл. 07.05.2019 / Д.С. Букатов.



Рисунок 2 – Опытный образец на экспериментальной площадке

Figure 2 – A prototype at the pilot site

Опытный образец генератора, встраиваемого в искусственную дорожную неровность, состоит из следующих элементов:

- подиума для размещения ИДН с генераторной установкой;
- ИДН-500 с вырезом для установки площадки нажатия;
- преобразователя поступательного движения во вращательное;
- двух цепных передач;
- промежуточного вала с обгонной муфтой;
- электрического генератора;
- свинцово-кислотного аккумулятора;
- платы управления зарядом аккумулятора и системой сигнального и осветительного оборудования пешеходного перехода;
- зарядно-балансирующей платы с блоком ионисторов (промежуточный накопитель);
- датчиков (освещенности и геркона);
- двух разъёмов для подключения осветительной, светоиндикаторной или звуковой аппаратуры мощностью до 8 Вт, рассчитанной на напряжение 12 В.

При нажатии на рабочий механизм устройства происходит преобразование поступа-

тельного движения площадки нажатия во вращательное движение первичного вала цепной передачи, который через обгонную муфту передает вращательное движение на электрический генератор, питающий первичный накопитель электрической энергии. В качестве первичного накопителя электрической энергии используется батарея из пяти ионисторов (суперконденсаторов), размещенная на зарядно-балансирующей плате.

При достижении на первичном накопителе электрической энергии напряжения в 3,7 В через DC/DC преобразователь начинается процесс подзарядки основного накопителя. В качестве основного накопителя электрической энергии используется необслуживаемая свинцово-кислотная аккумуляторная батарея напряжением 12 В, емкостью 7,2 А·ч. Для предотвращения заряда ионисторов и аккумуляторной батареи повышенным напряжением при достижении напряжения 14 В на батарее ионисторов происходит отключение генератора. Вторая ступень защиты представляет собой балансирующую плату, защищающую ионисторы от напряжения свыше 3 В, сброс избыточной мощности производится на резисторы.

Плата управления имеет два выхода 12 В для подключения потребителей мощностью до 8 Вт и два режима работы:

- питание светильника мощностью 6,5 Вт, который включается на 4 сек при проезде автомобилем искусственной дорожной неровности в условиях недостаточной освещенности окружающего пространства;
- питание односекционного желтого светофора типа Т7, обозначающего подъезд к пешеходному переходу, с выдачей однополярного импульсного пульсирующего сигнала с частотой 1 Гц.

Произведем оценку энергии, вырабатываемой образцом генератора в различных режимах. Для этого произведем серию измерений напряжения на промежуточном накопителе (батареи ионисторов) при нажатии на площадку в различных режимах.

Энергия заряженного конденсатора определяется по формуле

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2}, \quad (1)$$

где C – ёмкость батареи конденсаторов, Ф;

U – напряжение на батарее конденсаторов, В.

Тогда энергия серии нажатий определится по формуле

$$W = \frac{C \cdot (U_n^2 - U_{n-1}^2)}{2}, \quad (2)$$

где U_n – напряжение на батарее конденсаторов после серии нажатий, В;

U_{n-1} – напряжение на батарее конденсаторов до серии нажатий, В.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На первом этапе исследований воздействие на площадку нажатия осуществляется исследователями в ручном режиме с силой от 850 до 950 Н сериями по 6 нажатий, с замерами напряжения на батарее ионисторов, начиная с полностью разряженного накопителя и заканчивая напряжением 9 В. Отметка в 9 В была достигнута после 40 серий из 6 нажатий, результаты измерений напряжения на батарее ионисторов и результаты расчета выработанной электрической энергии в графической форме представлены на рисунках 3, 4, 5.

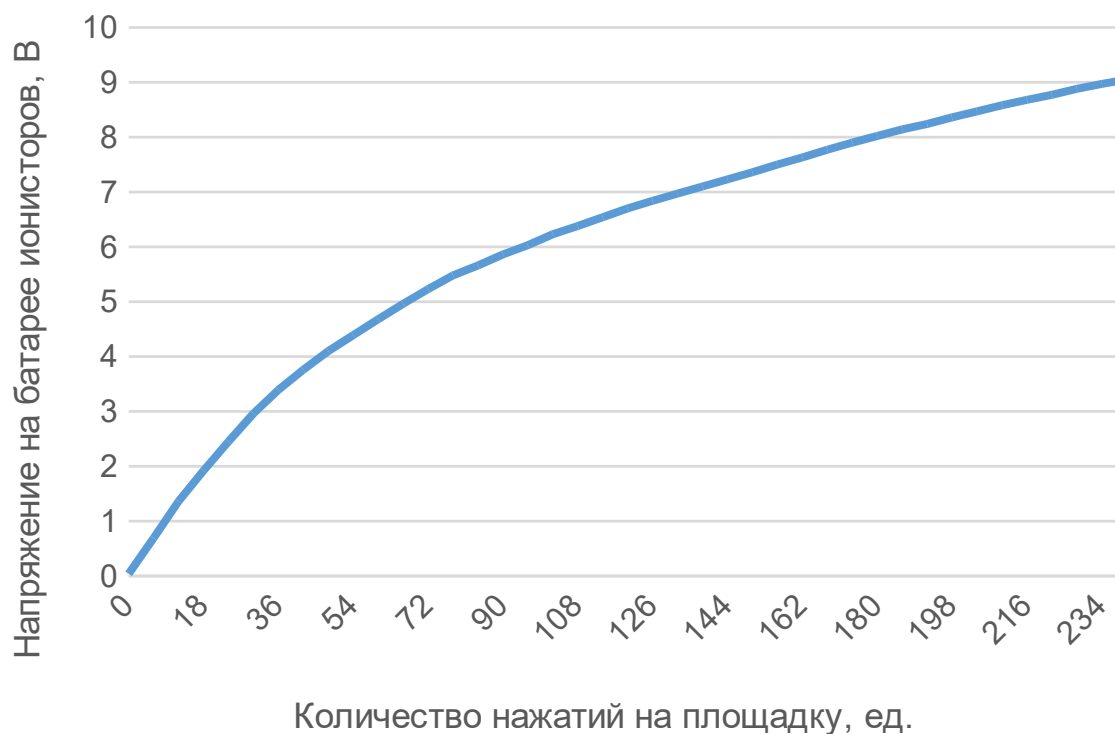


Рисунок 3 – Изменение напряжения на батарее ионисторов

Figure 3 – Voltage variation on the ioniser battery



Рисунок 4 – Энергия, получаемая с одного нажатия при различном уровне заряда на батарее ионисторов

Figure 4 – Energy obtained from a single pressure at different charge levels on a battery of ionists

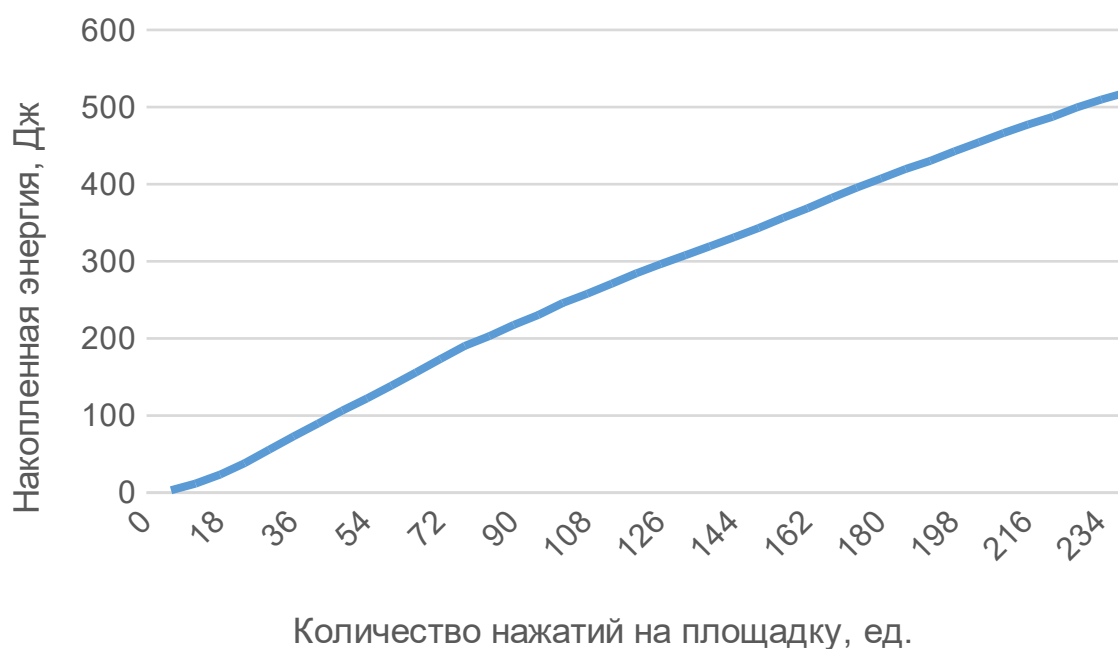


Рисунок 5 – Накопление энергии на батарее ионисторов

Figure 5 – Energy storage on a battery of ionists

Из графика, представленного на рисунке 4, можно сделать вывод: при низком значении напряжения на ионисторах (до 2 В) большая часть энергии, вырабатываемой генератором, тратится на нагрев его обмоток. В связи с этим исключим из дальнейших расчётов выработку энергии ионисторами на напряжении до 2 В. Важно отметить, что в нормальном режиме работы системы напряжение на ионисторах не опустится ниже отметки в 3 В. Тогда среднее значение вырабатываемой энергии от одного нажатия на педаль составит

$$W = \frac{W_{19} + W_{20} + \dots + W_{240}}{222} = 13,34 \text{ Дж.} \quad (3)$$

Важно отметить, что при этом максимальное значение вырабатываемой генератором энергии приходится на диапазон напряжений

от 3 В до 5 В. Однако максимальная эффективность преобразователя напряжения, отвечающего за заряд основного накопителя, наблюдается в диапазоне от 6 В до 9 В. Поэтому на втором этапе исследований выработку электрической энергии будем оценивать в этом диапазоне.

На втором этапе экспериментального исследования произведем оценку энергии, вырабатываемой экспериментальным образцом генератора при проезде автомобиля. В эксперименте приняли участие два автомобиля: Volvo S60 и Mercedes-Benz Smart. Измерения выполним аналогичным образом с некоторыми отличиями: серии производятся по два нажатия (при наезде передним и задним колесом автомобиля) с фиксацией параметров до и после проезда. Результаты измерений и расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1
Изменение напряжения на батарее ионисторов при проезде автомобиля

Table 1
Variation of voltage on a battery of ionists while driving a car

	Напряжение, В		Энергия, Дж	
	в начале	в конце	в опыте	среднее
Volvo XC70	6,47	6,58	54,5	54,3
	6,51	6,62	54,9	
	6,67	6,78	56,2	
	6,7	6,81	56,5	
	6,81	6,91	52,1	
	6,85	6,95	52,4	
	6,95	7,07	63,9	
	7,12	7,22	54,5	
	7,19	7,29	55,0	
	7,35	7,44	50,6	
	7,45	7,54	51,3	
	7,52	7,61	51,7	
	7,64	7,73	52,6	
Smart	6,56	6,65	45,2	45,1
	6,59	6,68	45,4	
	6,61	6,72	55,7	
	7,05	7,12	37,7	
	7,27	7,35	44,4	
	7,41	7,49	45,3	
	7,58	7,66	46,3	
	7,7	7,77	41,2	

Среднее значение выработки электрической энергии генератором от проезда автомобиля составило 49,7 Дж, за одно нажатие на площадку – 24,85 Дж.

На третьем этапе исследований производилась оценка потребности в электрической энергии осветительным и сигнальным оборудованием пешеходного перехода. Оценивались потребности для работы светофора типа Т7, предупреждающего водителя о приближении к пешеходному переходу, и светодиодного светильника, обеспечивающего освещение пе-

шеходного перехода. Для этого были измерены значения токов и напряжений на аккумуляторной батарее при включении оборудования.

Поскольку светильник, обеспечивающий дополнительное освещение пешеходного перехода, включается на ограниченное время при каждом проезде автомобиля в ночное время, то измерения произведены для одного цикла работы (4 сек). Для светофора типа Т7 оценку потребления проведем для промежутка времени в одну минуту. Результаты измерений и расчётов представим в таблице 2.

Таблица 2
Потребление электрической энергии оборудованием комплекса

Table 2
Electrical energy consumption of the complex equipment

Тип потребителя	Ток, А	Напряжение, В	Энергия, Дж	
			в опыте	среднее
Мигающий желтый светофор типа Т7 (1 мин)	0,30	13,2	73,2	73,2
	0,31	13,1	73,2	
	0,31	13	73,2	
Белый светодиодный светильник, обеспечивающий освещение пешеходного перехода (4 сек)	0,52	13,1	27,2	27,0
	0,53	13	27,6	
	0,51	12,9	26,3	

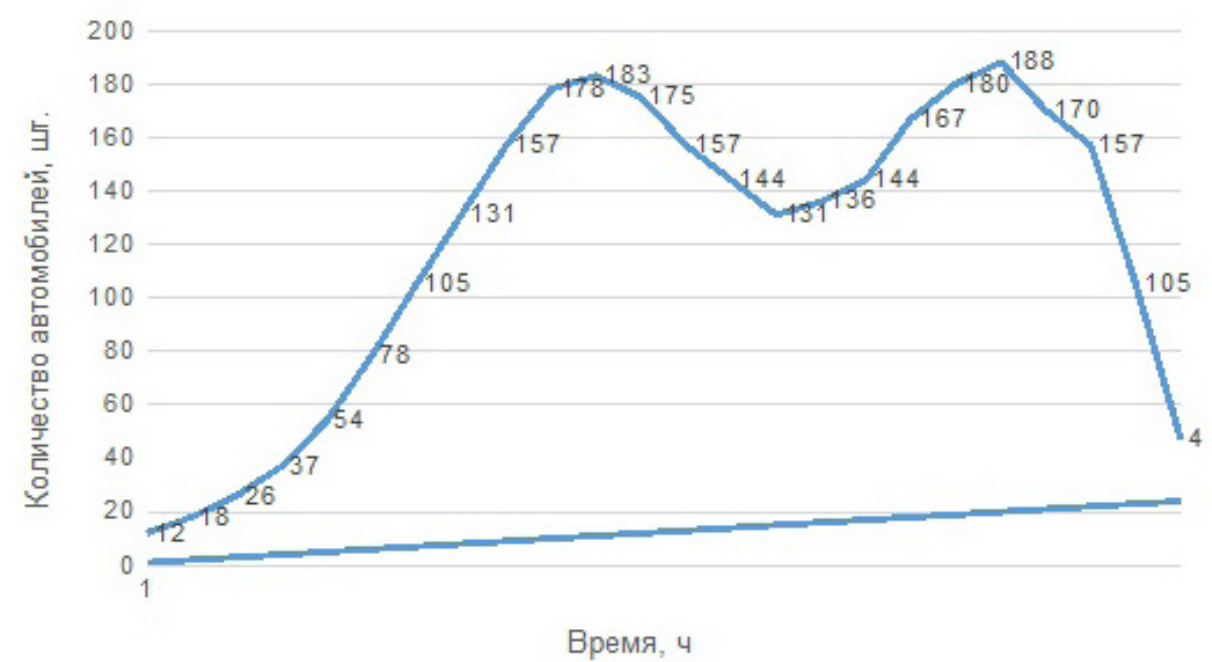


Рисунок 6 – Типовое распределение интенсивности движения в течение суток

Figure 6 - Typical intensity distribution of traffic during the day

Поскольку светосигнальная система, предупреждающая водителя о приближении к пешеходному переходу, работает непрерывно, умножим среднее минутное потребление системы на количество минут в сутках:

$$W = 73,2 \cdot 60 \cdot 24 = 105\,104 \text{ Дж} = 29,2 \text{ Вт} \cdot \text{ч} . \quad (4)$$

Для оценки затрат электрической энергии на работу светильника, обеспечивающего дополнительное освещение пешеходного перехода в ночное время при приближении автомобиля, зададимся минимальной продолжительностью светового дня. Для г. Москвы минимальная продолжительность светового дня составляет 7 ч. Соответственно, макси-

мальное время работы осветительного оборудования в ночном режиме – 17 ч. Зададимся интенсивностью движения автотранспортных средств на уровне 2880 машин в сутки (средняя интенсивность – 2 машины в минуту). В течение суток автомобильный поток распределяется неравномерно. Типовое распределение интенсивности движения на рисунке 6.

Произведем расчет потребности в электрической энергии, необходимой для питания дополнительного освещения пешеходного перехода, путём умножения энергии, потребляемой в одном цикле работы на количество машин в час. Результаты расчетов представим в таблице 3.

Таким образом, суммарный суточный расход электрической энергии на питание белого фонаря составляет 44 064 Дж (12,2 Вт·ч).

Таблица 3
Потребление электрической энергии осветительной установкой

Table 3
Electric power consumption of lighting installation

Время, ч	Количество машин, шт.			Потребление, Дж
	всего	светлое	темное	
1	12		12	324
2	18		18	486
3	26		26	702
4	37		37	999
5	54		54	1458
6	78		78	2106
7	105		105	2835
8	131		131	3537
9	157		157	4239
10	178	178		0
11	183	183		0
12	175	175		0
13	157	157		0
14	144	144		0
15	131	131		0
16	136	136		0
17	144	144		0
18	167		167	4509
19	180		180	4860
20	188		188	5076
21	170		170	4590
22	157		157	4239
23	105		105	2835
24	47		47	1269
Итого	2880	1248	1632	44064

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проезде одного автомобиля вырабатывается 49,7 Дж электрической энергии (см. таблицу 2). Соответственно в течение суток будет выработано и подано на первичный накопитель (батарею ионисторов):

$$49,7 \cdot 2880 = 143\,136 \text{ Дж} = 40 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

С учетом коэффициента полезного действия преобразователя постоянного тока, управляющего зарядом аккумуляторной батареи, равного 75%, после повышения напряжения с 4–11 В (на первичном накопителе) до 12–13 В (на аккумуляторной батарее) получим полезную энергию, подаваемую на основной накопитель (свинцово-кислотную аккумуляторную батарею) и потребителям

$$143\,136 \cdot 0,75 = 107\,352 \text{ Дж} = 30 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

Как видно из расчетов, электрическая энергия, в течение суток вырабатываемая генератором, встроенным в искусственную дорожную неровность, полностью покрывает потребление мигающего светофора Т7, равное 29,2 Вт·ч, или белого светодиодного фонаря мощностью 6,5 Вт, обеспечивающего дополнительное освещение пешеходного перехода, которое составляет 12,2 Вт·ч. Но этого недостаточно для питания обеих установок.

На основании этого можно сделать вывод о наличии технической возможности электропитания объектов транспортной инфраструктуры от автономного электрического генератора, встраиваемого в искусственную дорожную неровность и работающего непосредственно от проезжающего транспорта. Подобное устройство может быть использовано на автомобильных дорогах со средней интенсивностью движения на уровне 2 автомобилей в минуту на широте г. Москвы.

Проведенные исследования позволили сделать вывод о возможности применения разработанного генератора на территории г. Москвы и о необходимости улучшения конструкции устройства с целью увеличения на 25% вырабатываемой электрической энергии для покрытия всех потребностей устанавливаемого на нерегулируемых переходах светотехнического оборудования.

В настоящее время разработанное устройство проходит опытную эксплуатацию на базе ГБУ «МосТрансПроект» (г. Москва) для выявления «узких» мест в конструкции устройства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Patil S. et al. Energy Generation and Implementation of Power Floor (Pavegen) // *Energy*. 2019. 6(04).
2. The Renewable Energy In A Led Standalone Streetlight / D. Vitali, F. Garbuglia, V. D'alessandro, R. Ricci // *International Journal of Energy Production and Management*. 2017. 2(1): 118-128. – DOI 10.2495/EQ-V2-N1-118-129.
3. Рыжова А.С. Применение технологий с использованием солнечных элементов на автомобильном транспорте // *Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования*. 2016. Т. 3, № 2(5). С. 178–181. DOI 10.12737/20167.
4. Сычикова Я.А. Фотоэлектрические преобразователи энергии на основе наноструктурированных материалов для обеспечения энергоэффективности и энергосбережения // *Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования*. 2016. Т. 3, № 3(6). С. 67–71.
5. Hashem and M.H. Mohamed, "Aerodynamics Performance Enhancements of an H-rotor Darrieus Wind Turbine", (*Energy*), Vol.142, January 2018, pp. 531–545.
6. Wang C., Bairagi P., Ghatge R., Patil S. PNEUMATIC AND ELECTRIC ENERGY GENERATION USING SPRING BACK MECHANISM. – 2019. et al. Preparation and performance research of stacked piezoelectric energy-harvesting units for pavements // *Energy and Buildings*. – 2019. – Т. 183. – С. 581-591.
7. Zhang C. L. et al. Energy harvesting from a dynamic vibro-impact dielectric elastomer generator subjected to rotational excitations // *Nonlinear Dynamics*. – 2020. – Т. 102. – №. 3. – С. 1271-1284.
8. Bairagi P., Ghatge R., Patil S. Pneumatic and electric energy generation using spring back mechanism. – 2019.
9. Samrudhi Vaidya, "Design of the Hybrid Streetlight System using a Solar and Wind Turbine", (*International Journal of Engineering Research & Technology*, IJERT), Vol. 8, Issue 04, April 2019.
10. Om Singhal, Sakya Kanuparth, Shloka Hajare, Abhinav Vishwakarma, Kapil Dev, and Karan Kumar Shaw, "Design and optimization of standalone hybrid street light", AIP Conference Proceedings 2341, 020019 (2021) <https://doi.org/10.1063/5.0050165>
11. Wilson R. Nyembia, Simon Chinguwa, Innocent Mushanguri and Charles Mbohwa, "Optimization of the Design and Manufacture of a Solar-Wind Hybrid Street Light" (2nd International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing, SMPM 2019), ELSEVIER 285–290.
12. Nguyen V. C., Wang C. T., Hsieh Y. J. Electrification of Highway Transportation with Solar and Wind Energy // *Sustainability*. – 2021. – Т. 13. – №. 10. – С. 5456.

13. Burakova, A.D. Evaluation of the operation efficiency of solar panels in winter [Electronic source] / A.D.Burakova, L.N. Burakova, I.A. Anisimov and O.D. Burakova // IOP Conference Series: Earth Environmental Science - 2017 - Vol. 72 Article number 012022 - Access mode: DOI: 10.1088/1755-1315/72/1/012022
14. Coutu Jr R. A. et al. Testing Photovoltaic Pavers for Roadway Applications //Sustainability in Environment. – 2019.
15. Перспективы обеспечения автомобильных дорог альтернативными источниками электрической энергии и тепла / Я.В. Васильев, Е.В. Голов, Б.С. Доброборский, Е.Е. Медрес // Проблемы науки. 2017. № 4(17). С. 28–31.
16. Павлова А.И. Использование альтернативных источников энергии для освещения опасных участков автомобильных дорог // Молодой ученый. 2015. № 20(100). С. 58–61.
17. Буракова О.Д., Анисимов И.А. Снижение затрат на обустройство нерегулируемых пешеходных переходов, согласно типовых схем // Техника и технологии строительства. 2015. № 3(3). С. 8–14.
18. Duarte F., Ferreira A. Energy harvesting on road pavements: state of the art // Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy. – 2016. – Т. 169. – №. 2. – С. 79-90.
19. Ahmad S., Abdul Mujeeb M., Farooqi M. A. Energy harvesting from pavements and roadways: A comprehensive review of technologies, materials, and challenges //International Journal of Energy Research. – 2019. – Т. 43. – №. 6. – С. 1974-2015.
20. Castillo-García G. et al. Energy harvesting from vehicular traffic over speed bumps: a review / Castillo-García G. et al. // Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy. – 2018. – Т. 171. – №. 2. – С. 58-69.
21. Гриценко А., Никифоров В., Щеголева Т. Состояние и перспективы развития пьезоэлектрических генераторов // Компоненты и технологии. 2012. № 9(134). С. 63–68.
22. Некоторые перспективные конструкции пьезоэлектрических генераторов энергии / А. Чуприн, Р. Гаврилов, С. Генералов, С. Никифоров // Наноиндустрия. 2016. № 2(64). С. 48–57.
23. Никифоров В.Г., Дайнеко А.В., Гриценко А.Л. Состояние и перспективы развития пьезоэлектрических генераторов // Нано- и микросистемная техника. 2020. Т. 22, № 2. С. 102–111. DOI 10.17587/nmst.22.102-111.
24. Brenes A. et al. Maximum power point of piezoelectric energy harvesters: a review of optimality condition for electrical tuning // Smart materials and structures. – 2020. – Т. 29. – №. 3. – С. 033001.
25. Covaci C., Gontean A. Piezoelectric energy harvesting solutions: A review // Sensors. – 2020. – Т. 20. – No. 12. – С. 3512.
2. The Renewable Energy In A Led Standalone Streetlight / D. Vitali, F. Garbuglia, V. D'alessandro, R. Ricci // *International Journal of Energy Production and Management*. 2017. 2 (1): 118-128. – DOI 10.2495/EQ-V2-N1-118-129.
3. Ryzhova A.S. Primenenie tehnologij s ispol'zovaniem solnechnyh jelementov na avtomobil'nom transporte [Application of technology using solar cells in road transport] // *Alternative energy sources in the transport and technological complex: problems and prospects for rational use*. 2016. 3. 2 (5): 178-181. - DOI 10.12737 / 20167. (in Russian)
4. Sychikova Ya. A. Fotojelektricheskie preobrazovateli energii na osnove nanostrukturirovannykh materialov dlja obespechenija jenergojeffektivnosti i jenergosberezhenija [Photoelectric energy converters based on nanostructured materials to ensure energy efficiency and energy saving] / Ya. A. Sychikova // *Alternative energy sources in the transport and technological complex: problems and prospects of rational use*. 2016. 3. 3 (6): 67-71. (in Russian)
5. Hashem and M.H. Mohamed, "Aerodynamics Performance Enhancements of an H-rotor Darrieus Wind Turbine", (*Energy*), January 2018. 142: 531–545.
6. Wang C. et al. Preparation and performance research of stacked piezoelectric energy-harvesting units for pavements // *Energy and Buildings*. 2019. 183: 581-591.
7. Zhang C. L. et al. Energy harvesting from a dynamic vibro-impact dielectric elastomer generator subjected to rotational excitations // *Nonlinear Dynamics*. 2020. 102(3): 1271-1284.
8. Bairagi P., Ghate R., Patil S. PNEUMATIC AND ELECTRIC ENERGY GENERATION USING SPRING BACK MECHANISM. 2019.
9. Samrudhi Vaidya, "Design of the Hybrid Streetlight System using a Solar and Wind Turbine", (*International Journal of Engineering Research & Technology, IJERT*), April 2019. 8, 04.
10. Om Singhal, Sakya Kanuparth, Shloka Hajare, Abhinav Vishwakarma, Kapil Dev, and Karan Kumar Shaw , "Design and optimization of standalone hybrid street light", AIP Conference Proceedings 2341, 020019 (2021) <https://doi.org/10.1063/5.0050165>
11. Wilson R. Nyembia, Simon Chinguwa, Innocent Mushanguri and Charles Mbohwa, "Optimization of the Design and Manufacture of a Solar-Wind Hybrid Street Light" (2nd International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing, SMPM 2019), ELSEVIER 285–290.
12. Nguyen V. C., Wang C. T., Hsieh Y. J. Electrification of Highway Transportation with Solar and Wind Energy // *Sustainability*. 2021. 13(10): 5456.
13. Burakova, A.D. Evaluation of the operation efficiency of solar panels in winter [Electronic source] / A.D.Burakova, L.N. Burakova, I.A. Anisimov and O.D. Burakova // IOP Conference Series: Earth Environmental Science 2017 72 Article number 012022 Access mode: DOI: 10.1088/1755-1315/72/1/012022
14. Coutu Jr R. A. et al. Testing Photovoltaic Pavers for Roadway Applications // *Sustainability in Environment*. 2019.

REFERENCES

1. Patil S. et al. Energy Generation and Implementation of Power Floor (Pavegen) // *Energy*. 2019. 6. (04).

15. Perspektivy obespecheniya avtomobil'nyh dorog al'ternativnymi istochnikami jelektricheskoy jenerгии i tepla [Prospects for providing highways with alternative sources of electrical energy and heat] / Ya. V. Vasiliev, E.V. Golov, B.S. Dobroborskiy, E.E. Madras // *Problems of Science*. 2017. 4 (17): 28-31. (in Russian)
16. Pavlova, A.I. Ispol'zovanie al'ternativnyh istochnikov jenerгии dlya osveshheniya opasnyh uchastkov avtomobil'nyh dorog [Use of alternative energy sources to illuminate dangerous sections of highways] // *Young scientist*. 2015. 20 (100): 58-61. (in Russian)
17. Burakova, O.D. Snizhenie zatrat na obustroystvo nereguliruemym peshehodnyh perehodov, soglasno tipovyh shem [Reducing the cost of equipping unregulated pedestrian crossings] // *Engineering and construction technologies*. 2015. 3 (3): 8-14.
18. Duarte F., Ferreira A. Energy harvesting on road pavements: state of the art // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy*. 2016. 169(2): 79-90.
19. Ahmad S., Abdul Mujeebu M., Farooqi M. A. Energy harvesting from pavements and roadways: A comprehensive review of technologies, materials, and challenges // *International Journal of Energy Research*. 2019. 43(6): 1974-2015.
20. Castillo-García G. et al. Energy harvesting from vehicular traffic over speed bumps: a review / Castillo-García G. et al. // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy*. 2018. 171(2): 58-69.
21. Gritsenko, A. Sostojanie i perspektivy razvitiya p'ezojelektricheskikh generatorov [State and development prospects of piezoelectric generators] // *Components and technologies*. 2012. 9 (134): 63-68. (in Russian)
22. Nekotorye perspektivnye konstrukcii p'ezojelektricheskikh generatorov jenerгии [Some promising designs of piezoelectric power generators] / A. Chuprin, R. Gavrilov, S. Generalov, S. Nikiforov // *Nanoindustry*. 2016. 2 (64): 48-57. (in Russian)
23. Nikiforov, V. G. Sostojanie i perspektivy razvitiya p'ezojelektricheskikh generatorov [State and development prospects of piezoelectric generators] // *Nano and microsystem technology*. 2020. 22(2): 102-111. DOI 10.17587 / nmst.22.102-111. (in Russian)
24. Brenes A. et al. Maximum power point of piezoelectric energy harvesters: a review of optimality condition for electrical tuning // *Smart materials and structures*. 2020. 29(3): 033001.
25. Covaci C., Gontean A. Piezoelectric energy harvesting solutions: A review // *Sensors*. 2020. 20(12): 3512..

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Анисимов И.А. Постановка целей и задач исследования, выбор типа генератора, разработка основных проектных решений по механической части генератора.

Костин В.Е. Разработка электрической схемы и системы управления экспериментального образца электрического генератора.

Орлов В.С. Научно-патентный поиск, определение требуемых параметров элементов экспериментального образца генератора, определение фактических электрических характеристик экспериментального образца генератора и светотехнического оборудования.

Паутов Д.Н. Разработка программы и методики испытаний экспериментального образца генератора и светотехнического оборудования, проведение исследований.

Поляков А.С. Оценка потребностей электрической энергии светосигнальным и осветительным оборудованием нерегулируемого пешеходного перехода.

Шурупов А.В. Определение исходных требований к экспериментальному образцу электрического генератора, встраиваемого в искусственную дорожную неровность, верификация результатов исследования, проведение ресурсных испытаний.

AUTORS' CONTRIBUTION

Ilya A. Anisimov: setting the goals and objectives of the study, generator type selection, developing the main design solutions for the mechanical part of the generator

Vadim E. Kostin: development of an electrical circuit and a control system for an experimental model of an electric generator.

Vladimir S. Orlov: scientific and patent search, determination of the required parameters of the elements of the experimental sample of the generator, determination of the electrical characteristics of the experimental sample of the generator and lighting equipment.

Dmitry N. Pautov: development of a program and methodology for testing an experimental model of a generator and lighting equipment, research.

Aleksandr S. Polyakov: assessment of electricity requirements for light signal and lighting equipment for unregulated pedestrian crossing equipment

Aleksey V. Shurupov: determination of the initial requirements for an experimental model of an electric generator built into speed bump, verification of the research results.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Анисимов Илья Александрович – канд. техн. наук, доц., генеральный директор ООО «Смарт СИ».

Костин Вадим Евгеньевич – генеральный директор ООО «Запсибэнергоаудит».

Орлов Владимир Сергеевич – главный инженер ООО «Запсибэнергоаудит».

Паутов Дмитрий Николаевич – канд. техн. наук, доц., директор по развитию ООО «Запсибэнергоаудит».

Поляков Александр Сергеевич – канд. техн. наук, проф. кафедры «Высокоскоростные транспортные системы».

Шурупов Алексей Вячеславович – директор по качеству ГБУ «МосТрансПроект».

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Ilya A. Anisimov, Candidate of Technical Sciences, Docent, General Director of Smart SI LLC.

Vadim E. Kostin, General Director of Zapsibenergoaudit LLC.

Vladimir S. Orlov, Chief Engineer of Zapsibenergoaudit LLC.

Dmitry N. Pautov, Candidate of Technical Sciences, Docent, Development Director of Zapsibenergoaudit LLC

Alexander S. Polyakov, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of High-Speed Transport Systems, Russian University of Transport.

Alexey V. Shurupov, Quality Director, State-funded Budgetary Institution MosTransProekt.

Научная статья

УДК 629.083

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-734-745>

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ШИН АВТОМОБИЛЕЙ

Н.В. Хольшев¹, Д.Н. Коновалов¹, А.В. Прохоров¹, П.С. Минаев²¹Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия²Автосалон ŠKODA ООО «Автомобилет», г. Тамбов, Россияxhb@live.ru <https://orcid.org/0000-0002-8468-6593>,kdn1979dom@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-9366-8661>,prohorov.av@mail.tstu.ru <https://orcid.org/0000-0002-0635-6193>,minaevpavel25@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-3500-6800>

АННОТАЦИЯ

Введение. Автомобильное транспортное средство состоит из большого количества деталей, по-разному влияющих на безопасность движения. К элементам, критически влияющим на безопасность транспортного средства, относятся автомобильные пневматические шины. Их техническое состояние в настоящее время оценивается визуально, без применения специального оборудования. Такой способ диагностики не обеспечивает выявления скрытых повреждений шин. В данной статье приводится описание предлагаемого способа диагностирования пневматических шин легковых автомобилей, а также схема стенда для его реализации.

Материалы и методы. На основании предыдущих исследований было предложено использовать статическую жесткость автомобильных шин в качестве диагностического параметра при оценке их технического состояния. Для реализации использования данного диагностического параметра был предложен новый метод оценки технического состояния шин. Он заключается в определении и сравнении значений статической жесткости шины в различных ее точках с усредненным значением жесткости во всех точках измерения. Для реализации данного метода в лабораторных условиях была предложена принципиальная схема стенда.

Результаты. В соответствии с предложенной схемой стенда была разработана объемная модель стенда для реализации предлагаемого метода в лабораторных условиях, а также изготовлена рама стенда и подобраны основные его элементы. В качестве преобразователя вращательных движений ручки потенциометра в электронный сигнал было решено использовать аналого-цифровой преобразователь Arduino Uno R3. Также была осуществлена разработка программного обеспечения для автоматизации считывания и обработки результатов диагностирования шин.

Обсуждение и заключение. Предложенный метод диагностирования шин и стенд, его реализующий, могут повысить оперативность и простоту оценки технического состояния пневматических шин легковых автомобилей. Для оценки эффективности предложенных решений необходимы дальнейшие исследования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автомобильная пневматическая шина, диагностирование шин, скрытые повреждения шин, статическая жесткость шины

Статья поступила в редакцию 31.10.2021; одобрена после рецензирования 05.12.2021; принята к публикации 14.12.2021.

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: Хольшев Н.В., Коновалов Д.Н., Прохоров А.В., Минаев П.С. Лабораторный стенд для диагностирования шин автомобилей // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 6(82). С. 734-745. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-734-745>

© Хольшев Н.В., Коновалов Д.Н., Прохоров А.В., Минаев П.С., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-734-745>

LABORATORY STAND FOR CAR TIRE DIAGNOSTICS

Nikolay V. Holshev¹, Pavel S. Minaev², Dmitry N. Konovalov³, Alexey V. Prokhorov⁴

¹Tambov State Technical University, Tambov, Russia
²ŠKODA Car Dealership OOO Avtoritet, Tambov, Russia

ABSTRACT

Introduction. An automobile vehicle consists of a large number of parts that affect traffic safety in different ways. The elements that critically affect the safety of the vehicle include automobile pneumatic tires. Their technical condition is currently being assessed visually, without the use of special equipment. This diagnostic method does not provide detection of hidden tire damage. This article describes the proposed method of diagnosing pneumatic tires of passenger cars, as well as the scheme of the stand for its implementation.

Materials and methods. Based on previous studies, it was proposed to use the static stiffness of automobile tires as a diagnostic parameter when assessing their technical condition. To implement the use of this diagnostic parameter, a new method for assessing the technical condition of tires was proposed. It consists in determining and comparing the values of the static stiffness of the tire at its various points with the average stiffness value at all measurement points. To implement this method in the laboratory, a schematic diagram of the stand was proposed.

Results. In accordance with the proposed scheme of the stand, a volumetric model of the stand was developed for the implementation of the proposed method in laboratory conditions, and the frame of the stand was made and its main elements were selected. As a converter of the rotational movements of the potentiometer handle into the electronic signal, it was decided to use the Arduino Uno R3 analog-to-digital converter. Software was also developed to automate the reading and processing of bus diagnostic results.

Discussion and conclusions. The proposed method of tire diagnostics and the stand implementing it can increase the efficiency and simplicity of assessing the technical condition of pneumatic tires of passenger cars. Further research is needed to assess the effectiveness of the proposed solutions.

KEYWORDS: automobile pneumatic tire, tire diagnostics, hidden tire damage, static tire stiffness.

The article was submitted 31.10.2021; approved after reviewing 05.12.2021; accepted for publication 14.12.2021.

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: Holshev N.V., Konovalov D.N., Prokhorov A.V., Minaev P.S. Laboratory stand for car tire diagnostics. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2021; 18 (6): 734-745. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-734-745>

© N.V. Holshev, Minaev P.S., Konovalov D.N., Prokhorov A.V., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Ежедневно на территории Российской Федерации происходят дорожно-транспортные происшествия различной степени тяжести. По данным ФКУ «Научный центр безопасности дорожного движения Министерства внутренних дел Российской Федерации», в 2020 г. «на территории страны произошло 145 073 дорожно-транспортных происшествий, в которых погибли и (или) были ранены люди»¹. Причины этих происшествий различны. Прежде всего, это не соблюдение участниками движения правил дорожного движения и неудовлетворительное состояние улично-дорожной сети и железнодорожных переездов, а также ДТП, вызванные техническими неисправностями транспортных средств. За 2020 г. по этой причине произошло 7658 ДТП (5,3% от общего числа ДТП)¹. Автомобиль состоит из множества агрегатов, систем, узлов и деталей, по-разному влияющих на безопасность дорожного движения. Относительно небольшая доля элементов автомобиля является критической с точки зрения влияния на появление ДТП. К таким элементам можно отнести и автомобильные шины. Выход из строя шины при движении автомобиля может привести к серьезным происшествиям [1, 2]. Поэтому так важно полноценно оценивать их техническое состояние. В настоящее время вся диагностика шин сводится к визуальному ее осмотру на предмет наличия трещин, порезов, грыж, а также к проверке величины давления в колесе и контролю высоты протектора [3, 4, 5]. В последнее время стала активно развиваться и внедряться система контроля давления в шинах (TPMS), которая обеспечивает непрерывный контроль давления в шинах [3]. За рубежом активно занимаются вопросами создания и внедрения «интеллектуальной» шины с встраиванием в нее различных датчиков, считывающих в реальном времени ее параметры (давление, температуру, износ протектора) и условия движения (коэффициент сцепления колес с дорогой, является ли дорога мокрой, заснеженной или обледенелой) и передаю-

щих их в бортовую систему автомобиля [3, 6, 7, 8]. Разработкой подобных шин занимаются прежде всего такие мировые бренды, как Continental, Michelin, Nokian, Bridgestone и др. Такие системы эффективны при относительно небольших утечках воздуха, они своевременно оповестят водителя о снижении давления, снизив тем самым возможность аварийной ситуации. На данный момент такие шины массового применения не получили, да и стоимость их выше обычных.

В ряде случаев шины при эксплуатации могут получать внутренние повреждения, которые возникают от ударных нагрузок о неровности, перегрева поверхности шин и могут визуально никак не проявляться до момента своего проявления при движении [2, 4, 5, 6]²³. Их проявление возникает, как правило, в резком нарушении целостности шины, что не сможет предсказать с достаточной точностью ни система TPMS, ни система «интеллектуальной» шины. Для выявления таких дефектов нужно полноценное соответствующее технологическое оборудование. В настоящее время диагностирование наличия таких повреждений в процессе эксплуатации, как правило, не осуществляется [2]. Это связано с отсутствием доступного технологического оборудования, позволяющего выявлять данные дефекты²³. Существуют способы оценки внутренней структуры покрышки при помощи рентгеновского излучения [9, 10] с применением систем автоматического распознавания дефектов на снимках [11, 12], реализованных в ряде случаев с использованием глубокой сверточной нейронной сети [1, 13, 14], или поиск дефектов шин на изображениях шинографии осуществляется с использованием гибридного объединения сверточных нейронных сетей с высокопроизводительными, более быстрыми сверточными нейронными сетями на основе регионов [15]. Такое оборудование чаще всего применяют при производстве шин, что также немаловажно, так как существует большая вероятность возникновения скрытых дефектов структуры шин уже при их производстве, что недопустимо [16]. При сборке колес в промыш-

¹. Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации за 2020 год. Информационно-аналитический обзор. М.: ФКУ «НЦ БДД МВД России», 2021. 79 с.

² Дорошин Д.В., Хольшев Н.В. Обзор основных причин отказа автомобильных шин в процессе эксплуатации // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт: материалы VI-й Международной научно-практической конференции Института архитектуры, строительства и транспорта. Тамбов. 2019. С. 434–437.

³ Дамзен В.А., Трефилов М.А. Скрытые дефекты автомобильных шин // Совершенствование технологий и организации обеспечения работоспособности машин: сб. науч. тр. Саратов. 2007. С. 24–29.

ленных условиях на некоторых производствах (промышленная система Coditech) осуществляется оценка состояния покрышек после сборки на наличие на их поверхности царапин и складок резины шин, которые могут быть небезопасны для собранных изделий [17]. Эта проверка выполняется путем обработки 2D-изображений, преобразуемых из 3D-модели поверхности шины, получаемой в реальном времени при помощи лазерного профилометра и детектора [17]. Полученные изображения сравниваются с эталонными изображениями с применением различных алгоритмов обработки изображений, в результате чего в автоматическом режиме делается заключение о состоянии шины после ее монтажа на обод колеса [17]. Возможна оценка состояния шины также путем определения ее динамических характеристик через коэффициент затухания колебаний шины [2, 18]. Как правило, существующее оборудование имеет высокую стоимость и большую трудоемкость использования, обусловленную необходимостью снятия и последующей установки колес.

Для повышения доступности и простоты выполнения диагностирования скрытых по-

вреждений автомобильных шин был произведен ряд исследований. На основании одного из них было получено обоснование возможности использования в качестве диагностического параметра для выявления скрытых повреждений шин статической жесткости колеса [19]. Для оценки перспективности использования данного параметра при оценке шин на наличие скрытых повреждений и реализации использования данного параметра необходима разработка метода диагностирования шин, а также изготовление в дальнейшем лабораторной установки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Суть предлагаемого метода диагностирования шин с использованием предложенного диагностического параметра заключается в многократном измерении статической жесткости шины через равные углы ее поворота относительно оси вращения, усреднении полученных значений, получении доверительного интервала значений с заданной вероятностью и выявлении участков шины с статической жесткостью, выходящей за нижнюю границу полученного доверительного интервала.

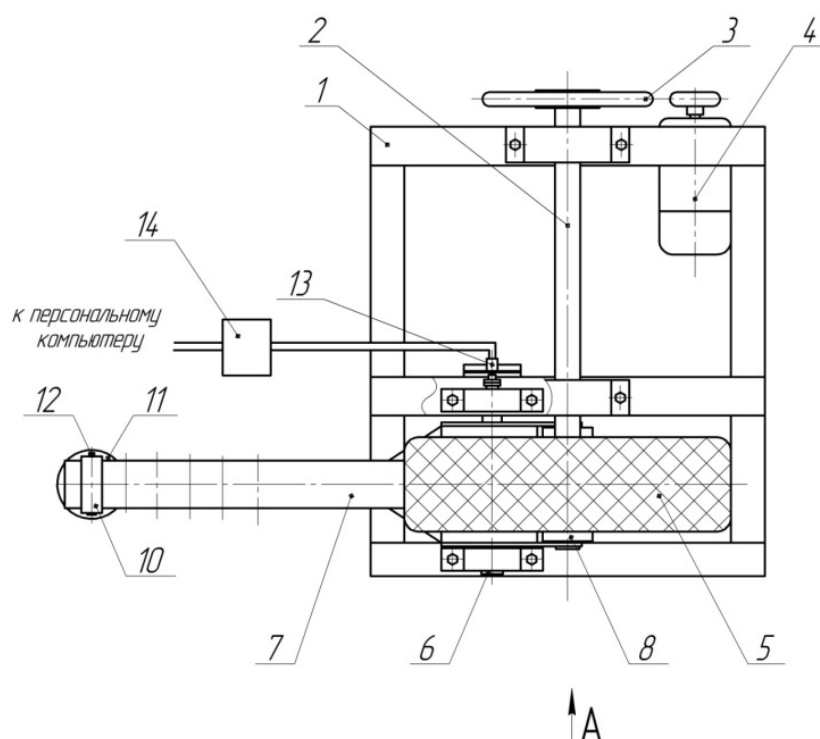


Рисунок 1 – Схема стенда для выявления скрытых повреждений пневматических автомобильных шин

Figure 1 – Diagram of a stand for detecting hidden damages of pneumatic car tires

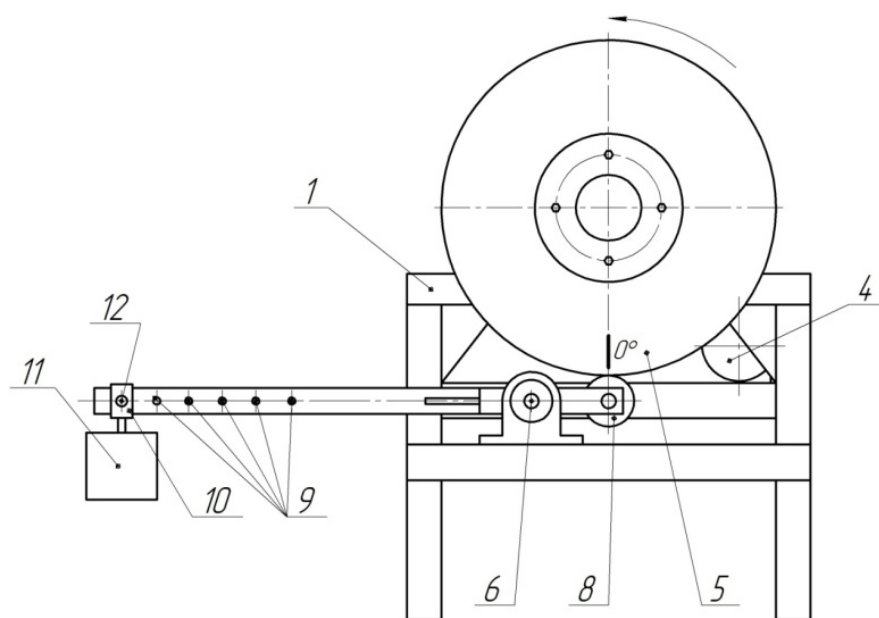


Рисунок 2 – Вид А. Схема стенда для выявления скрытых повреждений пневматических автомобильных шин

Figure 2 – View A. Diagram of the stand for detecting hidden damage of pneumatic car tires

Для реализации предложенного способа в лабораторных условиях была разработана схема стенда (рисунки 1, 2). Стенд для выявления скрытых повреждений пневматических автомобильных шин состоит из рамы 1 с установленным на ней валом 2, приводимым в движение через цепную передачу 3 при помощи электродвигателя 4. На валу 2 закреплена ступица, позволяющая устанавливать диагностируемое колесо 5. С рамой 1 через ось 6 шарнирно соединен рычаг 7, причем сама ось 6 жестко соединена с рычагом 7. На правом конце рычага 7 в вилке установлен ролик 8, который может свободно вращаться вокруг своей оси. На левом конце рычага 7 имеются отверстия 9, которые служат для фиксации подвижной планки 10 с грузом 11, обеспечивающим изменение силы прижатия ролика к колесу 5. Фиксация подвижной планки осуществляется при помощи пальца 12. С осью 6 жестко связана ручка потенциометра 13 (см. рисунок 1). Его выходные контакты подклю-

чаются через преобразователь 14 к персональному компьютеру (см. рисунок 1).

Диагностирование осуществляется в соответствии с алгоритмом, приведенным на рисунке 3. Колесо устанавливается на ступицу вала 2 стенда. Затем при помощи подвижной планки 10 с грузом 11 через рычаг 7 производится прижатие ролика 8 к колесу 5 с усилием, примерно равным весу, приходящемуся на колесо, установленное на автомобиль. Регулировка силы прижатия осуществляется за счет перемещения подвижной планки 10 с грузом 11 и фиксации их пальцем 12 в отверстиях 9. После нагружения колеса на персональный компьютер передается значение сопротивления на потенциометре, соответствующее некоторому повороту ручки потенциометра 13 (см. рисунок 1). Напротив точки контакта колеса 5 и ролика 8 ставят мелом риску – нулевая точка, соответствующая нулевому углу поворота колеса (см. рисунок 2).

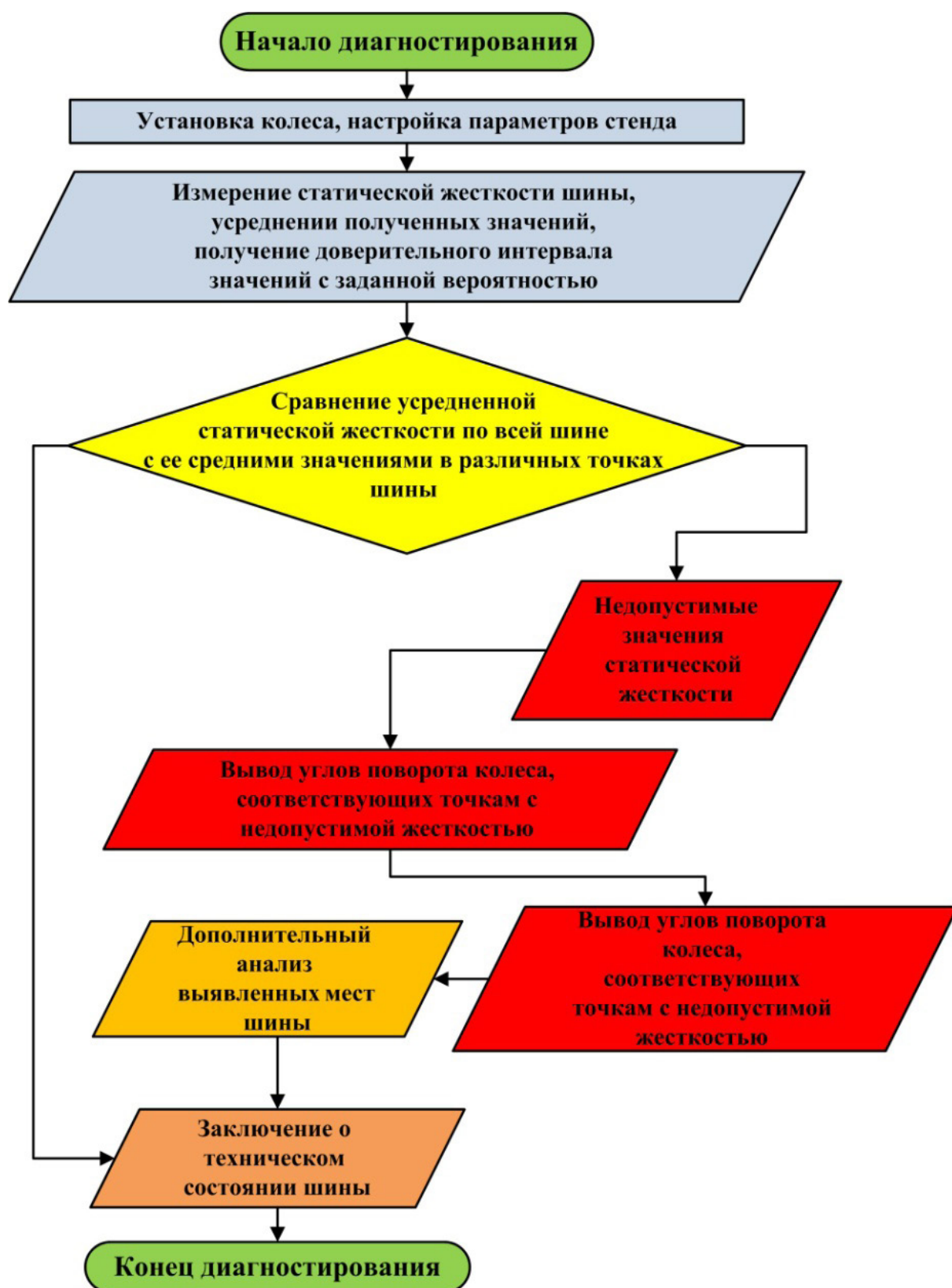


Рисунок 3 – Алгоритм диагностирования скрытых повреждений автомобильных шин

Figure 3 – Algorithm for diagnosing hidden damage of car tires

После включают привод и колесо начинает вращаться с некоторой частотой против хода часовой стрелки. Время включения привода должно обеспечить как минимум один полный оборот колеса и будет зависеть от диаметра колеса. При вращении колеса рычаг будет перемещаться вверх или вниз в зависимости от величины статической жесткости шины в конкретном месте, а так как ручка потенциометра 13 жестко связана с осью 6, которая в свою очередь также жестко связана с рычагом 7, то все линейные перемещения ролика будут преобразовываться в некоторый угол поворота ручки потенциометра 13 (см. рисунок 1), которому будут соответствовать некоторые значения сопротивления. Значения сопротивления и соответствующий им угол поворота колеса через преобразователь 14 (см. рисунок 1) передаются на персональный компьютер и обрабатываются специальной компьютерной программой, которая после остановки электродвигателя 4 привода, произведет вычисление среднего значения статической жесткости шины и определит границы доверительного интервала значений с заданной вероятностью, а также выведет значения углов поворота колеса, соответствующие местам на шине со статической жесткостью, выходящей за нижнюю границу полученного доверительного интервала. В местах шины, где будет отмечено значительное отклонение статической жесткости шины, предположительно может быть явный или скрытый дефект. Для нахождения данной точки выданное программой значение угла поворота шины откладывают от нулевой точки, а затем производят визуальный осмотр данного места шины и принимают окончательное решение о техническом состоянии шины.

РЕЗУЛЬТАТЫ

После разработки принципиальной схемы стенда перешли к детальной разработке цифрового преобразователя и программного обеспечения для считывания и обработки результатов диагностирования, а также к выполнению объемной модели стенда.

В качестве преобразователя вращательных движений ручки потенциометра в электронный сигнал было решено использовать ана-

лого-цифровой преобразователь Arduino Uno R3 на базе микроконтроллера ATmega328P⁴. Средний контакт переменного резистора подключается ко входу A0 Arduino Uno R3, а два других к +5V и GND. Схема подключения приведена на рисунке 4. Аналого-цифровой преобразователь имеет разрядность 10 бит (1024 градации измеряемой величины). Таким образом осуществляется оцифровка сигнала с переменного резистора: в зависимости от положения скользящего контакта резистора на вход Arduino Uno R3 поступает напряжение в пределах от 0 до 5 В. Микроконтроллер, выполняя записанную в него программу, преобразует это напряжение в числа от 0 до 1023 и отправляет значение в последовательный порт (serial port). За нулевую точку отчета следует брать половину напряжения – 2,502 В, соответствующее числу 512. При повороте рычага на некоторый угол происходит изменение сопротивления потенциометра, которое соответствует некоторому значению статической жесткости шины в конкретной ее точке².

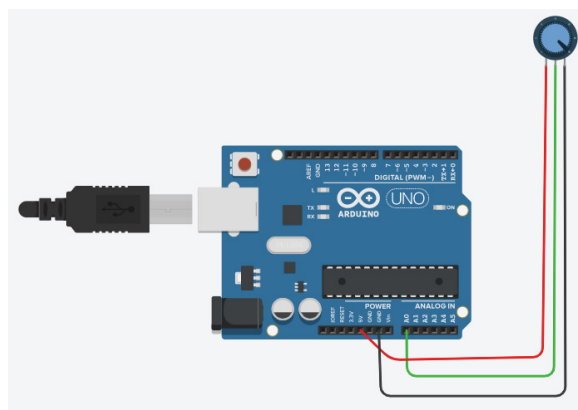


Рисунок 4 – Схема подключения потенциометра к плате Arduino Uno R3

Figure 4 – Connection diagram of the potentiometer to the Arduino Uno R3 board

Моменты считывания данных по окружности колеса можно настроить и выполнить через равные углы поворота колеса. Для повышения точности измерений количество оборотов следует принимать не менее пяти. Для обработки полученных данных в автоматическом режиме было разработано специальное приложение

⁴ Минаев П.С., Хольшев Н.В. Метод диагностирования скрытых повреждений автомобильных шин и способ его реализации // Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса: материалы VII Международной научно-практической конференции. Горловка. 2021. С. 52–54.

в среде программирования Lazarus 2.0⁵. Обработка данных предусматривает определение среднего значения показаний резистора и нахождение доверительного интервала по типовой методике. Скриншот рабочего окна программы представлен на рисунке 5 (данные носят демонстративный характер). Дополнительно предусмотрен ввод коэффициента для учета неоднородности жесткости шины. Введение коэффициента неоднородности жесткости шин обусловлено наличием некоторой неоднородности статистической жесткости шины даже для исправной шины, что подтверждено проведенными ранее испытаниями. При выхождении среднего значения по строкам из рассчитанного программой доверительного

интервала делается предположение о наличии повреждения в данной точке шины. Программа возле точек, не входящих в интервал, выдает сообщение «Превышение» и угол поворота колеса, где эта точка расположена. При отсутствии таких точек везде проставляются «нули». Далее находятся данные точки на колесе путем отсчета выведенного программой угла от нулевой точки и эти точки шины осматриваются с обеих сторон – снаружи и внутри шины, при наличии неустранимых повреждений шина бракуется.

На основании приведенной выше конструктивной схемы стенда была разработана в программе «Компас» объемная 3D-модель лабораторного стенда (рисунок 6).

	1	2	3	4	5	Среднее строчное	Превышение	Угол поворота
1	530	540	540	540	550	540.000	0	0
2	540	550	540	540	550	544.000	0	0
3	540	540	540	540	550	542.000	0	0
4	550	540	540	540	550	544.000	0	0
5	560	540	540	550	550	548.000	0	0
6	550	540	540	540	550	544.000	0	0
7	550	540	550	540	550	546.000	0	0
8	550	540	540	540	550	544.000	0	0
9	550	540	540	540	550	544.000	0	0
10	550	540	540	550	550	546.000	0	0
11	550	540	540	550	550	546.000	0	0
12	550	540	560	550	550	550.000	0	0
13	800	550	570	700	600	644.000	Превышение	130.000
14	550	540	540	550	550	546.000	0	0
15	540	550	550	550	550	548.000	0	0
16	550	540	540	550	550	546.000	0	0
17	550	540	540	550	550	546.000	0	0
18	550	540	550	550	550	548.000	0	0
19	550	540	540	550	550	546.000	0	0
20	550	540	540	550	550	546.000	0	0
21	550	540	540	550	550	546.000	0	0
22	550	540	540	550	550	546.000	0	0
23	550	540	550	550	550	548.000	0	0
24	550	540	540	550	550	546.000	0	0
25	550	540	540	550	550	546.000	0	0
26	550	540	540	550	550	546.000	0	0
27	550	540	540	550	550	546.000	0	0
28	550	540	540	550	550	546.000	0	0
29	550	540	550	550	550	548.000	0	0
30	550	540	550	550	550	548.000	0	0
31	550	540	540	550	550	546.000	0	0
32	550	540	540	550	550	546.000	0	0
33	550	540	540	550	550	546.000	0	0
34	550	540	540	550	550	546.000	0	0
35	550	540	540	550	550	546.000	0	0
36	550	550	550	540	550	548.000	0	0

Рисунок 5 – Рабочее окно программы для обработки результатов диагностирования шин

Figure 5 – The working window of the program for processing the results of tire diagnostics

⁵ Минаев П.С., Хольшев Н.В. Методика обработки результатов диагностирования автомобильных шин и приложение для ее реализации // Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса: материалы VII Международной научно-практической конференции. Горловка. 2021. С. 55–57.

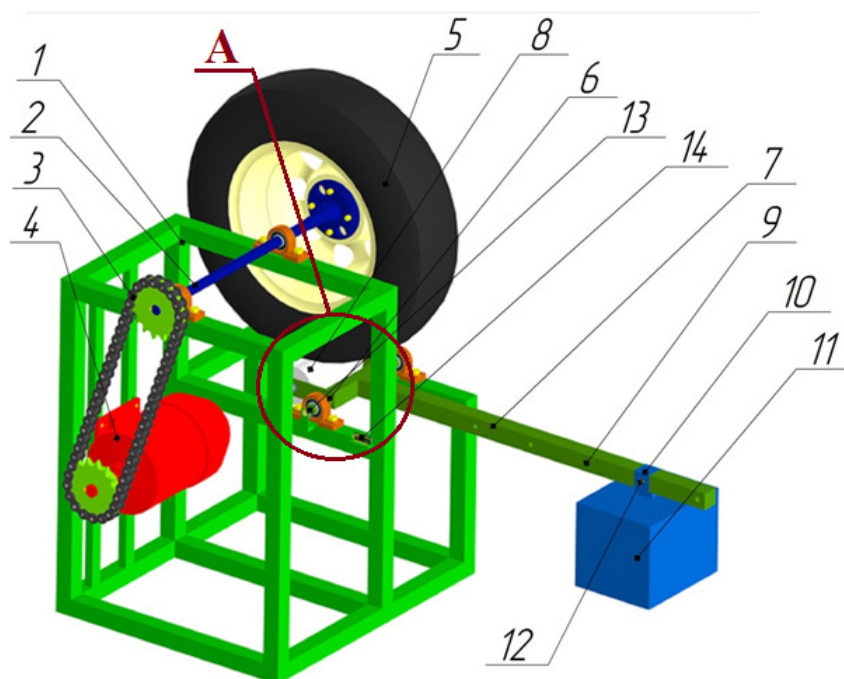


Рисунок 6 – Объемная модель лабораторного стенда

Figure 6 – Volumetric model of the laboratory stand

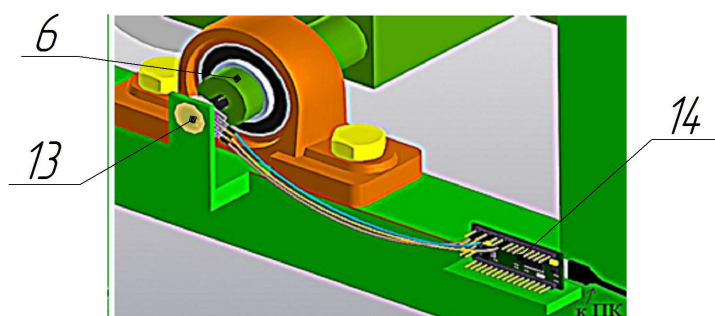


Рисунок 7 – Вид А. Подключение и установка потенциометра и Arduino Uno R3

Figure 7 – View A. Connecting and installing a potentiometer and Arduino Uno R3

Стенд состоит из рамы 1 с установленным на ней валом 2, приводимым в движение через цепную передачу 3 при помощи электродвигателя 4. На валу 2 закреплена ступица, позволяющая устанавливать диагностируемое колесо 5. С рамой 1 через ось 6 шарнирно соединен рычаг 7, причем сама ось 6 жестко соединена с рычагом 7. На правом конце рычага 7 в вилке установлен ролик 8 (см. рисунок 6), который может свободно вращаться вокруг своей оси. На рычаге 7 через некоторое расстояние имеются отверстия 9, которые служат для фиксации подвижной планки 10 с грузом

11, обеспечивающим изменение силы прижатия ролика к колесу 5. Фиксация подвижной планки осуществляется при помощи пальца 12. С осью 6 жестко связана ручка потенциометра 13 (см. рисунки 6, 7). Его выходные контакты подключаются через преобразователь 14 (Arduino Uno R3) к персональному компьютеру через USB (см. рисунок 7).

После выполнения 3Д-модели в программе «Компас 3Д» приступили к подбору и изготовлению узлов и деталей лабораторного образца стенда. Рама изготовлена из металлических труб квадратного сечения 40 на 40 мм,

скреплённых между собой сваркой по схеме и с геометрическими параметрами 3Д-модели (см. рисунок 6). Также осуществлен подбор электродвигателя, вала станда, подшипниковых опор и собрана электронная часть станда. Ведутся работы по дальнейшему комплектованию станда деталями и монтаж их на раму.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод диагностирования и устройство для его реализации позволят в случае подтверждения своей эффективности снизить трудоемкость и упростить процесс выявления скрытых повреждений шин, а в дальнейшем разработать стенд для осуществления экспресс-диагностики пневматических шин автомобилей, повысив их эксплуатационную надежность, снизив вероятность возникновения дорожно-транспортных происшествий. Предлагаемый стенд имеет простую и надежную конструкцию, а использование компьютерного приложения позволяет выполнять обработку данных в автоматическом режиме с минимальными затратами времени. Это даст возможность в дальнейшем повысить доступность и эффективность диагностического обслуживания для шин. В настоящее время на данный метод и конструктивную схему станда оформлена и подана заявка на получение патента РФ. Для проверки работоспособности и эффективности данного метода и устройства для его реализации в лабораторных условиях необходимы дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mohan P., Pahinkar A., Karajgi A., Kumar L., Kasera R., Gupta A., Narayanan S. Multi-Contrast Convolution Neural Network and Fast Feature Embedding for Multi-Class Tyre Defect Detection// 4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA). November 2020: 1397-1405.: <https://doi.org/10.1109/ICECA49313.2020.9297615>
2. Трефилов М.А., Дамзен В.А. Коэффициент затухания колебаний шины как диагностический параметр // Автомобильная промышленность. 2010. № 9. С. 32–33.
3. Zhang H., Zhang S., Zhang Y., Huang X., Dai Y. Abrasion Status Prediction with BP Neural Network Based on an Intelligent Tire System// 4th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI). December 2020. pp. 619-622. [Электронный ресурс]: <https://doi.org/10.1109/CVCI51460.2020.9338547>
4. Li Y., Zuo S., Lei L., Yang X., Wu X. Analysis of impact factors of tire wear// Journal of Vibration and Control. May 2012. Vol.18 (6): 833-840.: <https://doi.org/10.1177/1077546311411756>
5. Abdulaev E., Makharatkin P., Pumpur E. A priori ranking and an analysis of factors affecting tire wear// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. November 2019. Vol.378: 012001.: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/378/1/012001>
6. Todoroki A., Matsuzaki R. Wireless Monitoring of Automobile Tires for Intelligent Tires// Sensors. December 2008. Vol.8.: 8123-8138.: <https://doi.org/10.3390/s8128123>
7. Yunta J., García-Pozuelo D., Diaz V., Olatunbosun O. Influence of camber angle on tire tread behavior by an on-board strain-based system for intelligent tires// Measurement. October 2019. Vol.145.: 631-639.: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.05.105>
8. Zhu B., Han J., Zhao J. Tire-Pressure Identification Using Intelligent Tire with Three-Axis Accelerometer// Sensors. June 2019. Vol.19(11):2560.: <https://doi.org/10.3390/s19112560>
9. Jinyin C., Li Y., Zhao J. X-ray of Tire Defects Detection via Modified Faster R-CNN// 2nd International Conference on Safety Produce Informatization (IICSPI). November 2019.: 257-260.: <https://doi.org/10.1109/IICSPI48186.2019.9095873>
10. Zhang Y., Lefebvre D. Automatic, Li Q. Detection of Defects in Tire Radiographic Images// IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. September 2015. Vol.14.: 1-9.: <https://doi.org/10.1109/TASE.2015.2469594>
11. Zhang Y., Cui X., Liu Y., Yu B. TireNet: A high recall rate method for practical application of tire defect type classification// International Journal of Computational Intelligence Systems. May 2018. Vol.11.: 1056-1066.: <https://doi.org/10.2991/ijcis.11.1.80>
12. Cui X., Liu Y. Defect automatic detection for tire X-ray images using inverse transformation of principal component residual// Third International Conference on Artificial Intelligence and Pattern Recognition (AIPR). September 2016.: 1-8.: <https://doi.org/10.1109/ICAIPR.2016.7585205>
13. Wang R., Guo Q., Lu S., Zhang C. Tire Defect Detection Using Fully Convolutional Network// IEEE Access. January 2019. Vol.7.: 43502-43510.: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908483>
14. Tada H., Sugiura A. Defect Classification on Automobile Tire Inner Surfaces with Functional Classifiers// Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers. January 2021. Vol.34.: 1-10.: <https://doi.org/10.5687/iscie.34.1>
15. Chang C.-Y., Srinivasan K., Wang W.-C., Ganapathy G., Vincent P M D., Deepa, N. Quality Assessment of Tire Shearography Images via Ensemble Hybrid Faster Region-Based ConvNets// Electronics. December 2019. Vol.9.: 1-13.: <https://doi.org/10.3390/electronics9010045>
16. Weyssenhoff A., Opala M., Koziak S., Melnik R. Characteristics and investigation of selected manufacturing defects of passenger car tires// Transportation Research Procedia. May 2019. Vol.40.: 119-126.: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.020>
17. Massaro A., Dipierro G., Cannella E., Galiano A. Comparative Analysis among Discrete Fourier Transform, K-Means and Artificial Neural Networks

Image Processing Techniques Oriented on Quality Control of Assembled Tires // *Information (Switzerland)*. May 2020. Vol.11.: 257-277.: <https://doi.org/10.3390/info11050257>

18. Дамзен В.А., Трефилов М.А. Разработка метода оценки скрытых дефектов автомобильных шин по параметрам динамической жесткости // *Автотранспортное предприятие*. 2009. № 1. С. 48–50.

19. Хольшев Н.В., Лавренченко А.А., Коновалов Д.Н., Минаев П.С. Обоснование диагностического параметра для определения скрытых повреждений шин автомобилей // *Вестник гражданских инженеров*. 2020. № 3(80). С. 191–196.

REFERENCES

1. Mohan P., Pahinkar A., Karajgi A., Kumar L., Kasera R., Gupta A., Narayanan S. Multi-Contrast Convolution Neural Network and Fast Feature Embedding for Multi-Class Tyre Defect Detection// *4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*. November 2020: 1397-1405. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICECA49313.2020.9297615>

2. Trefilov M. A., Damzen V. A. Koefficient zatushaniya kolebanij shiny kak diagnosticheskiy parametr [The attenuation coefficient of tire vibrations as a diagnostic parameter] *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2010. 9: 32-33. (in Russian)

3. Zhang H., Zhang S., Zhang Y., Huang X., Dai Y. Abrasion Status Prediction with BP Neural Network Based on an Intelligent Tire System. *4th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI)*. December 2020: 619-622. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVCI51460.2020.9338547>

4. Li Y., Zuo S., Lei L., Yang X., Wu X. Analysis of impact factors of tire wear. *Journal of Vibration and Control*. May 2012. 18 (6): 833-840. DOI: <https://doi.org/10.1177/1077546311411756>

5. Abdulaev E., Makharatkin P., Pumpur E. A priori ranking and an analysis of factors affecting tire wear. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 378: 012001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/378/1/012001>

6. Todoroki A., Matsuzaki R. Wireless Monitoring of Automobile Tires for Intelligent Tires. *Sensors*. December 2008. 8: 8123-8138. DOI: <https://doi.org/10.3390/s8128123>

7. Yunta J., García-Pozuelo D., Diaz V., Olatunbosun O. Influence of camber angle on tire tread behavior by an on-board strain-based system for intelligent tires. *Measurement*. October 2019. 145: 631-639. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.05.105>

8. Zhu B., Han J., Zhao J. Tire-Pressure Identification Using Intelligent Tire with Three-Axis Accelerometer. *Sensors*. June 2019.19(11): 2560. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19112560>

9. Jinyin C., Li Y., Zhao J. X-ray of Tire Defects Detection via Modified Faster R-CNN. *2nd International Conference on Safety Produce Informatization (IICS-PI)*. November 2019: 257-260. DOI: <https://doi.org/10.1109/IICSPI48186.2019.9095873>

10. Zhang Y., Lefebvre D. Automatic, Li Q. Detection of Defects in Tire Radiographic Images. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. Septembr 2015. 14: 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASE.2015.2469594>

11. Zhang Y., Cui X., Liu Y., Yu B. TireNet: A high recall rate method for practical application of tire defect type classification. *International Journal of Computational Intelligence Systems*. May 2018. 11: 1056-1066. DOI: <https://doi.org/10.2991/ijcis.11.1.80>

12. Cui X., Liu Y. Defect automatic detection for tire X-ray images using inverse transformation of principal component residual. *Third International Conference on Artificial Intelligence and Pattern Recognition (AIPR)*. September 2016: 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICAIPR.2016.7585205>

13. Wang R., Guo Q., Lu S., Zhang C. Tire Defect Detection Using Fully Convolutional Network. *IEEE Access*. January 2019. 7: 43502-43510. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908483>

14. Tada H., Sugiura A. Defect Classification on Automobile Tire Inner Surfaces with Functional Classifiers. *Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers*. January 2021. 34: 1-10. DOI: <https://doi.org/10.5687/iscie.34.1>

15. Chang C.-Y., Srinivasan K., Wang W.-C., Ganapathy G., Vincent P M D., Deepa, N. Quality Assessment of Tire Shearography Images via Ensemble Hybrid Faster Region-Based ConvNets. *Electronics*. December 2019. 9: 1-13. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9010045>

16. Weyssenhoff A., Opala M., Koziak S., Melnik R. Characteristics and investigation of selected manufacturing defects of passenger car tires. *Transportation Research Procedia*. May 2019. 40: 119-126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.020>

17. Massaro A., Dipierro G., Cannella E., Galiano A. Comparative Analysis among Discrete Fourier Transform, K-Means and Artificial Neural Networks Image Processing Techniques Oriented on Quality Control of Assembled Tires. *Information (Switzerland)*. May 2020. 11: 257-277. DOI: <https://doi.org/10.3390/info11050257>

18. Damzen, V. A., Trefilov M. A. Razrabotka metoda ocenki skrytyh defektov avtomobil'nyh shin po parametram dinamicheskoy zhestkosti [Development of a method for assessing hidden defects of automobile tires by dynamic stiffness parameters]. *Avtotransportnoe predpriyatie*. 2009. 1: 48-50. (in Russian)

19. Hol'shev N.V., Lavrenchenko A.A., Konovalov D.N., Minaev P.S. Obosnovanie diagnosticheskogo parametra dlya opredeleniya skrytyh povrezhdenij shin avtomobilej [Substantiation of the diagnostic parameter for determining hidden damage to car tires]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2020. 3(80): 191 -196 (in Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Хольшев Н.В. Разработка метода диагностирования шин и конструктивно-технологической схемы стенда, а также части кода программы для обработки результатов диагностирования.

Минаев П.С. Разработка объемной модели стенда в программе «Компас 3D» и ее описания, изготовление рамы стенда.

Коновалов Д.Н. Разработка алгоритма диагностирования скрытых повреждений автомобильных шин по предложенному методу.

Прохоров А.В. Разработка конструктивно-технологической схемы стенда, а также части кода программы для считывания результатов диагностирования.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Nikolay V. Holshev – Development of a tire diagnostic method and a design and technological scheme of the stand, as well as part of the program code for processing diagnostic results.

Pavel S. Minaev – Development of a three-dimensional model of the stand in the Compass 3D program and its descriptions, production of the stand frame.

Dmitry N. Konovalov – Development of an algorithm for diagnosing hidden damage to car tires according to the proposed method.

Alexey V. Prokhorov – Development of the design and technological scheme of the stand, as well as part of the program code for reading diagnostic results.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хольшев Николай Васильевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Техника и технологии автомобильного транспорта».

Минаев Павел Сергеевич – слесарь по ремонту автомобилей в автосалоне ŠKODA ООО «Авторитет».

Коновалов Дмитрий Николаевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Техника и технологии автомобильного транспорта».

Прохоров Алексей Владимирович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Агроинженерия».

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolay V. Holshev, Cand. of Sci., Associate Professor of the Engineering and Technology of Motor Transport Department, Tambov State Technical University.

Pavel S. Minaev, car repair mechanic at the ŠKODA Car Dealership, ООО Avtoritet.

Dmitry N. Konovalov, Cand. of Sci., Associate Professor of the Engineering and Technology of Motor Transport Department, Tambov State Technical University.

Alexey V. Prokhorov, Cand. of Sci., Associate Professor of the Agroengineering Department, Tambov State Technical University.

Научная статья
УДК 519.6: 656.13: 537.8
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-746-758>

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТЕОРЕТИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОВЕДЕНИЯ ЖИТЕЛЕЙ ГОРОДА (МЕГАПОЛИСА)

И.Е. Агуреев, А.В. Ахромешин

Тульский государственный университет, г. Тула, Россия
agureev-igor@yandex.ru
aakhromeshin@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье представлен анализ научных работ по транспортному поведению, транспортной мобильности населения и паттернам поведения пассажиров (индивидов). Построение математических моделей транспортного поведения на основе теории макросистем имеет научную новизну и перспективы для изучения и внедрения на практике. Актуальной задачей на этом пути является изучение природы коллективного поведения, возникающего в результате взаимодействия множества мотивов при принятии решения о поездке. При этом в потоках пассажиров и транспортных средств предполагается наличие пространственно-временных структур, которые отражают транспортное поведение на макроуровне.

Описание проблемы (обзор). Транспортное поведение населения изучается как иностранными, так и отечественными учеными и специалистами транспортной отрасли, однако глубина и изученность темы не позволяют говорить о том, что есть обобщенные схемы, модели и математическое описание поведения пассажиров. Очень мало информации имеется о том, как именно пассажир принимает решение – совершит он поездку или нет, т. е. поведенческие модели практически не исследуются. Основные направления исследований транспортного поведения, предлагаемые авторами настоящей работы, следующие: создание теоретического аппарата для описания «транспортного поведения»; разработка математической модели транспортной системы индивидуальных перемещений; построение системы управления транспортным поведением.

Материалы и методы. В качестве основного метода исследования в статье применяется общий системный подход. Модели поведения пассажиров, а также их реакции на изменения, происходящие в транспортной системе, описываются с помощью термина «паттерн». Таким образом, дополнительно применяется метод анализа паттернов в нелинейной динамике.

Результаты. Дано определение понятию «паттерн» транспортного поведения. С позиций теории транспортных макросистем паттерном можно назвать совокупность конкретных состояний, которые «выбирает» элемент (индивид, транспортное средство и т. д.) на различных структурных уровнях транспортной макросистемы из подмножества допустимых.

Обсуждение и заключение. В настоящей работе предложен новый подход к описанию транспортного поведения с позиций различных научных дисциплин, теории макросистем, что закладывает базис для создания теории транспортного поведения, которая в настоящее время отсутствует. В результате исследований получено: 1) формулировка системы, которая наиболее полным образом отражает сущность «транспортного поведения», – это транспортная система индивидуальных перемещений; 2) показано, что построение такой системы лучше всего делать в рамках теории макросистем; 3) предложено такое понятие, как «пространственно-временная диаграмма» транспортного поведения, установлена ее связь с традиционным термином нелинейной динамики, таким как «паттерн поведения нелинейной системы»; 4) предложено развитие термина «граф транспортного поведения» в направлении учета всех фаз транспортного процесса (дотранспортная, транспортная, послетранспортная), что отражается на пространственно-временной диаграмме.

КЛЮЧЕВЫЕ слова: транспортная система, коллективное поведение, транспортное поведение, выбор вида транспорта, паттерн, теория макросистем, сложная система

© Агуреев И.Е., Ахромешин А.В., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

БЛАГОДАРНОСТИ. Коллектив авторов выражает благодарность анонимным рецензентам и благодарит редакцию журнала за обработку статьи и возможность её опубликования.

Статья поступила в редакцию 30.10.2021; одобрена после рецензирования 13.12.2021; принята к публикации 14.12.2021.

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: Агуреев И.Е., Ахромешин А.В. Обоснование выбора теоретического аппарата для описания транспортного поведения жителей города (мегаполиса) // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 6(82). С. 746-758. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-746-758>

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-746-758>

JUSTIFICATION FOR THE CHOICE OF A THEORETICAL APPARATUS TO DESCRIBE THE TRANSPORT BEHAVIOUR OF CITY RESIDENTS (MEGAPOLIS)

Igor E. Agureev, Andrey V. Akhromeshin

Tula State University, Tula, Russia

agureev-igor@yandex.ru

aakhromeshin@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The article presents an analysis of scientific papers on transport behavior, transport mobility of the population and patterns of behavior of passengers (individuals). The construction of mathematical models of transport behavior based on the theory of macrosystems has scientific novelty and prospects for study and implementation in practice. An urgent task on this path is to study the nature of collective behavior resulting from the interaction of multiple motives when making a decision about a trip. At the same time, in the flows of passengers and vehicles, it is assumed that there are spatio-temporal structures that reflect transport behavior at the macro level.

Description of the problem (overview). The transport behavior of the population is studied by both foreign and domestic scientists and specialists of the transport industry, however, the depth and study of the topic does not allow us to say that there are generalized schemes, models and mathematical descriptions of passenger behavior. Very little information is available about how exactly a passenger makes a decision whether he will make a train or not, i.e. behavioral models are practically not investigated. The main directions of research of transport behavior proposed by the authors of this work are as follows: creation of a theoretical apparatus for describing "transport behavior"; development of a mathematical model of the transport system of individual movements; construction of a transport behavior management system.

Materials and methods. The article uses a general systematic approach as the main research method. Passenger behavior patterns, as well as their reaction to changes occurring in the transport system, are described using the term "pattern". Thus, the method of pattern analysis in nonlinear dynamics is additionally applied.

Results. The definition of the concept of "pattern" of transport behavior is given. From the standpoint of the theory of transport macrosystems, a pattern can be called a set of specific states that an element (an individual, a vehicle, etc.) "chooses" at various structural levels of a transport macrosystem from a subset of acceptable ones.

Discussion and conclusions. This paper proposes a new approach to the description of transport behavior from the standpoint of various scientific disciplines, the theory of macrosystems, which lays the basis for the creation of a theory of transport behavior, which is currently absent. As a result of the research, it was obtained: 1) the formulation of the system that most fully reflects the essence of "transport behavior" is a transport system of individual movements; 2) it is shown that the construction of such a system is best done within the framework of the theory of macrosystems; 3) such a concept as a "space-time diagram" of transport behavior is proposed, its connection with the traditional term of nonlinear dynamics, such as "pattern of behavior of a nonlinear system", is established, 4) the development of the term "graph of transport behavior" is proposed in the direction of taking

© Agureev I.E., Akhromeshin A.V., 2021



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

into account all phases of the transport process (pre-transport, transport, post-transport), which is reflected in the space-time diagram.

KEYWORDS: transport system, collective behavior, transport behavior, choice of mode of transport, pattern, theory of macrosystems, complex system.

ACKNOWLEDGEMENTS: The team of authors expresses gratitude to anonymous reviewers and thanks the editorial board of the journal for processing the article and the possibility of its publication.

The article was submitted 30.10.2021; approved after reviewing 13.12.2021; accepted for publication 14.12.2021.

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: Agureev I.E., Akhromeshin A.V. Justification of the choice of a theoretical apparatus to describe the transport behavior of city residents (megapolis). The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2021; 18 (6): 746-758. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-746-758>

ВВЕДЕНИЕ

В статье [1] представлен новый подход к определению транспортного поведения (ТП) населения городских агломераций, а также намечены основные векторы развития данной тематики, предложен новый подход к описанию транспортного поведения с позиций различных научных дисциплин, теории макросистем, что закладывает базис для создания теории транспортного поведения, которая в настоящее время отсутствует. При этом исследование транспортного поведения проводится на уровне «система в целом», а не отдельных ее элементов, что позволяет формировать общие подходы к управлению транспортным поведением с целью достижения оптимальных характеристик функционирования транспортной системы города (агломерации).

Математическое описание транспортной системы, представленное в работе [1], имеет общий вид, требует расширения и дополнения. Построение математических моделей на основе теории макросистем, притом что любая транспортная система – многокомпонентная неоднородная и открытая система, имеет научную новизну и перспективы для изучения и внедрения на практике в транспортной отрасли.

Актуальной задачей на этом пути является изучение природы коллективного поведения с позиций влияния мотивов при принятии решения о поездке и возникновения пространственно-временных структур перемещений пассажиров и транспортных средств, т. е. образование пассажиропотоков и потоков транспорта, а также рассмотрение понятия ТП с точки зрения психологии, социологии и урбанистики.

Целью настоящей работы является созда-

ние нового подхода к описанию транспортного поведения с позиций различных научных дисциплин (теории макросистем, сложных систем), что закладывает базис для создания теории транспортного поведения, которая в настоящее время отсутствует.

Теоретическая значимость работы состоит в следующем: описание системы, которая наиболее полным образом отражает сущность «транспортного поведения», – это транспортная система индивидуальных перемещений; показано, что построение такой системы лучше всего делать в рамках теории макросистем; предложено такое понятие, как «пространственно-временная диаграмма» (ПВД) транспортного поведения, установлена ее связь с традиционным термином нелинейной динамики, таким как «паттерн поведения нелинейной системы».

Практическая значимость состоит в возможности построения системы управления транспортным поведением населения на основе графа транспортного поведения при учете всех фаз транспортного процесса (дотранспортная, транспортная, послетранспортная), что является вопросом дальнейшей работы авторов данной статьи.

Описание проблемы (обзор)

Рассмотрим современную проблематику, связанную с понятием «транспортное поведение». Учитывая, что этому термину посвящено не так много исследований, а еще меньше выполнено работ, направленных на создание системы управления транспортным поведением, обобщим материал и отметим наиболее важные проблемы в данной области.

Формирование представления о передвижениях населения на данный момент складывается из четырех типов поездок [2]: передвижения от мест жительства к местам

приложения труда и обратно (так называемые трудовые корреспонденции); передвижения от мест жительства к местам культурно-бытового обслуживания (магазинам и др.) и обратно; передвижения, совершаемые между местами приложений труда (деловые поездки); передвижения, совершаемые между объектами культурно-бытового обслуживания.

В литературе наиболее широко представлены следующие способы расчета корреспонденций:

- гравитационные модели [3, 4];
- энтропийная модель Дж. Вильсона¹ [5, 6, 7].

В работе [8] автор приводит следующее мнение: «Транспортное поведение слишком многовариантно и скорость его изменений опережает темп его изучения. Эмпирические исследования до настоящего времени не привели к обнаружению фундаментальных законов или хотя бы закономерностей универсального характера, которые могли бы служить базой для теоретических построений ... в настоящее время еще и нет теории транспортного поведения как научного направления. Нынешнее состояние теории транспортного поведения можно характеризовать как результат молодости этого направления в науке».

На основе выводов, представленных автором статьи [8], можно заключить следующее:

- необходимость систематически использовать понятие «расщепление» для моделирования транспортной системы города;
- конкретные организационные мероприятия, осуществляемые для управления ТП;
- необходимо «воспитания у населения понимания современных транспортных проблем города, стереотипа поведения при пользовании городским транспортом».

Целью проведения исследования² является выяснение количественных параметров транспортного поведения населения РФ, при этом решены следующие задачи: определение теоретической базы, составление методического инструментария, сбор и анализ количественных данных, характеризующих транспортное поведение.

В работах [9, 10] авторами³ рассмотрена в качестве объекта исследования саморазвивающаяся социоприродоэкономическая транспортная система, разработана интегрированная система логистического управления движением на улично-дорожной сети города, предложен алгоритм адаптивного управления транспортными потоками на улично-дорожной сети города с использованием светофорного регулирования, учитывающий экологический фактор. Это дало определение правильного сочетания мероприятий, которые должны быть осуществлены в транспортной системе, то есть рациональных для транспортной системы и устойчивых для здоровья людей и окружающей среды и требующих минимальных экономических ресурсов.

В иностранной литературе также обсуждается вопрос о транспортной мобильности, подвижности и транспортном поведении населения городов.

В работе [11] рассмотрены симуляционные модели транспортной мобильности. Авторы отмечают важность таких понятий, как устойчивая мобильность (Sustainable Mobility), система поддержки принятия решений (Decision Support System), транспортное планирование. Понятие «устойчивая мобильность» связано с транспортным планированием городов и районов с целью устойчивого использования имеющихся ресурсов (инфраструктуры транспортной системы). Отмечено, что политика устойчивого развития городского транспорта весьма различна с точки зрения затрат и ожидаемых выгод. Последствия этой политики и их комбинаций трудно предвидеть на интуитивной основе, конечный эффект может противоречить интуитивным ожиданиям (например, политика, направленная на сокращение загрязнения, в конечном итоге приводит к его увеличению). Вводится понятие концепции «экорационального» планирования городской среды, рассмотрена модель паттерна ежедневной индивидуальной активности пассажира (DIAPM) и влияние этого поведения на состояние городской среды, в том числе на экологическую обстановку в городе.

¹ Вильсон А. Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем [Текст]: пер. с англ. / А. Дж. Вильсон. М.: Наука, 1978. 247 с.

² Мулеев Е.Ю. Транспортное поведение населения России: краткий отчет о социологическом исследовании / Е.Ю. Мулеев. – М.: Институт экономики транспорта и транспортной политики НИУ ВШЭ. 2015. 37 с.

³ Корчагин В.А., Турусов А.А., Ризаева Ю.Н. Научные основы организации эффективного грузодвижения [Текст]: монография. Душанбе: ТТУ, 2012. 160 с.

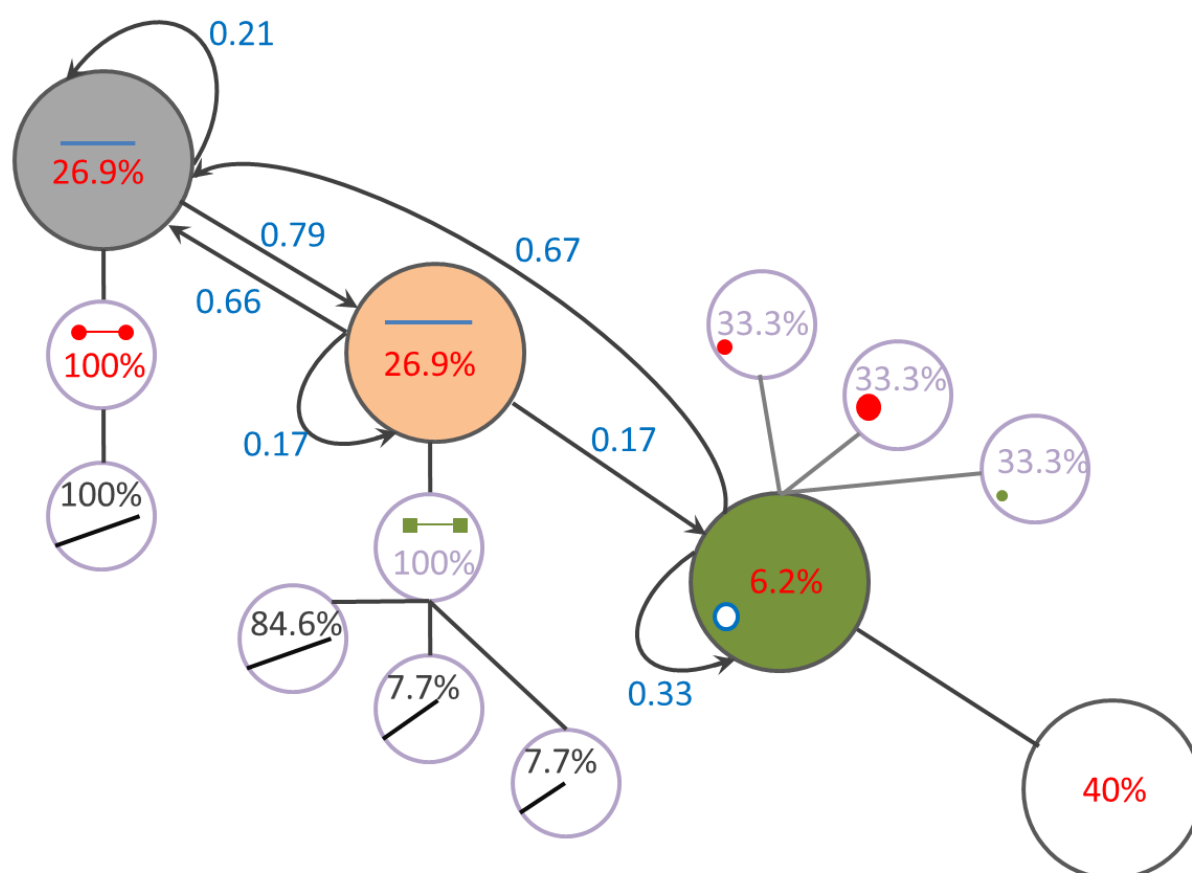


Рисунок 1 – Индивидуальный граф поведения пассажира при поездках

Figure 1 – Individual schedule of passenger behavior during trips

Работа [12] посвящена выявлению факторов, которые влияют на выбор транспорта пассажиром. Основными факторами при выборе типа транспорта отмечены следующие: *доход семьи; владение транспортным средством (наличие автомобиля в семье); безопасность; комфорт; расстояние поездки; стоимость поездки; надежность по времени прибытия*. При этом выделяются три категории факторов: 1) *характеристики пассажира* (возраст/пол; доход; владение автомобилем; наличие водительских прав); 2) *характеристики передвижения* (цель поездки; время суток, когда совершается поездка; совершается поездка в одиночку или с другими участниками); 3) *характеристики транспортного средства* (аренда автомобиля на время; за-

траты на поездку; наличие и стоимость парковки; надежность времени в пути (прибытия); комфорт и удобство; безопасность).

В статье [13] авторами описывается разработанный метод изучения поведения пассажира на основе графов регулярности поездок на различных видах общественного транспорта. Метод эффективен для прогнозирования поведения пассажира при выборе следующей поездки, причем модель отдельно учитывает перемещения на каждом виде общественного транспорта, цепочку передвижения пассажира в пространстве, распределение времени поездок. В данном методе применяется вероятностный подход. Применение данной модели на практике может быть сделано для прогнозирования спроса на перевозки.

Поясним рисунок 1: для конкретного пассажира доля поездок на общественном транспорте составляет 60% ($26,9\%+26,9\%+6,2\%$) от всех поездок этого пассажира. При этом первый тип поездки (серый круг, 26,9%) – передвижение утром на автобусе с вероятностью 100%; второй тип поездки (оранжевый круг, 26,9%) – передвижение вечером тремя возможными типами транспорта, но с вероятностью 84,6% – автобусом. Поездки первого и второго типа носят кольцевой характер, т. е. дом – работа, работа – дом. Третий тип поездки – поездки на короткие расстояния тремя видами транспорта с равной вероятностью выбора.

Результаты исследования обобщены в виде графа (см. рисунок 1). Разбивка пассажиров на различные группы по стабильности спроса на перевозки позволяет сформировать более комфортное общественное транспортное обслуживание, использование таких вариантов/режимов, как «быстрый автобус», «скоростной автобус-челнок», «мини-автобус».

Выводы по рассмотренным выше публикациям могут быть сделаны следующие: 1) транспортное поведение может быть рассмотрено с различных позиций, а именно с точки зрения факторов, обуславливающих выбор вида передвижения в соответствии с определенными целями поездок; 2) транспортное поведение может быть исследовано различными методами, в частности, с помощью метода графов связей описывается общая картина подвижности индивидов по целям, времени, дальности поездки и виду используемого транспорта; 3) коллективное транспортное поведение есть результат взаимодействия отдельных транспортных процессов каждого из пассажиров; 4) выявлен конструктивный термин, такой как паттерн ежедневной индивидуальной активности пассажира, лежащий в основе изучения закономерностей в поведении пассажиров и согласующийся с предложенным ранее авторами в [1] понятием транспортной системы индивидуальных перемещений (ТСИП); 5) подтверждается намерение продолжать изучение транспортного поведения с помощью теории транспортных макросистем.

Выводы по обзору (проблематике)

Исходя из вышеприведенных материалов, можно сделать вывод о том, что транспортное поведение населения изучается как ино-

странными, так и отечественными учеными и специалистами транспортной отрасли, однако глубина и изученность темы не позволяют говорить о том, что есть обобщенные схемы, модели и математическое описание поведения пассажиров.

Важно отметить, что в отечественной и зарубежной литературе мало информации о том, как именно пассажир принимает решение о том, совершит он поездку или нет, т. е. поведенческие модели практически не исследуются.

Основные направления продолжения изучения транспортного поведения могут быть следующие:

- разработка теоретического аппарата для описания «транспортного поведения»;
- разработка математической модели транспортной системы индивидуальных перемещений;
- построение системы управления ТП.

Дальнейшие исследования авторы настоящей работы проводят с позиций теории сложных систем, теории макросистем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве основного метода исследования в статье применяется общий системный подход. Дополнительно применяется метод анализа паттернов в нелинейной динамике.

Модели поведения пассажиров, а также их реакции на изменения, происходящие в транспортной системе, можно описывать с помощью термина «паттерн». Рассмотрим определение и описание данного термина, которые встречаются в литературе. Отметим, что применение данного термина возможно на различных структурных уровнях, относящихся к ТП. Слово «паттерн» (pattern) имеет английское происхождение и в буквальном смысле переводится как «образец», «модель», «форма», «тип», «шаблон»⁴. Для понимания того, насколько широко данный термин может использоваться в различных системах, результаты анализа представлены нами в виде таблицы.

Из таблицы видно, что паттерн может возникать на различных структурных уровнях транспортной системы и состоять из совершенно разных наборов количественных данных. Кроме этого, необходимо использовать различные аналогии между транспортными

⁴ Мюллер В.К. Англо-русский словарь: 40000 сл. / В.К. Мюллер, С.К. Боянус. М.: Астрель; Аст; Ермак, 2003. – 1424 с., С. 418.

Таблица
Паттерны в различных системах

Table
Patterns in various systems

№ п /п	Тип системы	Описание паттерна	Аналогия и/или пример использования в ТСИП
1	Физико-химическая (активная среда)	В работах [16, 17, 18] изучается распределенная стохастическая модель брасселятора с диффузией. В зоне неустойчивости Тьюринга генерируется множество устойчивых пространственно неоднородных паттернов. Изучаются вызванные шумом переходы между сосуществующими паттернами. Стохастическая чувствительность паттерна составляет количественно, определяется как среднеквадратичное отклонение от исходного невынужденного паттерна	Пространственно-временные структуры распределения пассажиров в ЦМТ в течение дня
2	Социальная (поведение индивидов в обществе)	«Отдельные поведенческие паттерны и целостная личность представляются всесторонне обусловленными теми типами ситуаций и цепочками опыта, с которыми индивид сталкивается в ходе своей жизни. Региональные и экологические исследования поведения, с которыми идентифицируются Парк, Бёрджесс, Трэшер, Шоу, Зорбо и др., пытаются измерить, какое влияние на формирование паттернов поведения в сообществе оказывают конфигурация и диспозиция социальных стимулов, представленных институтами, местами, социальными группами и индивидуальными личностями» [14]	Предполагается, что наборы и конфигурации стимулов как инструмент «воспитания» необходимого транспортного поведения может использоваться на практике. Пример: платное парковочное пространство
3	Социокультурная среда	<i>В статье¹ рассматривается процесс идентификации человека и группы людей в социально-культурных процессах с точки зрения реакции на события различного происхождения. События в процессе цивилизационного развития рассматриваются как изменения состояния различных параметров социальной реальности. События выступают маркерами-маяками, они по определению значимы и ценны для личности и общества, находятся на виду, и по ним можно ориентироваться в современном информационном обществе. Серии событий формируют поведенческие паттерны отдельных людей и групп в социальной реальности, представляют собой разметку социального пространства, разделяют и объединяют людей, придают смыслы, участвуют в создании норм и ценностей общества</i>	Подход может быть транслирован в теорию транспортных систем с позиции оценки влияния серии событий на формирование паттернов поведения, т.е. позволяет рассмотреть это как динамический процесс, создаваемый событийным рядом и формирующим событийные последовательности в транспортных системах
4	Системы с искусственным интеллектом (автоматизация производства)	Паттерны поведения формируются в процессе обучения, воспитания, а также в наблюдениях за окружающими. С учетом особенностей наблюдаемых объектов, постоянных изменений поведенческих характеристик во времени и пространстве состояний необходимо группирование наблюдаемых признаков для анализа и синтеза. Подход основан на использовании группировки характеристик, получаемых от автономного устройства в поведенческие «паттерны» [15]	Автономные устройства, беспилотные транспортные средства, производство «без участия человека», что обуславливает необходимость контроля процессов управления, связанных с мехатронными устройствами

¹ Герасимов С. В. Событийная идентичность // Человек. Культура. Образование – Human. Culture. Education. 2021, №1 (39). С.25–39. <https://doi.org/10.34130/2233-1277-2021-1-25>.

5	Транспортная система	Обзор [19] показывает, как модель мобильности российских городов отличается от моделей, существующих в других частях мира, включая США, Европу и некоторые азиатские примеры, чтобы определить правильные «образцы для подражания» с наиболее близкими показателями поведения в поездках	Набор количественных показателей транспортного поведения: частота поездок, среднее пройденное расстояние, цель поездки, распределение по видам транспорта и время в пути – это паттерн в ТСИП
6	Транспортная система городов	К фундаментальным принципам развития городов относятся: иерархия приоритетов в городе; принцип «80:20»; «здоровые улицы – здоровые люди», «совершенные улицы»; нулевая терпимость к ДТП (Vision Zero); развитие сети велодорожек и скоростного экологически чистого рельсового общественного транспорта; создание преимущественных прав проезда для общественного транспорта; компактность, полицентричность, транзитно-ориентированность городских территорий; интернализация внешних эффектов от автотранспорта; умный транспорт, мультимодальность транспортных узлов; рассмотрение транспортной системы как интегральной составляющей устойчивости города (холистический взгляд). Выявлено, что в проанализированных стратегиях мобильности транспорт как стратегическое направление органично вписан в общую траекторию устойчивого долгосрочного развития и повышения «подлинного человеческого благополучия» [20]	Иерархия приоритетов в городе означает наличие системы приоритетов, не только финансовых, но и ценностных; принцип «80:20» – повышение доли экомобильности (доля устойчивых видов передвижений до 80% и снижению доли автомобилей до 20%) и т. д. Набор конкретной реализации принципов представляется как паттерн развития городской транспортной системы
7	Транспортный поток	Реализация паттерна «Легковес»: на основе платформы моделирования SUMO могут разрабатываться различные решения для имитационного микроскопического моделирования транспортных потоков (ТП), в том числе браузерные (веб-ориентированные). Предлагается подход к веб-ориентированному моделированию ТП, обеспечивающий снижение требований к аппаратному обеспечению клиентского компьютера и сетевому подключению ²	При микроскопическом подходе каждое транспортное средство описывается габаритами, весом, пространственным положением, скоростью и функцией ускорения. Отображение таких детализированных данных о ТП в браузере позволяет собирать более или менее однородные группы ТС, ведущих себя практически одинаково (паттерн)
8	Пассажиропоток	Выделены несколько паттернов поведения пассажиров на автобусных остановках [21]. Проведено несколько сеансов моделирования перемещений пассажиров между остановками городского пассажирского общественного транспорта, принадлежащим разным уровням привлекательности остановок для пассажиров. Рассмотрены особенности квазидетерминированного перемещения пассажиров между остановками городского пассажирского транспорта, не включенными в список остановок массового привлечения пассажиропотока, и точками массового привлечения пассажиров	Типичные закономерности в выборе остановок назначения и в часовом потоке пассажиров от остановок отправления, ежедневные посещения остановок массового привлечения пассажиропотока также могут в совокупности представлять собой коллективный паттерн транспортного поведения пассажиров

² Головин О.К. Повышение эффективности использования аппаратных ресурсов браузерными программными средствами моделирования транспортного потока / О.К. Головин, К.В. Пупынин // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2019) [Электронный ресурс] : труды Международной научно-технической конференции / [редкол.: Прохоров С. А. (гл. ред.) и др.]. Самара: Издательство Самарского научного центра РАН. 2019. С. 433–434.

системами и системами иной природы, в том числе социальными, психологическими, техническими, физико-химическими, делая акцент на сложности поведения этих сравниваемых систем. Таким образом, можно заключить, что анализ паттерна транспортного поведения необходимо осуществлять с учетом следующих особенностей:

- 1) иерархичность, т.е. наличие нескольких структурных уровней;
- 2) нелинейность, т.е. сложная взаимосвязь элементов, приводящая к множеству различных возможностей развития и бифуркациям;
- 3) наличие аналогий с поведением естественных систем (физических, химических и других).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Транспортная система индивидуальных перемещений – это идеалистическая система, которая распространяется на дотранспортную, транспортную и послетранспортную фазы в соответствии с определением транспортного процесса. Учитывая циклический характер транспортных процессов (или циклический характер функционирования ТС), можно послетранспортную фазу для индивида рассматривать в виде оценки эффективности поездки (рисунок 2).

Чем лучше индивиды знают о ТС, тем «правильнее» они будут себя «вести». Таким образом, возникает идея об улучшении информированности населения о реальной ТС. Другими способами управления идеалистическими системами являются:

- демонстрация примеров «лучших практик»;
- создание системы стимулов и ограничений;
- создание сервисов, обеспечивающих информирование обо всех вышеуказанных функциях;
- долговременные системы обучения;
- создание интегральных информационных платформ обработки данных и принятия решений;
- создание системы индикаторов эффективности (архитектуры индикаторов) по

оценке эффективности принимаемых решений (проектов).

Определение сложных систем по Олемскому:

«В связи с этим особую актуальность приобрели исследования коллективного поведения, проявляющегося в самоорганизации физических, биологических, социальных и других систем. Благодаря тому что их поведение может изменяться непредсказуемым образом в зависимости от состояния их составляющих и внешних условий, такие системы получили название сложных»⁵.

Представляется интересным совмещение классических способов расчета спроса и предложения на рынке пассажироперевозок и искусственного интеллекта (наложение нейронных сетей, семантический нейросетевой анализ проектирования интеллектуальных систем и т. д.).

В книге⁶ большое внимание уделено рассмотрению понятия «сложная система», а также описанию сложных систем с позиций термодинамики, статистической физики и синергетического подхода. Автор приводит примеры сложных систем в физике, биологии, химии, технике и т. д.; причем сложность системы обуславливается не только большим количеством элементов, но и сложным поведением самой системы.

С позиций теории транспортных макросистем паттерном можно назвать совокупность конкретных состояний, которые «выбирает» элемент (индивид, транспортное средство и т. д.), различных структурных уровней транспортной макросистемы из подмножества допустимых.

На рисунке 2 обозначены: А – дотранспортная фаза; В – транспортная фаза; С – послетранспортная фаза; 1 – масштабный уровень транспортного района; 2 – масштабный уровень маршрута; 3 – масштабный уровень транспортной системы.

Пространственно-временная диаграмма показывает распределение транспортных систем по объемам перевозок, распределение маршрутов по пассажиропотокам, распределение транспортных районов по объемам прибытий-отправлений.

Данную диаграмму можно построить как для одного пассажира, так и для какой-либо

⁵ Олемской А.И. Синергетика сложных систем: Феноменология и статистическая теория. М.: Красанд, 2009. 379 с.

⁶ Хакен Г. Информация и самоорганизация: Макроскопический подход к сложным системам. Пер. с англ. / Предисл. Ю.Л. Климонтовича. Изд. 3-е, испр. и знач. доп. М.: УРСС: ЛЕНАРД, 2014. 320 с.

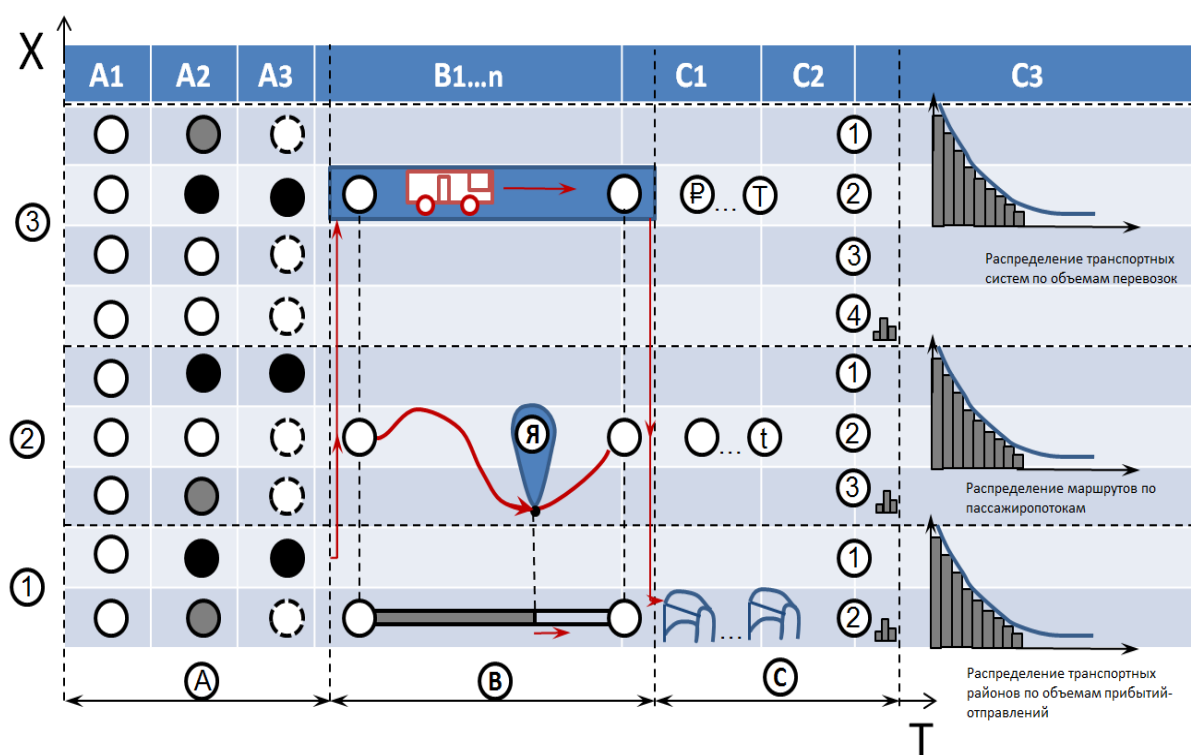


Рисунок 2 – Пространственно-временная диаграмма транспортного поведения

Figure 2 – Space-time diagram of transport behavior

совокупности индивидов, «собранных» по различным признакам:

- а) в рамках общей целевой группы (по целям поездки);
- б) в рамках общей социальной группы (по принципам социального поведения);
- в) в рамках профессионального сообщества (при решении крупной производственной задачи).

Изучение и анализ ПВД на транспортной фазе позволит оптимизировать дорожную обстановку города путем организации координированного трафика, кратных переключений фаз работы светофоров, фазового сдвига между перекрестками и другими воздействиями, которые допускаются в интеллектуальных транспортных системах.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложен новый подход к описанию транспортного поведения с позиций различных научных дисциплин, теории макросистем, что закладывает базис для создания теории транспортного поведения, которая в настоящее время отсутствует.

Обобщен материал и отмечены наиболее важные проблемы в данной области. Так, различными учеными решены следующие задачи: выполнено определение теоретической базы, составлен методический инструментарий, сделан сбор и анализ количественных данных, характеризующих транспортное поведение. В рамках подхода к социоприродо-экономическим системам предполагаются мероприятия, рациональные для транспортной системы, устойчивые для здоровья людей и окружающей среды и требующие минимальных экономических ресурсов. В иностранной литературе также обсуждается вопрос о транспортной мобильности, подвижности в связи с транспортным поведением населения городов.

Следует отметить, что в научной литературе мало информации о том, как именно пассажир принимает решение о том, совершит он поездку или нет, т. е. поведенческие модели практически не исследуются.

Основные направления исследования транспортного поведения могут быть следующие:

- разработка теоретического аппарата для описания «транспортного поведения»;
- разработка математической модели транспортной системы индивидуальных перемещений;
- построение системы управления ТП.

Исследования проводятся с позиций теории сложных систем, с использованием практически всего аппарата теории макросистем.

В результате исследований получено: 1) формулировка системы, которая наиболее полным образом отражает сущность «транспортного поведения», – это транспортная система индивидуальных перемещений; 2) показано, что построение такой системы лучше всего делать в рамках теории макросистем; 3) предложено такое понятие как «пространственно-временная диаграмма» транспортного поведения, установлена ее связь с традиционным термином нелинейной динамики, таким как «паттерн поведения нелинейной системы»; 4) предложено развитие термина «граф транспортного поведения» в направлении учета всех фаз транспортного процесса (дотранспортная, транспортная, послетранспортная), что отражается на ПВД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агуреев И.Е., Ахромешин А.В. Подходы к формализации понятия транспортного поведения населения городских агломераций // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2021. № 2. С. 60–70. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-2-60.
2. Швецов В.И. Проблемы моделирования передвижений в транспортных сетях // ТРУДЫ МФТИ. 2010. Том 2, № 4. С. 169–179.
3. Швецов В.И. Моделирование транспортных потоков в крупном городе с применением к Московской агломерации / А.С. Алиев, А.И. Стрельников, В.И. Швецов, Ю.З. Шершевский // Автоматика и телемеханика. 2005. № 11. С. 113–125.
4. Carrothers G.A.P. An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction // J. American Instit. Planners. 1956. V. 22. P. 94–102.
5. Wilson, A.G. A statistical theory of spatial distribution models. *Transportation Research*, 1967, Vol. 1, Iss. 3, pp. 253–269. DOI: [https://doi.org/10.1016/0041-1647\(67\)90035-4](https://doi.org/10.1016/0041-1647(67)90035-4).
6. Wilson, A.G. *Complex Spatial Systems. The Modelling Foundations of Urban and Regional Analysis*. 1st ed., London, 2000, 184 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315838045>.
7. Wilson, A.G. *The «Thermodynamics» of City: Evolution and Complexity Science in Urban Modelling. Complexity and Spatial Networks, Advances in Spatial Science*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009, pp. 11–31. [Электронный ресурс]: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-01554-0_2. Доступ 21.02.2020.
8. Федоров В.А. Транспортное поведение индивидуумов – основной источник городских транспортных проблем // Молодой ученый. 2015. № 18 (98). С. 309–316.
9. Сложные саморазвивающиеся транспортные системы / Корчагин В.А. [и др.] // Мир транспорта и технологических машин 2016. № 2 (53). С. 110–116.
10. Корчагин В.А., Ризаева Ю.Н. Ноосферологические подходы создания социоприродоэкономических транспортно-логистических систем // Автотранспортное предприятие. 2012. № 1.
11. Urban sustainable mobility. Part 2: Simulation models and impacts estimation March 2015. *Transport Problems* 10(1):5-16 DOI:10.21307/tp-2015-001. https://www.exeley.com/exeley/journals/transport_problems/10/1/pdf/10.21307_tp-2015-001.pdf
12. R.A.M. Madhuwanthi, Ashu Marasinghe, R.P.C. Janaka Rajapakse, Asanka D. Dharmawansa, Shusaku Nomura, Factors Influencing to Travel Behavior on Transport Mode Choice, *International Journal of Affective Engineering* 15(2), December 2015, DOI: <https://doi.org/10.5057/ijae.IJAE-D-15-00044>.
13. Quan Liang, Jiancheng Weng, Wei Zhou, Selene Baez Santamaria, Jianming Ma, Jian Rong (2018) Individual Travel Behavior Modeling of Public Transport Passenger Based on Graph Construction. Available at: <https://doi.org/10.1155/2018/3859830> / (accessed 09.09.2020).
14. Thomas W.I. The behavior pattern and situation // *Publications of the American sociological society*. – Chicago, 1928. – Vol. 22. – P. 1-13. eLibrary_15340895_58711678.
15. Сухопаров М.Е., Семенов В.В., Лебедев И.С., Гаранин А.В. Подход к анализу состояния узлов «индустрии 4.0» на основе поведенческих паттернов // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12. № 5. С. 83–91. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-5-83-91.
16. Bashkirtseva I., Ryashko L., Slepukhina E. Stochastic generation and deformation of toroidal oscillations in neuron model, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2018, vol. 28, no. 6, pp. 1850070. <https://doi.org/10.1142/S0218127418500700>.
17. Ryashko L. Sensitivity analysis of the noise-induced oscillatory multistability in Higgins model of glycolysis, *Chaos*, 2018, vol. 28, issue 3, pp. 033602. <https://doi.org/10.1063/1.4989982>.
18. Bashkirtseva I., Ryashko L. Stochastic sensitivity and method of principal directions in excitability analysis of the Hodgkin–Huxley model, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2019, vol. 29, no. 13, pp. 1950186. <https://doi.org/10.1142/S0218127419501864>.
19. Савельева Е.О., Лоренс П. Сравнительный анализ моделей городской мобильности в России и за рубежом // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2019. № 3. С. 79–94. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.03.06.
20. Комаров В., Акимов В. Стратегии устойчивой мобильности: лучшие мировые практики // Экономическая политика. 2021. Т. 16, № 1. С. 82–103. DOI: 10.18288/1994-5124-2021-1-82-103.

21. Оценка пригодности модели перемещения пассажиров между остановками городского пассажирского общественного транспорта для выявления скрытых закономерностей поведения пассажиропотока / Крушель Е.Г. [и др.] // Инженерный вестник Дона. 2021 № 4. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2021/6936.

REFERENCES

1. Agureev I.E., Ahromeshin A.V. Podhody k formalizatsii ponyatiya transportnogo povedeniya naseleniya gorodskih aglomeratsiy [Approaches to formalization of the concept of transport behavior of the population of urban agglomerations] // *Intellekt. Innovacii. Investicii*. 2021. 2: 60–70. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-2-60. (in Russian)
2. Shvecov V.I. Problemy modelirovaniya peredvizhenij v transportnyh setyah [Problems of modeling movements in transport networks] *JTRUDY MFTI*. 2010.2(4): 169–179. (in Russian)
3. Shvecov V.I. Modelirovanie transportnyh potokov v krupnom gorode s primeneniem k moskovskoj aglomeratsii [Modeling of traffic flows in a large city with application to the Moscow agglomeration] // *Avtomatika i telemekhanika*. 2005. № 11. S. 113–125.
4. Carrothers G.A.P. An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction // *J. American Instit. Planners*. 1956. V. 22. P. 94–102.
5. Wilson, A.G. A statistical theory of spatial distribution models. *Transportation Research*, 1967, Vol. 1, Iss. 3, ss. 253–269. DOI: [https://doi.org/10.1016/0041-1647\(67\)90035-4](https://doi.org/10.1016/0041-1647(67)90035-4).
6. Wilson, A.G. *Complex Spatial Systems. The Modelling Foundations of Urban and Regional Analysis*. 1st ed., London, 2000, 184 r. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315838045>.
7. Wilson, A.G. The «Thermodynamics» of City: Evolution and Complexity Science in Urban Modelling. *Complexity and Spatial Networks, Advances in Spatial Science*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009: 11–31. [Elektronnyj resurs]: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-01554-0_2. Dostup 21.02.2020.
8. Fedorov V.A. Transportnoe povedenie individuumov – osnovnoj istochnik gorodskih transportnyh problem [The transport behavior of individuals is the main source of urban transport problems] // *Molodoj uchenyj*. 2015.18 (98): 309–316. (in Russian)
9. Slozhnye samorazvivayushchiesya transportnye sistemy [Complex self-developing transport systems] Korchagin V.A., Novikov A.N., Lyapin S.A., Rizaeva Yu.N. // *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin* 2016 2 (53): 110–116. (in Russian)
10. Korchagin, V.A. Noosferologicheskie podhody sozdaniya socioprirodoekonomicheskikh transportno-logisticheskikh sistem [Noospherological approaches to the creation of socio-socio-economic transport and logistics systems] // *Avtotransportnoe predpriyatie*. 2012: 1. (in Russian)
11. Urban sustainable mobility. Part 2: Simulation models and impacts estimation March 2015. *Transport Problems* 10(1):5–16 DOI:10.21307/tp-2015-001. https://www.exeley.com/exeley/journals/transport_problems/10/1/pdf/10.21307_tp-2015-001.pdf.
12. R.A.M. Madhuwanthi, Ashu Marasinghe, R.P.C. Janaka Rajapakse, Asanka D. Dharmawansa, Shusaku Nomura, Factors Influencing to Travel Behavior on Transport Mode Choice, *International Journal of Affective Engineering* 15(2), December 2015, DOI: <https://doi.org/10.5057/ijae.IJAE-D-15-00044>.
13. Quan Liang, Jiancheng Weng, Wei Zhou, Se-lene Baez Santamaria, Jianming Ma, Jian Rong (2018) Individual Travel Behavior Modeling of Public Transport Passenger Based on Graph Construction. Available at: <https://doi.org/10.1155/2018/3859830> / (accessed 09.09.2020).
14. Thomas W.I. The behavior pattern and situation // *Publications of the American sociological society*. – Chicago, 1928. 22: 1–13. [elibrary_15340895_58711678](https://elibrary.15340895_58711678).
15. Suhoparov M.E., Semenov V.V., Lebedev I.S., Garanin A.V. Podhod k analizu sostoyaniya uzlov «industrii 4.0» na osnove povedencheskikh patternov [An approach to analyzing the state of Industry 4.0 nodes based on behavioral patterns] // *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyah Zemli*. 2020. 12(5): 83–91. doi: 10.36724/2409-5419-2020-12-5-83-91.
16. Bashkirtseva I., Ryashko L., Slepukhina E. Stochastic generation and deformation of toroidal oscillations in neuron model, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2018, 2(6): 1850070. <https://doi.org/10.1142/S0218127418500700>.
17. Ryashko L. Sensitivity analysis of the noise-induced oscillatory multistability in Higgins model of glycolysis, *Chaos*, 2018, 28(3): 033602. <https://doi.org/10.1063/1.4989982>.
18. Bashkirtseva I., Ryashko L. Stochastic sensitivity and method of principal directions in excitability analysis of the Hodgkin-Huxley model, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2019, 29 (13): 1950186. <https://doi.org/10.1142/S0218127419501864>.
19. Savel'eva E.O., Lorens P. Sravnitel'nyj analiz modelej gorodskoj mobil'nosti v Rossii i za rubezhom [Comparative analysis of urban mobility models in Russia and abroad] // *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika*. 2019. 3: 79–94. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.03.06. (in Russian)
20. Strategii ustojchivoj mobil'nosti: luchshie mirovye praktiki [Sustainable mobility strategies: world's best practices] // Komarov, V Akimova // *Ekonomicheskaya politika*. 2021. 16(1): 82–103 DOI: 10.18288/1994-5124-2021-1-82-103. (in Russian)
21. Krushel' E.G., Ogar T.P., Panfilov A.E., Stepanchenko I.V., Stepanchenko O.V. Ocenka prigodnosti modeli peremeshcheniya passazhirov mezhdu ostanovkami gorodskogo passazhirskogo obshchestvennogo transporta dlya vyyavleniya skrytykh zakonov mernostej povedeniya passazhiropotoka [Assessment of the suitability of the model of passenger movement

between stops of urban passenger public transport to identify hidden patterns of passenger traffic behavior] // *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2021. 4 –2021ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2021/6936. (in Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Агуреев И.Е. Формулировка научных положений публикации, постановка и решение задач исследований.

Ахромешин А.В. Разработка краткого обзора, решение поставленных задач исследования.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Igor E. Agureev - The formulation of the publication's scientific statements and the formulation and resolution of the research objectives.

Andrey V. Akhromeshin - Development of a brief overview, achievement of the objectives of the study.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Агуреев Игорь Евгеньевич – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство».

Ахромешин Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство».

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor E. Agureev, Dr. of Sci., Professor, Head of the Automobiles and Automobile Industry Department.

Andrey V. Akhromeshin, Cand. of Sci., Associate Professor of the Automobiles and Automobile Industry Department.

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Научная статья
 УДК 691.327.333
 УДК 666.9: 66.022.3
 DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-760-771>

ЦЕМЕНТНЫЕ КОМПОЗИЦИИ С КОМПЛЕКСНЫМИ МОДИФИЦИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ НА ОСНОВЕ ВОДНОГО РАСТВОРА ГЛИОКСАЛЯ

А.И. Кудяков, А.С. Симакова, А.Б. Стешенко

Томский государственный архитектурно-строительный университет,
 г. Томск, Россия

kudyakow@mail.tomsknet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8927-6833>

ushakova.anutka@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0859-5224>

steshenko.alexey@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2468-3147>

АННОТАЦИЯ

Введение. В связи с многокомпонентностью состава цементный бетон обладает высоким потенциалом повышения технических характеристик путем управления технологическими процессами или качеством исходных материалов, что позволяет разрабатывать композиты с заданными требованиями для строительства современных ресурсо- и энергоэффективных зданий, в том числе для северных территорий России. При переходе на микроуровень формирования структуры цементных бетонов открываются новые возможности для направленного регулирования свойств. Исходя из этого, для повышения качества бетонов посредством улучшения структуры цементного камня предложен метод введения в смесь добавок модификаторов, направленно воздействующих на новообразования в системе «цемент-вода», что дает возможность управлять процессом структурообразования цементного камня.

Материалы и методы. Проведены исследования с применением методов испытаний, изложенных в национальных стандартах, и физико-химического анализа: термического анализа и электронной растровой микроскопии. Приведены результаты исследования влияния комплексных модифицирующих добавок (КМД) на основе водного раствора глиоксала и органических кислот на реологические и прочностные свойства цементного камня, определены закономерности процессов и механизм структурообразования модифицированного цементного теста.

Результаты. Установлены оптимальные составы цементной композиции на основе водного раствора глиоксала. В первые сутки твердения цементного камня с КМД, включающей полимолочную кислоту и водный раствор глиоксала, а также молочную кислоту и водный раствор глиоксала, прочность повышается на 23,5%, а в 28-суточном возрасте – до 63% по сравнению с контрольным составом. Физико-химическими исследованиями установлено, что в цементном камне с КМД на основе водного раствора глиоксала и органических кислот повышается плотность и однородность структуры, а также увеличивается содержание низкоосновных гидросиликатов.

Заключение. Разработанные комплексные добавки рекомендованы для использования при производстве цементных бетонов с требуемой скоростью структурообразования и высокой прочностью.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: конструкционные и конструкционно-теплоизоляционные бетоны, цементное тесто и камень, 40%-ный водный раствор глиоксала, молочная кислота, полимолочная кислота, нормальная густота, сроки схватывания, структурообразование, прочность при сжатии строительных композиций

Статья поступила в редакцию 02.11.2021; одобрена после рецензирования 10.2021; принята к публикации 14.10.2021.

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: Кудяков А.И., Симакова А.С., Стешенко А.Б. Цементные композиции с комплексными модифицирующими добавками на основе водного раствора глиоксала // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 6(82). С. 760-771. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-760-771>

© Кудяков А.И., Симакова А.С., Стешенко А.Б., 2021



Контент доступен под лицензией
 Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-760-771>

CEMENT BASED COMPOSITIONS WITH COMPLEX MODIFYING ADDITIVES BASED ON GLYOXAL

Aleksander I. Kudyakov, Anna S. Simakova, Aleksey B. Steshenko

Tomsk State University of Architecture and Building,

Tomsk, Russia

kudyakow@mail.tomsknet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8927-6833>

ushakova.anutka@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0859-5224>

steshenko.alexey@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2468-3147>

ABSTRACT

Introduction. Due to the multicomponent composition, cement based concrete has a high potential for improving technical characteristics by controlling technological processes or the quality of raw materials, which makes it possible to develop composites with specified requirements for the construction of modern resource and energy-saving buildings, including for the northern territories of Russia. With the transition to the micro level of the formation of the structure of cement based concretes, new opportunities open up for the directed regulation of properties. Based on this, in order to improve the quality of concrete by improving the structure of the hardened cement paste, a method was proposed for introducing modifiers into the mixture, which directly affect the new growths in the 'cement-water' system, which makes it possible to control the process of structure formation of the hardened cement paste.

Materials and methods. Research has been carried out using test methods set out in national standards and physical and chemical analysis: thermal analysis and scanning electron microscopy. The results of a study of the effect of complex modifying additives (CMA) based on an aqueous solution of glyoxal and organic acids on the rheological and strength properties of hardened cement paste are presented, the regularities of the processes and the mechanism of structure formation of the modified cement paste are determined.

Results. The optimal compositions of a cement based composition based on an aqueous solution of glyoxal have been determined. On the first day of hardening of hardened cement paste with CMA, including polylactic acid and an aqueous solution of glyoxal, as well as lactic acid and an aqueous solution of glyoxal, the strength increases by 23.5%, and at 28 days of age - up to 63% compared to the control composition. Physicochemical studies found that in hardened cement paste with CMA based on an aqueous solution of glyoxal and organic acids, the density and homogeneity of the structure increases, and the content of low-basic hydrosilicates also increases.

Conclusion. The developed complex additives are recommended for use in the production of cement based concretes with the required rate of structure formation and high strength.

KEYWORDS: structural and structural heat-insulating concretes, cement paste and hardened cement paste, 40% aqueous solution of glyoxal, lactic acid, polylactic acid, normal density, setting time, structure formation, compressive strength of building compositions.

The article was submitted 02.11.2021; approved after reviewing 07.10.2021; accepted for publication 14.12.2021.

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: Kudyakov A.I., Simakova A.S., Steshenko A.B. Cement based compositions with complex modifying additives based on glyoxal. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2021; 18 (6): 760-771. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-760-771>

© Kudyakov A.I., Simakova A.S., Steshenko A.B., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

При ресурсном обеспечении объектов строительства современных зданий и сооружений в северных районах России большое внимание уделяется качеству применяемых строительных материалов и прежде всего изделиям на основе цементных композиций. Обеспечение объектов строительства цементными композициями и изделиями на их основе с заданными технологическими свойствами, структурообразованием и эксплуатационными характеристиками является актуальной задачей. Она может быть решена путем развития научных принципов управления структурообразованием в технологиях изготовления современных модифицированных конструкционных и конструкционно-теплоизоляционных бетонов с высокими эксплуатационными характеристиками.

Цементный бетон в связи с многокомпонентностью состава является материалом с высоким потенциалом совершенствования структуры и технических характеристик, что позволяет путем научного обоснования выбора исходных материалов и управления технологическими процессами разрабатывать композиционные цементные материалы с заданными свойствами для строительства современных ресурсо- и энергосберегающих зданий. При управлении структурообразованием цементных композиций существенная роль отводится формированию структуры цементного камня на микроуровне путем повышения дисперсности цемента [1, 2], применения пластифицирующих – модифицирующих добавок [3, 4], изменения значения поверхностного натяжения воды затворения и растворимости вяжущего. Перспективным является использование комплексных добавок, позволяющих на этапе изготовления композиционных материалов решать проблемы обеспечения высоких эксплуатационных требований¹.

Многокомпонентные высокофункциональные модифицирующие добавки изменяют растворимость, взаимодействуют с активными центрами минералов вяжущих, вступают в обменные реакции, что влияет на процессы гидратации и структурообразования строительных смесей на их основе. При этом добавки могут быть прямого действия на минералы вяжущих или являются исходными компонен-

тами для формирования (полимеризации) новообразований, влияющих на структурообразование твердеющих строительных минеральных композиций [7, 8, 9, 10].

В данной работе исследованы два вида модификаторов и их комплексов – замедлители и ускорители твердения. Замедлитель твердения приостанавливает рост новообразований – является регулятором их роста. Ускоритель твердения является центром кристаллизации для новообразований и увеличивает их количество. Поэтому, с точки зрения ускорителя-замедлителя, КМД – это нивелирующие вещества, которые уравнивают процесс набора прочности, а с точки зрения регуляторов кристаллизационных процессов, это два самостоятельных процесса, не противодействующие, а дополняющие друг друга. Замедлитель как ограничитель, а ускоритель как зародыши новых кристаллов, что способствует формированию более плотной и прочной структуры цементного камня.

В качестве модификаторов цементной композиции в работе используются органические бифункциональные кислоты, их соли и олигомеры. По результатам анализа данных физико-химических исследований цементных композиций, можно предположить, что механизм действия КМД тесно связан с растворимостью продуктов и взаимодействия их с ионами кальция, дозировкой и строением молекул [11]. Нерастворимые продукты взаимодействия солей органических кислот локализуются либо в объеме жидкой фазы, либо в виде экранирующих пленок на поверхности цементных зерен [12]. Если величина произведения растворимости (ПР) у образующихся малорастворимых соединений ниже, чем ПР у гидратированных новообразований, то они кристаллизуются первыми и становятся центрами новообразований. Если ПР образующейся органической соли соизмерима с ПР новообразований, то образование кристаллов происходит одновременно. В этом случае на структурообразование цементного камня будет влиять дозировка модификатора и строение молекулы органического соединения, так как от последнего зависит способность к адсорбции на поверхности новообразования. В случае если растворимое соединение не сорбируется на поверхности, то оно как электролит является коагулятором коллоидной системы. Особенности гидрата-

¹ Сахибгареев Р.Р. Управление процессами структурообразования модифицированных цементных бетонов: дисс. доктора тех. наук: УГНТУ. Уфа. 2010. 367 с.

ции цемента в присутствии органических кислот и их солей определяет кинетику твердения цементного камня в модифицированных бетонах [13, 14].

Установлено, что наиболее сильными замедлителями твердения бетонов являются органические оксикислоты и их соли [15]. В работе [15] Н.А. Орловой выявлено, что «для ряда бифункциональных соединений органических кислот (лактат, 2-нафтол – 6-сульфонат натрия, гликокол, аланин, салицилат натрия) характерно замедление твердения в ранние сроки и увеличение прочности в возрасте 28 сут на 10–25% по сравнению с бездобавочным материалом». Как отмечает автор: «при этом снижение скорости твердения совпадает с повышением скорости поступления ионов кальция в жидкую фазу. Следовательно, лимитирующей стадией гидратационного твердения является кристаллизация гидратных фаз. Таким образом, замедление твердения бетонов, модифицированных бифункциональными соединениями, обусловлено их адсорбцией на зародышах кристаллизации гидратных фаз. С другой стороны, формирование более мелкокристаллической структуры и повышение степени гидратации белита способствует приросту прочности цементного камня в более поздние сроки»².

Полимолочная и полигликолевая кислоты – это поликонденсационные полимеры молочной и гликолевой кислот и являются бифункциональными α -оксикислотами.

При проведении исследований использовались представители оксикарбоновых кислот – молочная и гликолевая кислоты и их соли³ [16].

Для повышения качества цементных бетонных смесей и бетона на кафедре строительных материалов и технологий ТГАСУ было проведено исследование добавок на основе глиоксаля [17, 18], а также изучено влияние отдельных органических кислот и солей на реологические свойства цементного теста и прочность камня⁴ [3, 10, 19, 20, 21].

Цель исследования – установление закономерностей структурообразования цементных

композиций с комплексными модифицированными добавками на основе водного раствора глиоксаля и органических кислот.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения экспериментальных исследований использовались материалы, соответствующие требованиям строительных нормативных документов. В качестве вяжущего вещества использовался портландцемент ЦЕМ II/A-Ш 32.5Н (ГОСТ 31108–2020) ООО «Топкинский цемент», жидкости затворения – водопроводная вода (ГОСТ 23732–2011).

В качестве добавки, ускоряющей структурообразование цементных композиций, применялись:

- 40%-ный водный раствор глиоксаля, получаемый окислительным дегидрированием этиленгликоля (ТУ 2633-003-67017122-2011). В водном растворе глиоксаль находится в форме гидрата глиоксаля ($C_2H_2O_2$).

При разработке комплексных модифицирующих добавок использовались органические кислоты совместно с водным раствором глиоксаля:

- молочная кислота (LA) – водный раствор 80% концентрации в виде прозрачной, желтоватой жидкости, с запахом молочной сыворотки. Изготовитель фирма Purac (Нидерланды);
- гликолевая кислота (GA) – водный раствор 67% концентрации ((Purac, Нидерланды);
- олигомеры из молочной и гликолевой (Acros Organics, США) кислот, получаемые методом поликонденсации в лаборатории полимеров и композиционных материалов НИ ТГУ [19].

Оксалат кальция $Ca(Ox)$ – соль щелочземельного кальция и двухосновной щавелевой кислоты.

Используемые добавки в соответствии с ГОСТ 12.1.007–76 относятся к третьему классу опасности (умеренно опасные).

По результатам ранее проведенных исследований научно обосновано несколько вариантов комплексных добавок, состоящих из двух различных органических соединений, в соответствии со следующей схемой: полимо-

² Орлова Н.А. Бетоны с регуляторами скорости твердения на основе солей органических кислот: автореф. дисс. канд. ... техн. наук. Москва. 1991. 21 с.

³ Седуш Н.Г. Кинетика полимеризации лактида и гликолида. Свойства и биомедицинские применения полученных полимеров: дис. канд. хим. наук / Н.Г. Седуш; Курчатовский институт. 2015. 151 с.

⁴ Ботвин В.В., Шаповалова Е.Г., Зенкова Е.В., Поздняков М.А. Синтез олигомеров гликолевой и молочной кислот // Сборник научных трудов X Международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук». 2013. С. 266–268.

лочная кислота и водный раствор глиоксаля (PLA+GI 0,01); молочная кислота и водный раствор глиоксаля (LA+GI 0,01); гликолевая кислота и водный раствор глиоксаля (GA+GI 0,01); гликолевая кислота и оксалат кальция (GA+CaOx).

Для исследования влияния комплексных добавок на фазовый состав, структуру и свойства цементного камня применяли стандартные методы испытаний, изложенные в национальных стандартах, и методы физико-химического анализа: термический анализ и электронная растровая микроскопия.

Исследование влияния добавок на прочностные свойства цементного камня проводили на образцах-кубиках размером 20x20x20 мм из цементного теста нормальной густоты. Для проведения физико-химических исследований были отобраны пробы из разрушенных образцов каждого состава после проведения механических испытаний.

Для изучения влияния модифицирующих добавок на структуру цементного камня применялась растровая электронная микроскопия с использованием прибора HitachiTM 3000. Характер структуры определялся визуально. Снимки получены в режиме низкого вакуума при стабильном ускоряющем напряжении до 30 кВ. Обработка снимков сделана с помощью компьютерной программы.

Дифференциальный термический анализ проводился на дериватографе STA 409 PCLUXH+ квадрупольный масс-спектрометр QMS 403 AEOLUS.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Твердение и формирование эксплуатационных свойств цементных бетонов с химическими добавками происходит преимущественно за счет структурообразования цементного теста и камня.

На основе результатов ранее выполненных исследований строительных смесей с модифицирующими добавками [3, 9, 10, 20, 21, 22, 23] положительный эффект достигается преимущественно за счет управления микроструктурой композита, а именно изменения (ускорения) структурообразования цементного камня. Поэтому в качестве основных критериев оценки положительного эффекта цементных композиций с КМД выбраны: нормальная густота цементного теста, сроки схватывания и кинетика структурообразования (прочность на сжатие в различные сроки твердения).

Исследование цементного теста нормальной густоты позволило установить, что при совместном введении добавок PLA+GI 0,01 снижается количество воды затворения цементного теста на 10% по сравнению с нормальной густотой контрольного состава. Эффект пластификации цементного теста объясняется адсорбцией гидрофобных молекул PLA на поверхности дисперсных частиц цемента. В цементном тесте с остальными КМД нормальная густота цементного теста снижается на 1,8–2,7%.

Влияние комплексных модифицирующих добавок на сроки схватывания цементного теста приведены на рисунке 1.

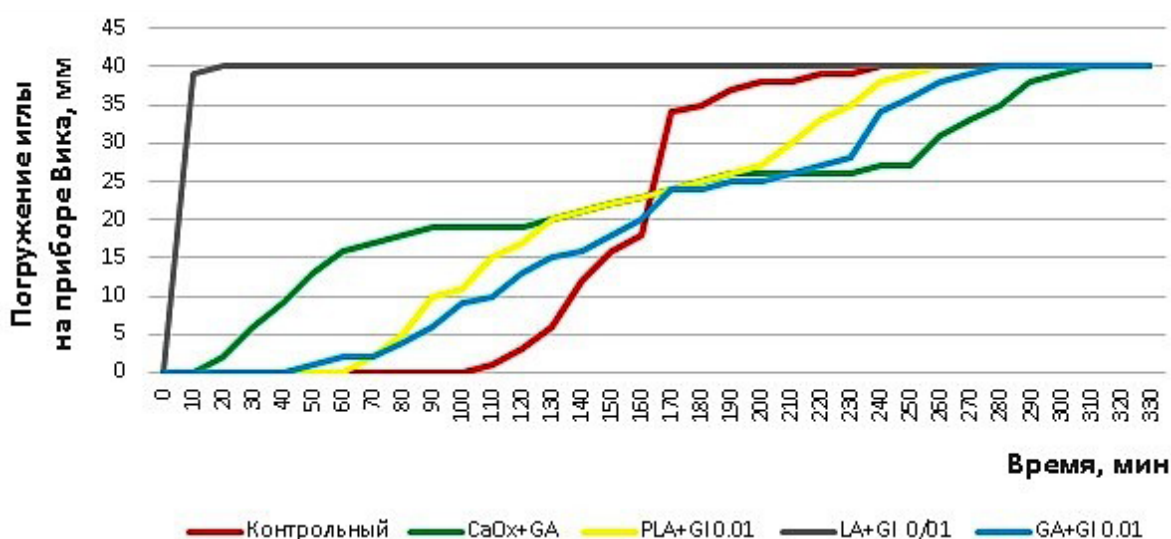


Рисунок 1 – Схватывание цементного теста с комплексными добавками

Figure 1 – Cement paste with complex additives setting

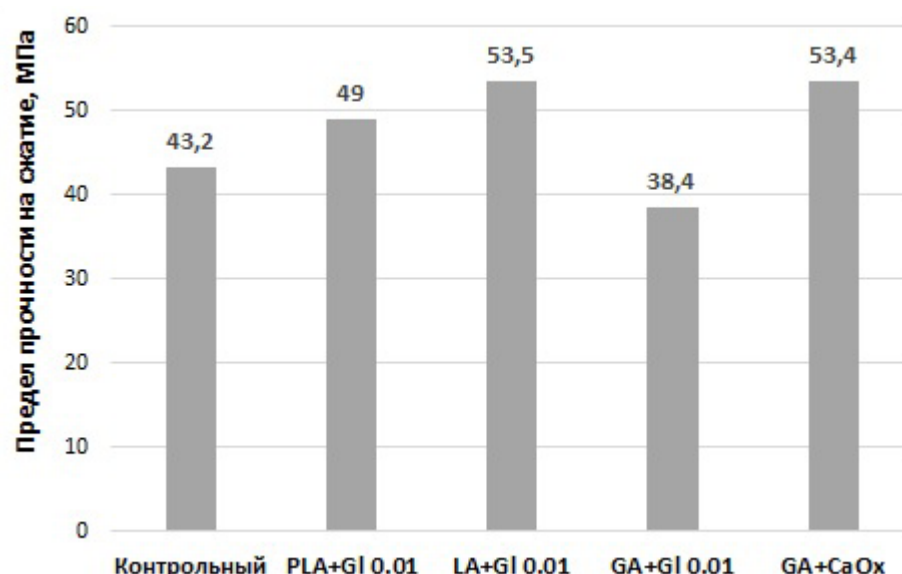


Рисунок 2 – Предел прочности при сжатии цементного камня с КМД в возрасте 3 сут

Figure 2 – Compressive strength of hardened cement paste with CMA at the age of 3 days

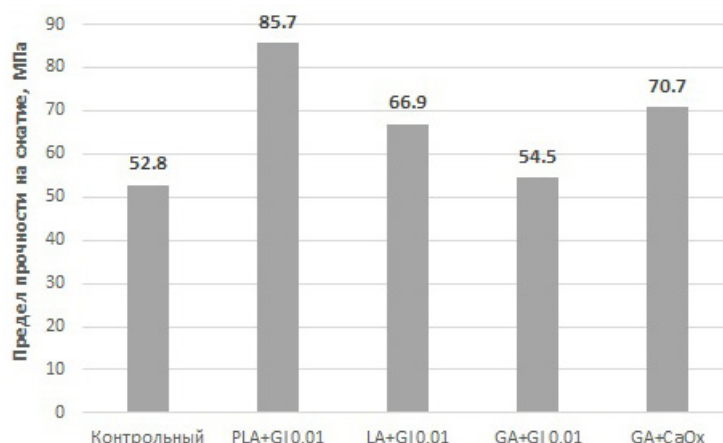


Рисунок 3 – Предел прочности при сжатии цементного камня с КМД в возрасте 28 сут

Figure 3 – Compressive strength of hardened cement paste with CMA at the age of 28 days

Все вышеуказанные комплексные добавки ускоряют начало сроков схватывания. Цементное тесто с КМД состава LA+GI 0,01 схватывается за 20 мин.

Далее были проведены исследования прочностных показателей цементного камня с КМД в ранние сроки твердения и в возрасте 28 сут применительно к возведению монолитных строительных конструкций в летнее время при повышенной температуре, необходимости повышения разопалубочной прочности или оборачиваемости. Результаты определения прочности при сжатии показаны на рисунках 2, 3.

В ранние сроки твердения в цементном камне с КМД LA+GI 0,01 и GA+CaOx прочность повышается на 23,5% по сравнению с контрольным составом.

Наибольший прирост прочности цементного камня модифицированного КМД наблюдается в 28-суточном возрасте. Исходя из результатов испытаний в возрасте 28 сут (см. рисунок 3), существенный прирост прочности цементного камня (на 63% по сравнению с контрольным образцом) обеспечивается с КМД PLA+GI 0,01. У образцов с КМД LA+GI 0,01 и GA+CaOx прирост прочности состав-

ляет от 27 до 34%. При использовании КМД GA+GI 0,01 наблюдается незначительное повышение прочности на сжатие – на 3%.

Для установления механизма формирования структуры цементного камня необходимо идентифицировать фазы, образующиеся в установленное время твердения и степень кристалличности структуры образца. Проведены физико-химические исследования цементного камня в возрасте 28 сут с двумя наиболее эффективными КМД: молочная кислота и глиоксаль – наибольшая ранняя прочность;

полимолочная кислота и глиоксаль – наибольшая прочность в возрасте 28 сут.

На микроснимках цементного камня с КМД PLA+GI 0,01 и LA+GI 0,01 показано, что структуры почти одинаковы (рисунок 4). Однако в структуре цементного камня с КМД молочная кислота с глиоксалем наблюдаются крупные фрагменты кристаллитов и структура более однородна, чем у камня с полимолочной кислотой и глиоксалем.

На рисунке 5 в структуре прослеживаются скрученные в трубочки чешуйки с размерно-

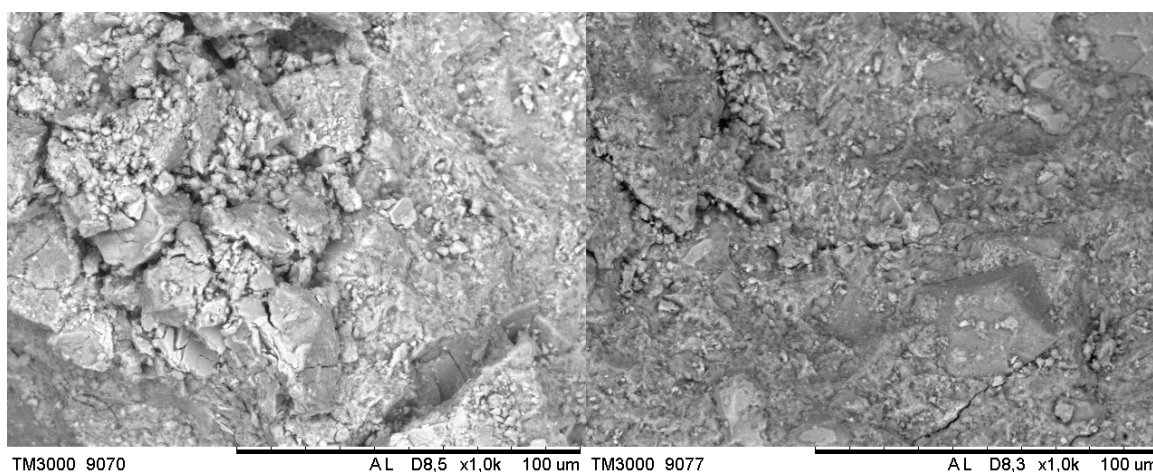


Рисунок 4 – Микрофотография цементного камня, модифицированного молочной кислотой с глиоксалем (слева), полимолочной кислотой с глиоксалем (справа) с увеличением в 600 раз

Figure 4 – Micrograph of a hardened cement paste modified with LA with glyoxal (left), PLA with glyoxal (right) with at 600X magnification

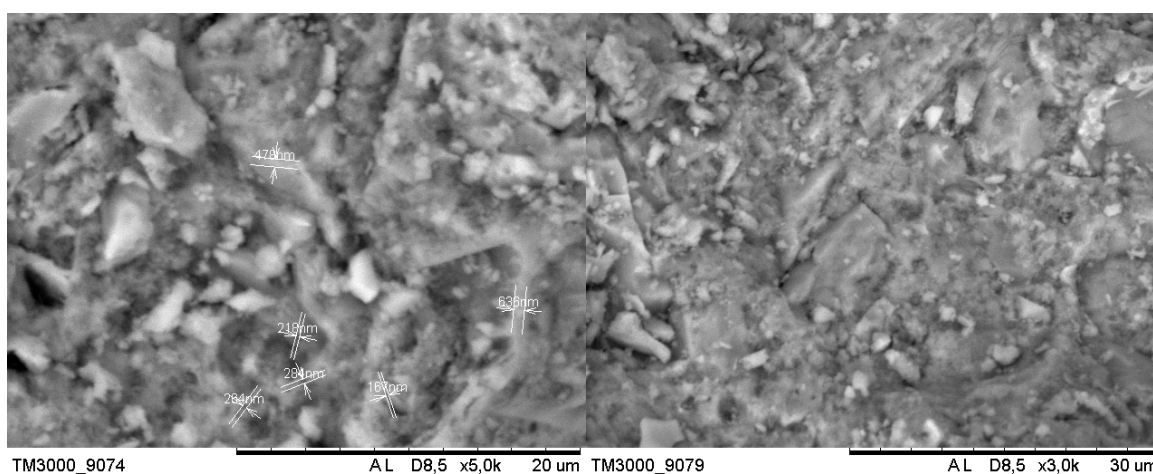


Рисунок 5 – Микрофотография цементного камня, модифицированного молочной кислотой с глиоксалем (слева), полимолочной кислотой с глиоксалем (справа) с увеличением в 6000 раз

Figure 5 – Micrograph of a hardened cement paste modified with LA with glyoxal (left), PLA with glyoxal (right) with at 6000X magnification

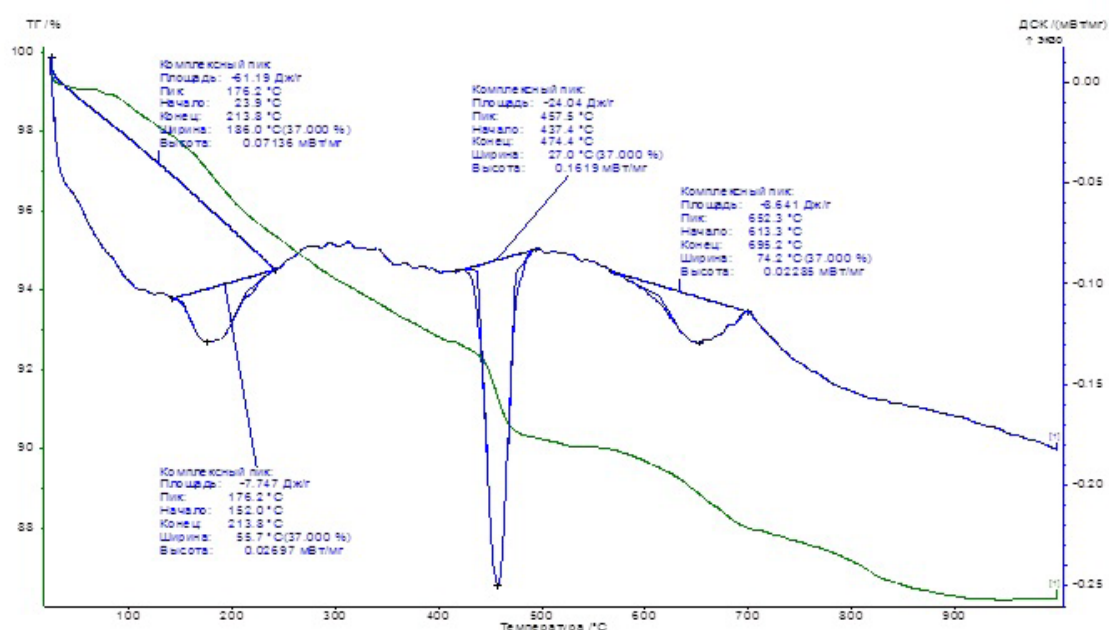


Рисунок 6 – Термограмма цементного камня, модифицированного КМД молочная кислота с глиоксалем

Figure 6 – Thermogram of a hardened cement paste modified by CMA LA with glyoxal

стью 200–400 нм, предположительно низкоосновного гидросиликата типа C-S-H-1. Местами структура аморфна, напоминает гель-структуру, местами кристаллична, в виде плотно уложенных пластин.

По результатам проведенных исследований ДТА, представленных на рисунках 6, 7, 8, установлен фазовый состав цементного камня с КМД и размеры кристаллов.

На рисунке 6 пик при температуре 170 °C свидетельствует о дегидратации гидросульфатоалюминатов, второй пик около 200 °C указывает на дегидратацию гидросиликатов. Эндотермический эффект в виде остроконечной впадины при 457 °C характеризует разложение портландита.

Глубина эффекта при 652 °C позволяет судить о количестве портландита, ширина – о размерах кристаллитов (мелкие кристаллы дегидратируются быстрее в узком диапазоне температур и с большим эндотермическим эффектом, а крупные – медленнее в более широком и с меньшим эндотермическим эффектом). О количестве минерала можно судить также по уменьшению массы при удалении испаряющейся воды в результате дегидратации (зеленая линия), которая на каждом пике круче опускается вниз. Изменение массы на каждом

пике приведено на рисунке 7. Потеря массы составила 4,1%, а тепловой эффект – 69 Дж/г.

На рисунке 7 представлена термограмма цементного камня, модифицированного комплексной добавкой PLA с глиоксалем. Наблюдаются те же самые пики, за исключением пика при 820 °C, который соответствует дегидратации низкоосновных гидросиликатов пластинчатой структуры из группы C-S-H-1, которые на промежутке 800–900 °C, вероятно, переходят в воластонит.

При модифицировании цементного камня PLA с глиоксалем (рисунок 8) количество гидросиликатов больше почти в два раза. Об этом свидетельствует увеличение площади пика при 170 °C. Площадь пика почти в два раза больше – 137,6 Дж/г, в сравнении с цементным камнем с КМД LA и глиоксаль (69 Дж/г).

Установлено, что усредненный размер кристаллитов у образца цементного камня с PLA с глиоксалем примерно такой же, как у цементного камня с КМД, включающей LA и глиоксаль, что согласуется с данными микроскопии. Потеря массы дегидратированной воды составила около 5%, а у образцов с КМД LA с глиоксалем – 7%.

Представленные результаты ДТА дополняют информацию по физико-химическим ис-

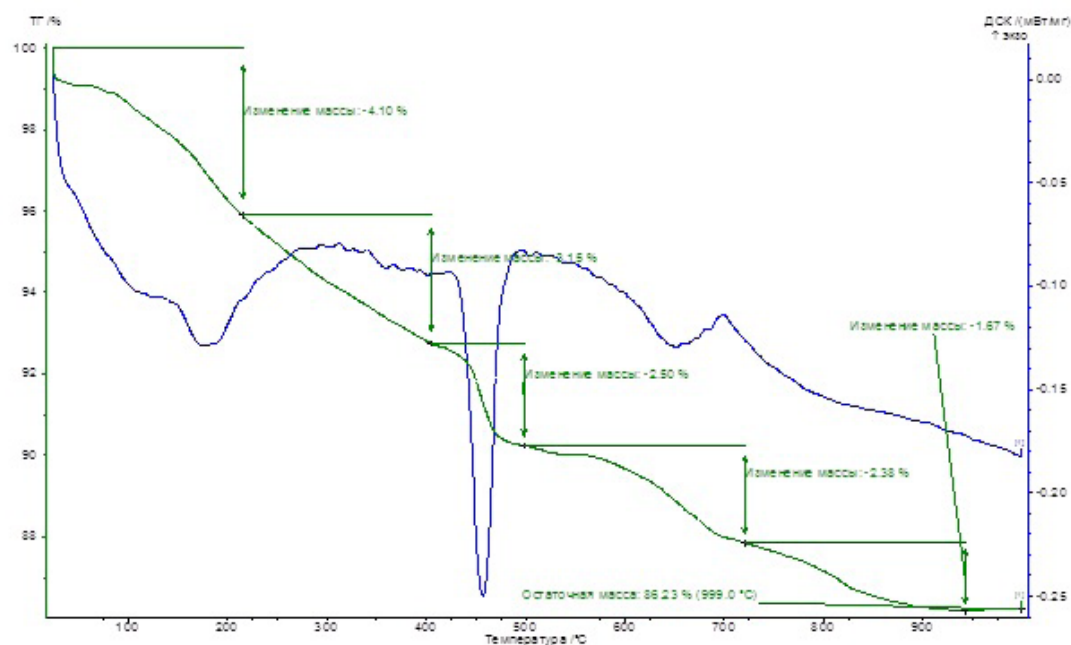


Рисунок 7 – Изменение массы цементного камня, модифицированного КМД LA с глиоксалем, в результате дегидратации воды

Figure 7 – Change in the mass of a sample modified by CMA LA with glyoxal as a result of water dehydration

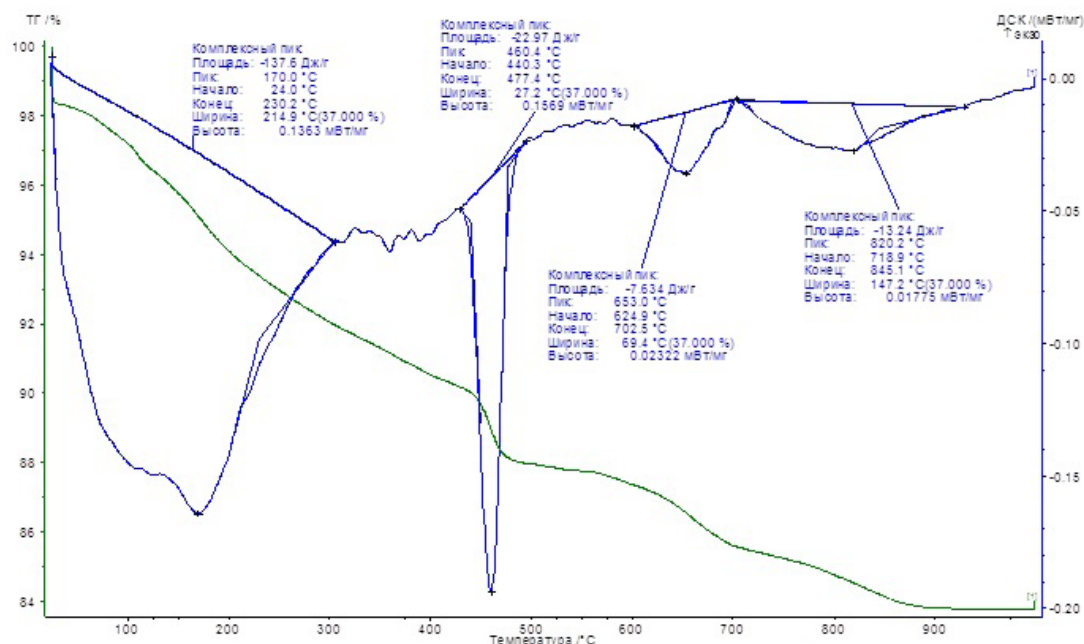


Рисунок 8 – Термограмма цементного камня, модифицированного КМД полимолочная кислота с глиоксалем

Figure 8 – Thermogram of hardened cement paste modified by CMA PLA with glyoxal

следованиям и раскрывают механизм влияния молочной кислоты и ее олигомера на структурообразование цементного камня.

Разработанные комплексные модифицирующие добавки на основе водных растворов глиоксаля и органических кислот рекомендуются использовать в строительстве избирательно в зависимости от требуемой скорости начального структурообразования в условиях естественного твердения и требуемой эксплуатационной прочности [21, 22]:

- КМД PLA+GL 0,01 – при требуемой высокой прочности бетона в ранние сроки (технологии с мгновенной или ускоренной распалубкой отформованных изделий);
- КМД LA+GL 0,01 – при требуемой высокой прочности в стандартные сроки твердения (28 сут).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Научно обоснована возможность управления процессом структурообразования цементных строительных композиций путем введения на стадии приготовления бетонной смеси комплексных модифицирующих добавок на основе водного раствора глиоксаля, молочной и полимолочной кислот, направленно воздействующих на гидратацию минералов цемента и кристаллизацию гидратных новообразований.

2. По результатам физико-химических исследований установлено, что при введении в цементное тесто разработанных комплексных модифицирующих добавок (КМД) на основе водного раствора глиоксаля PLA+GL 0,01 и LA+GL 0,01 снижается нормальная плотность цементного теста, формируется плотная и однородная структура. В структуре цементного камня увеличивается содержание низкоосновных гидросиликатов кальция, повышается однородность зерен кристаллитов по размерам и увеличиваются прочностные характеристики.

3. Комплексная модифицирующая добавка LA+GL0,01 является ускорителем схватывания и твердения, конец схватывания наступает после 20 мин, прирост прочности в возрасте 28 сут составляет 30%, а предел прочности при сжатии в возрасте 3 сут превышает значение предела прочности контрольного состава в возрасте 28 сут.

4. Цементное тесто с КМД PLA+GL0,01 отличается замедленным процессом схватывания, снижением количества воды затворения относительно контрольного состава – на 10%, а также высокой ранней прочностью цемент-

ного камня (53 МПа) и приростом прочности на 63% в 28-суточном возрасте.

5. Разработанные КМД на основе водного раствора глиоксаля PLA+GL0,01 и LA+GL0,01 рекомендованы для использования в строительных процессах избирательно в зависимости от требуемой скорости структурообразования и нормируемой эксплуатационной прочности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cong X.H., Xue B., Sun J., Sun X.W. Experiment and Research on the Influence of Mineral Admixture on Cement- Based Material Performance // *Applied Mechanics and Materials*. 2012. № 174-177. Pp. 1446-1449.
2. Sokolova Y., Ayzenshtadt A.M., Strokova V.V., Malkov V.S. Surface tension determination in glyoxal-silica dispersed system // *Journal of Physics Conference Series*. 2018. V. 1038 (1). № 01214. DOI: 10.1088/1742-6596/1038/1/012141.
3. Kudyakov A.I., Steshenko A.B. Study of hardened cement paste with crystalline glyoxal // *Key Engineering Materials: Multifunctional Materials: Development and Application*. 2016. Vol. 683. Pp. 113-117. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.683.113.
4. Гайда Ю.В., Айзенштадт А.М., Мальков В.С., Фомченков М.А. Органоминеральная добавка для укрепления песчаных грунтов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 11. С. 17–21.
5. Gandon L., Lehmann R.L., Marcheguet H.G.L., Tarbouriech F.P.M. Production of new compositions from glyoxal and alkali metal silicates. US Patent № 3028340. 1957.
6. Sokolova Y., Ayzenshtadt A.M., Strokova V.V. Evaluation of dispersion interaction in glyoxal/silica organomineral system // *Journal of Physics Conference Series*. 2017. V. 929 (1). № 012110. DOI: 10.1088/1742-6596/929/1/012110.
7. Гайда Ю.В., Айзенштадт А.М., Строкова В.В., Нелюбова В.В. Оптимизация процесса полимеризации глиоксаля – компонента органоминеральной добавки для укрепления песчаных грунтов // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2016. № 5. С. 6–10.
8. Войтович Е.В., Чулкова И.Л., Фомина Е.В., Череватова А.В. Повышение эффективности цементных вяжущих с активным минеральным нанодисперсным компонентом // *Вестник СибАДИ*. 2015. № 5 (45). С.56–62.
9. Simakova A., Kudyakov A., Efremova V., Latypov A. The effects of complex glyoxal based modifiers on properties of cement paste and hardened cement paste // *AIP Conference Proceedings*. 2017. V. 1800. № 020006. DOI: 10.1063/1.4973022.
10. Gorlenko N.P., Sarkisov Yu.S., Volkova V.A. Kul'chenko K. Structurization Processes in the System Cement–Water with Chemical Addition of Glyoxal // *Russian Physics Journal*. 2014. № 57 (2). Pp. 278-284. DOI: 10.1007/s11182-014-0236-4.

11. Горленко Н.П., Рубанов А.В., Саркисов Ю.С. Противоморозная добавка на основе натриевой соли глиоксалиевой кислоты // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 5. С. 110–116.
12. Минаев К.М., Мартынова Д.О., Князев А.С., Захаров А.С. Исследование свойств буровых растворов, содержащих глиоксаль и модифицированные глиоксалем полисахариды // Вестник Томского государственного университета. 2014. № 380. С. 225–229.
13. Avzianova E., Brooks S.D. Raman spectroscopy of glyoxal oligomers in aqueous solutions // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2013. V. 101. Pp. 40–48.
14. Kudyakov A.I., Steshenko A.B. Investigation of the influence of the crystalline glyoxal on properties of air hardened cement based foam concrete // *Letters on Materials*. 2015. № 5 (1). Pp 3-6. DOI: 10.22226/2410-3535-2015-1-3-6.
15. Kudyakov A.I., Steshenko A.B., Simakova A.S., Latypov A.D. Methods of introduction of glyoxal-containing additives into foam concrete mixture IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 597. № 012037. DOI:10.1088/1757-899X/597/1/012037.
16. Кудяков А.И., Симакова А.С., Кондратенко В.А., Стешенко А.Б., Латыпов А.Д. Влияние органических добавок на свойства цементного теста и камня // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20, № 6. С. 138–147.
17. Kurten T., Elm J., Prisle N., Mikkelsen K. Computation study of the effect of glyoxal -sulfate clustering on the Henry's law coefficient of glyoxal // *The Journal of Physical Chemistry A*. 2015. V. 119. № 19. Pp. 4509–4514. dx.doi.org/10.1021/jp510304c.
18. Hazra M., Francisco J., Sinha A. Hydrolysis of gluoxal in in water-restricted environments: formation of organic aerosol precursors through formic acid catalysis // *The Journal of Physical Chemistry A*. 2014. № 118. Pp. 4095–4105.
19. Чернышов Е.М. Развитие теории системно-структурного материаловедения и высоких технологий строительных композитов нового поколения // Строительные материалы. 2011. № 7. С. 54–60.
20. Чулкова И.Л., Галдина В.Д. Влияние состава жидкой фазы на процесс твердения цементов // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 12. С. 48–54.
21. Кудяков А.И., Стешенко А.Б., Конушева В.В., Сыркин О.О. Технологические приемы уменьшения усадки неавтоклавного пенобетона и повышения класса по прочности // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 5(58). С. 129–139.
22. Стешенко А.Б., Кудяков А.И. Исследование влияния кристаллического глиоксала на свойства цементного пенобетона естественного твердения // Письма о материалах. 2015. Т. 5, № 1 (17). С. 3-6. DOI: 10.22226/2410-3535-2015-1-3-6.

REFERENCES

1. Cong X.H., Xue B., Sun J., Sun X.W. Experiment and Research on the Influence of Mineral Admixture on Cement- Based Material Performance // *Applied Mechanics and Materials*. 2012. 174-177: 1446-1449.
2. Sokolova Y., Ayzenshtadt A.M., Strokova V.V., Malkov V.S. Surface tension determination in glyoxal-silica dispersed system // *Journal of Physics Conference Series*. 2018. 1038 (1). 01214. DOI: 10.1088/1742-6596/1038/1/012141.
3. Kudyakov A.I., Steshenko A.B. Study of hardened cement paste with crystalline glyoxal // *Key Engineering Materials: Multifunctional Materials: Development and Application*. 2016. 683: 113-117. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.683.113.
4. Gaida Yu.V., Aizenshtadt A.M., Mal'kov V.S., Fomchenkov M.A. Organomineral'naya dobavka dlya ukrepleniya peschanykh gruntov [Organomineral additive for strengthening sandy soils // *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitelstvo* (Industrial and civil engineering). 2015. 11: 17-21. (in Russian)
5. Gandon L., Lehmann R. L., Marcheguet H.G.L., Tarbouriech F.P.M. Production of new compositions from glyoxal and alkali metal silicates. US Patent No. 3028340. 1957.
6. Sokolova Y., Ayzenshtadt A.M., Strokova V.V. Evaluation of dispersion interaction in glyoxal/silica organomineral system // *Journal of Physics Conference Series*. 2017. 929 (1). 012110. DOI: 10.1088/1742-6596/929/1/012110.
7. Gaida Yu.V., Aizenshtadt A.M., Strokova V.V., Nelyubova V.V. Optimizatsiya protsessa polimerizatsii glioksalya - komponenta organomineral'noi dobavki dlya ukrepleniya peschanykh gruntov [Optimization of the polymerization process of glyoxal – a component of an organic mineral additive for strengthening sandy soils] // *The Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016. 5: 6-10. (in Russian)
8. Voytovich E.V., Chulkova I.L., Fomina E.V., Cherevatova A.V. Povyshenie effektivnosti cementnykh vyazhushchih s aktivnym mineral'nykh nanodispersnym komponentom [Increase of efficiency cement knitting with the active mineral nanodisperse component] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2015. 5 (45): 56-62. (in Russian)
9. Simakova A., Kudyakov A., Efremova V., Latypov A. The effects of complex glyoxal based modifiers on properties of cement paste and hardened cement paste // *AIP Conference Proceedings*. 2017. 1800. 020006. DOI: 10.1063/1.4973022.
10. Gorlenko N.P., Sarkisov Yu.S., Volkova V.A., Kul'chenko K. Structurization Processes in the System Cement–Water with Chemical Addition of Glyoxal // *Russian Physics Journal*. 2014. 57 (2): 278-284. DOI: 10.1007/s11182-014-0236-4.
11. Gorlenko N.P., Rubanov A.V., Sarkisov, Yu.S. Protivomoroznaya dobavka na osnove natrievoy soli glioksaliyevoj kisloty [Antifreeze agent based on sodium salt of glyoxalic acid] *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. 5: 110–116. (in Russian)

12. Minaev K.M., Martynova D.O., Knyazev A.S., Zaharov A.S. Issledovanie svoystv burovyyh rastvorov, soderzhashchih glioksal' i modifitsirovannye glioksalem polisaharidy [Investigation of the properties of drilling fluids containing glyoxal and glyoxal-modified polysaccharides] // *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. 380: 225-229. (in Russian)
13. Avzianova E., Brooks S.D. Raman spectroscopy of glyoxal oligomers in aqueous solutions // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2013. 101: 40–48.
14. Kudyakov A.I., Steshenko A.B. Investigation of the influence of the crystalline glyoxal on properties of air hardened cement based foam concrete // *Letters on Materials*. 2015.5(1): 3-6. DOI: 10.22226/2410-3535-2015-1-3-6.
15. Kudyakov A.I., Steshenko A.B., Simakova A.S., Latypov A.D. Methods of introduction of glyoxal-containing additives into foam concrete mixture IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering*. 2019. 597. No. 012037 DOI:10.1088/1757-899X/597/1/012037.
16. Kudyakov A.I., Simakova A.S., Kondratenko V.A., Steshenko A.B., Latypov A.D. Vliyanie organicheskikh dobavok na svoystva tsementnogo testa i kamnya [Cement paste and brick properties modified by organic additives] *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2018. 20 (6): 138–147. (in Russian)
17. Kurten T., Elm J., Prisle N., Mikkelsen K. Computation study of the effect of glyoxal -sulfate clustering on the Henry's law coefficient of glyoxal // *The Journal of Physical Chemistry A*. 2015. 119. 19: 4509–4514. dx.doi.org/10.1021/jp510304c.
18. Hazra M., Francisco J., Sinha A. Hydrolysis of gluoxal in in water-restricted environments: formation of organic aerosol precursors through formic acid catalysis // *The Journal of Physical Chemistry A*. 2014. 118: 4095-4105.
19. Chernyshov E.M. Чернышов Е.М. Razvitiye teorii sistemno-strukturnogo materialovedeniya i vysokikh tekhnologii stroitel'nykh kompozitov novogo pokoleniya [Development of the theory of systemic-structural materials science and high technologies of new generation building composites] // *Stroitel'nye Materialy (Constraction Materials Russia)*. 2011. 7: 54-60. (in Russian)
20. Chulkova I.L., Galdina V.D. Vliyanie sostava zhidkoj fazy na process tverdeniya cementov [Influence of composition of a liquid phase at hardening of cements] // *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo (Industrial and civil engineering)*. 2019. 12: 48-54.
21. Kudyakov A.I., Steshenko A.B., Konusheva V.V., Syrkin O.O. Tekhnologicheskie priemy umen'sheniya usadki neavtoklavnogo penobetona i povysheniya klassa po prochnosti [Production methods of reducing non-autoclave foamed concrete shrinkage and increasing its quality class]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. 5 (58): 129-139.
22. Steshenko A.B., Kudyakov A.I. Issledovanie vliyaniya kristallicheskogo glioksalya na svoystva cementnogo penobetona estestvennogo tverdeniya [Investigation of the influence of the crystalline glyoxal on properties of air hardened cement based foam concrete] // *Letters on Materials*. 2015. 5. 1 (17): 3-6. DOI: 10.22226/2410-3535-2015-1-3-6.

mentnogo penobetona estestvennogo tverdeniya [Investigation of the influence of the crystalline glyoxal on properties of air hardened cement based foam concrete] // *Letters on Materials*. 2015. 5. 1 (17): 3-6. DOI: 10.22226/2410-3535-2015-1-3-6.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Кудяков А.И. Формулировка направления и темы исследования, подбор теоретической базы для проведения эксперимента. Контроль и консультирование по вопросам эксперимента и написанию статьи.

Симакова А.С. Составление плана проведения эксперимента, подготовка и применение комплексных модифицирующих добавок для проведения эксперимента. Проведение эксперимента. Организация и расшифровка данных физико-химических методов исследования цементных композиций.

Стешенко А.Б. Проведение эксперимента, написание, редактирование и оформление статьи.

COAUTHORTS CONTRIBUTION

Aleksander I. Kudyakov – Formulation of the direction and topic of the research, selection of a theoretical basis for the experiment. Supervising and advising on the conduct of the experiment and the writing of the article.

Anna S. Simakova – Drawing up a plan for the experiment, the preparation and the use of complex modifying additives for the experiment. Carrying out the experiment. Organization and decoding of data on physicochemical methods for studying cement compositions.

Aleksey B. Steshenko – Carrying out the experiment, writing, editing and layout of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кудяков Александр Иванович – д-р. техн. наук, проф., проф. кафедры строительных материалов и технологий.

Симакова Анна Сергеевна – начальник управления научной деятельности Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Стешенко Алексей Борисович – канд. техн. наук, доц. кафедры строительных материалов и технологий.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksander I. Kudyakov – Dr. of Sci., Professor, Professor of the Building Materials Department, Tomsk State University of Architecture and Building.

Anna S. Simakova – Head of the Scientific Activity Department, Tomsk State University of Architecture and Building.

Aleksey B. Steshenko – Cand. of Sci., Associate Professor of the Building Materials Department, Tomsk State University of Architecture and Building.

Научная статья

УДК 625.7/8

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-772-789>

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЩЕБНЯ НА МОДУЛЬ ДЕФОРМАЦИИ ГРУНТОЩЕБЕНОЧНОГО СЛОЯ

А.С. Пролыгин, А.С. Александров, Г.В. Долгих, В.В. Чусов*Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия**aleksandrprolygin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1395-0553>,**aleksandrov00@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>,**dolgikh-gv@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7582-3939>,**chysow@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5765-2726>*

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью статьи является исследование зависимости модуля деформации грунтощебеночного слоя дорожной одежды от содержания щебня в грунтово-щебеночной смеси и влажности грунта в ней. Поставленная цель достигнута выполнением штамповых испытаний моделей дорожных одежд и земляного полотна.

Материалы и методы. Исследования проведены выполнением штамповых испытаний моделей земляного полотна и однослойных дорожных одежд с грунтощебеночным покрытием. Перед штамповыми испытаниями проведены лабораторные работы по определению параметров, подлежащих входному контролю для щебня и грунта. Из щебеночных материалов и грунта в лотке построены модели дорожных одежд. Испытания земляного полотна и дорожных одежд выполнены при помощи жесткого круглого штампа, входящего в комплект стандартной установки.

Результаты. Модули деформации грунта земляного полотна и дорожных одежд с грунтощебеночным слоем вычислены из полиномиальной зависимости осадки от давления, регламентированной ПНСТ 311–2018. По результатам испытаний определен модуль деформации грунта земляного полотна и общий модуль деформации на поверхности грунтощебеночного слоя, при различном содержании щебня по объему смеси. Наименьшее значение модуля деформации соответствует минимальному содержанию щебня в смеси, которое составляет 40% по объему смеси. Наибольшее значение модуля деформации получено при максимальном содержании щебня в смеси, которое составляет 60% по объему смеси. Используя общие модули деформации разных дорожных одежд и модули деформации грунта земляного полотна, выполнен расчет модуля деформации грунтощебеночного слоя при разном содержании в нем щебня. Для учета влияния влажности связного грунта, используемого в смеси, приведены поправочные коэффициенты, значения которых установлены лабораторными испытаниями. Эти коэффициенты позволяют рассчитывать модуль деформации грунтощебеночного слоя в зависимости от содержания щебня и влажности грунта, применяемого в нем.

Обсуждение и заключение. В результате экспериментальных работ определены модули деформации грунтощебеночных разных составов, при помощи которых произведено проектирование дорожных одежд с последующим строительством опытных участков в каждой из трех ДКЗ Омской области.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорожная одежда, грунтощебеночный слой, модуль деформации, влажность

Статья поступила в редакцию 30.08.2021; одобрена после рецензирования 20.10.2021; принята к публикации 14.12.2021.

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: Пролыгин А.С., Александров А.С., Долгих Г.В., Чусов В.В. Влияние содержания щебня на модуль деформации грунтощебеночного слоя // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 6(82). С. 772-789. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-772-789>

© Пролыгин А.С., Александров А.С., Долгих Г.В., Чусов В.В., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-772-789>

INFLUENCE OF CRUSHED STONE CONTENT ON THE DEFORMATION MODULUS OF THE SOIL-CRUSHED STONE LAYER

Aleksandr S. Prolygin, Anatoliy S. Aleksandrov, Gennady V. Dolgikh, Vasiliy V. Chusov

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

aleksandrprolygin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1395-0553>,

aleksandrov00@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2009-5361>,

dolgikh-gv@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7582-3939>,

chysow@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5765-2726>

ABSTRACT

Introduction. The purpose of the article is to study the dependence of the deformation modulus of the soil-crushed stone layer of the road surface from the content of crushed stone in the soil-crushed stone mixture and the soil moisture in it. The goal was achieved by performing stamp tests of the models of a road clothing and a roadbed.

Materials and methods. The research was carried out by performing stamp tests of models of the roadbed and single-layer road clothes with a soil-crushed stone surface. Before the stamp tests, laboratory work was carried out to determine the parameters subject to input control for crushed stone and soil. Models of road clothes are built from crushed stone materials and soil in the tray. Tests of the roadbed and road clothes are carried out using a rigid round stamp included in the standard kit.

Results. The modules of deformation of the soil of the roadbed and road surfaces with a soil-crushed stone layer are calculated from the polynomial dependence of settlement on pressure, regulated by ПНСТ 311-2018. According to the test results, the modulus of deformation of the soil of the roadbed, and the general modulus of deformation on the surface of the soil-crushed stone layer, with different content of crushed stone by the volume of the mixture, were determined. The lowest value of the deformation modulus corresponds to the minimum content of crushed stone in the mixture, which is 40 % by volume of the mixture. The highest value of the deformation modulus was obtained at the maximum content of crushed stone in the mixture, which is 60 % by volume of the mixture. Using the general modules of deformation of different road surfaces and the modules of deformation of the soil of the roadbed, the calculation of the deformation modulus of the soil-crushed stone layer with different content of crushed stone in it is performed. To take into account the influence of moisture of the cohesive soil used in the mixture, correction coefficients are given, the values of which are established by laboratory tests. These coefficients allow us to calculate the modulus of deformation of the soil-crushed stone layer depending on the content of crushed stone and the moisture of the soil used in it.

Discussion and conclusions. As a result of experimental work, the modules of deformation of soil-crushed stone of different compositions were determined, with the help of which the design of road surfaces was carried out with the subsequent construction of experimental sites in each of the three road building climatic zones of the Omsk region.

KEYWORDS: road surface, soil-crushed stone layer, modulus of deformation, moisture content

The article was submitted 30.08.2021; approved after reviewing 20.10.2021; accepted for publication 14.12.2021.

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: Prolygin A.S., Aleksandrov A.S., Dolgikh G.V., Chusov V.V. Influence of the crushed stone content on the deformation modulus of the soil-crushed stone layer. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2021; 18 (6): 772-789. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-772-789>

© Prolygin A.S., Aleksandrov A.S., Dolgikh G.V., Chusov V.V., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Согласно требованиям ГОСТ 33382–2015¹, автомобильные дороги общего пользования России подразделяются на три класса (автомобильные магистрали, дороги для скоростного движения, обычные дороги) и пять технических категорий (I–V). Класс характеризует условия доступа на автомобильную дорогу, а категория определяет технические параметры. В соответствии с требованиями СП 34.13330–2021² критерием разделения дорог на категории является ее класс и расчетная среднесуточная приведенная интенсивность движения. В последнее время в РФ в отдельную группу выделены дороги с низкой интенсивностью движения. Для таких дорог разработаны специальные стандарты ГОСТ Р 58818–2020³, ПНСТ 371–2019⁴, устанавливающие правила их проектирования. Интенсивность движения на таких дорогах ограничивается величиной до 400 автомобилей в сутки. Поэтому дороги с низкой интенсивностью движения включают в себя дороги общего пользования V категории и часть дорог IV категории. Вследствие низкой интенсивности движения такие дороги, как правило, проходят в малозаселенной сельской местности. Суммарная протяженность дорог с низкой интенсивностью движения велика, но они не требуют постройки дорожных одежд с асфальтобетонными покрытиями. Поэтому для таких дорог, как правило, предусматривают устройство дорожных одежд переходного и низшего типов, состоящих из двух-трех, а часто и одного конструктивного слоя. Постройка таких дорожных одежд актуальна для всех муниципальных районов Омской области. По данным Федеральной службы государственной статистики, протяженность сети дорог Омской области составляет 24024,2 км. Из них 730 км приходится на дороги федерального значения, 10207 км составляет суммарная протяженность дорог регионального или межмуниципального значения и протяженность 13087,2 км формируется сетью дорог местного значения. Дороги федерального

значения на всем своем протяжении имеют дорожные одежды с усовершенствованным покрытием. Протяженность дорог регионального или межмуниципального значения, имеющих твердое покрытие, составляет 7365,5 км, из которых 6106,1 км имеет дорожные одежды с усовершенствованным покрытием. Следовательно, протяженность дорог регионального или межмуниципального значения с грунтовой поверхностью составляет 2841,5 км. На автомобильных дорогах местного значения ситуация еще хуже. Местные дороги с грунтовой проезжей частью имеют протяженность 7180,8 км. Таким образом, согласно государственным статистическим данным, суммарная протяженность грунтовых дорог Омской области составляет 10022,3 км. Для демонстрации масштаба этой беды Омской области сравним суммарную протяженность грунтовых дорог с длиной экватора Земли, составляющей около 40075,7 км. В результате получим, что протяженность грунтовых дорог Омской области составляет $\frac{1}{4}$ длины экватора Земли. Отсюда становится очевидной необходимость постройки дорог низшего и переходного типов в сельской местности Омской области. Безусловно, что объемы строительства огромны, они требуют больших материальных затрат. Поэтому дорожные одежды низшего типа можно рассматривать как основные, используемые в качестве постоянных конструкций на дорогах категории VB, а также конструкций, применяемых на первом этапе строительства дорожных одежд переходного типа, для дорог более высоких категорий.

Дорожные одежды переходного типа проектируют по методике, регламентируемой нормативными документами, выполняя расчеты на прочность, морозоустойчивость и осушение дополнительных дренирующих слоев основания. Причем методики расчета таких дорожных одежд, проектируемых на дорогах общего пользования и дорогах с низкой интенсивностью, по критериям прочности и эксплуатационной надежности принципиально отличаются. Такое различие в методах расчета

¹ ГОСТ 33382–2015. Дороги автомобильные общего пользования. Техническая классификация. Введен в действие 08.09.2016. Введен впервые. М.: Стандартинформ, 2019.

² СП 34.13330–2021. Автомобильные дороги. Введен в действие 10.08.2021. Пересмотр 34.13330.2012* «СНиП 2.05.02-85* Автомобильные дороги». М.: АО «Кодекс», 2021.

³ ГОСТ Р 58818–2020. Дороги автомобильные с низкой интенсивностью движения. Проектирование, конструирование и расчет. Введен в действие 15.04.2020. Введен впервые. М.: Стандартинформ, 2020.

⁴ ПНСТ 371–2019. Дороги автомобильные общего пользования с низкой интенсивностью движения. Дорожная одежда. Конструирование и расчет. Введен в действие 19.11.2019. Введен впервые. М.: Стандартинформ, 2019.

дорожных одежд для дорог с низкой и высокой интенсивностью движения характерно для стандартов США. Теперь различный подход к расчету дорожных одежд в зависимости от интенсивности движения появился в нашей стране.

Конструкции дорожных одежд низшего типа назначают по региональным нормативным документам, содержащим типовые конструкции, разработанные на основе практического опыта. В дорожных одеждах низшего типа рекомендуется применять местные материалы и отходы промышленности. Поэтому в зависимости от наличия в регионе тех или иных материалов и отходов промышленности конструкции дорожных одежд в субъектах Российской Федерации могут существенно отличаться.

В нефтедобывающих районах России выполняются работы по применению нефтяного шлама в органоминеральных дорожных смесях [1, 2, 3]. В районах с развитой металлургической промышленностью в конструкции дорожных одежд внедряют шламы. В работах [4, 5, 6] приводятся данные об изменении характеристик белитового шлама, являющегося отходом алюминиевой промышленности, в дорожной конструкции в процессе приложения повторных нагрузок. В горных районах появляется возможность применения крупнообломочных грунтов для сооружения прочного и деформационно-устойчивого земляного полотна и использования порошков горных пород для укрепления готовых щебеночно-песчаных смесей. В этой части отметим работу наших коллег из Армении [7], в которой исследовано влияние количества известнякового порошка, добавляемого в щебеночно-песчаные смеси, на параметры прочности готового материала. Известняковые порошки являются промышленным отходом горной промышленности Араратской области. В конструкциях дорожных одежд низшего и переходного типов широко применяются грунты и гранулированные материалы, укрепленные или стабилизированные вяжущими материалами и различными добавками [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21]. Необходимость химической стабилизации грунтов и укрепления зернистых материалов обусловлена как их невысокой прочностью, так и способностью накапливать остаточные деформации при сравнительно небольшой величине девиатора напряжений [22, 23, 24, 25, 26, 27]. Малая устойчивость гранулированных материалов к накоплению остаточных деформаций приводит к образованию колеи на поверхности дорожного покры-

тия [28]. Альтернативой химической стабилизации грунтов и гранулированных материалов является применение особых конструктивных решений. К таким решениям можно отнести армирование слоя из гранулированного материала геосинтетической решеткой [29, 30, 31, 32, 33, 34, 35] или усиление слоя под местами будущего образования колеи специальными потайными элементами, устраиваемыми под покрытием или дорожной одеждой в продольном направлении [25].

Омская область, как и некоторые другие регионы РФ, практически не имеет местных строительных материалов, вследствие чего для строительства земляного полотна изучают возможность применения зол уноса и золошлаковых смесей [36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43]. Для строительства дорожных одежд переходного и низшего типа применяют дорогостоящие привозные материалы, такие как щебень и щебеночно-песчаные смеси. В целях экономии щебня выполняют исследования по применению грунтово-щебеночных смесей как в чистом виде, так и укрепленных цементом. Кроме того, изучается возможность применения в таких дорожных одеждах асфальтового гранулята, получаемого при фрезеровании существующих покрытий ремонтируемых дорог. Этот повторно используемый материал применяют как без добавки вяжущих материалов, так и с добавлением органических и минеральных вяжущих материалов.

В настоящей работе авторы приведут данные о модулях деформации грунтощебеночного слоя дорожной одежды, рассчитанного по результатам испытаний моделей дорожных одежд жестким штампом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вычисление модуля деформации грунтощебеночного слоя дорожной одежды требует проведения экспериментов по определению модулей деформации на поверхности земляного полотна и дорожной одежды, состоящей из одного грунтощебеночного слоя. Для этого необходимо выполнить штамповые испытания на поверхности грунтощебеночного слоя (при известной толщине этого слоя) дорожной одежды и на земляном полотне. Полученные из эксперимента значения модулей деформации грунта земляного полотна и дорожной одежды из грунтощебеночного слоя используют для расчета модуля деформации грунтово-щебеночной смеси в слое. Вычисления производятся по стандартной нормативной методике. Проведение экспериментов требует

строительства опытных участков или моделей дорожных конструкций. При строительстве моделей дорожных одежд необходимо контролировать все параметры грунтов и щебня, применяемых для устройства земляного полотна и грунтощебеночного слоя.

Для строительства моделей дорожных одежд использован грунт, классифицирован-

ный по ГОСТ 25100–2020⁵, как суглинок тяжелый пылеватый. Показатели механических свойств грунта определены испытаниями в лаборатории по стандартизированным методам. На рисунке 1 приведены результаты лабораторного определения максимальной плотности и оптимальной влажности, выполненного с соблюдением требований ГОСТ 22733–2016⁶.

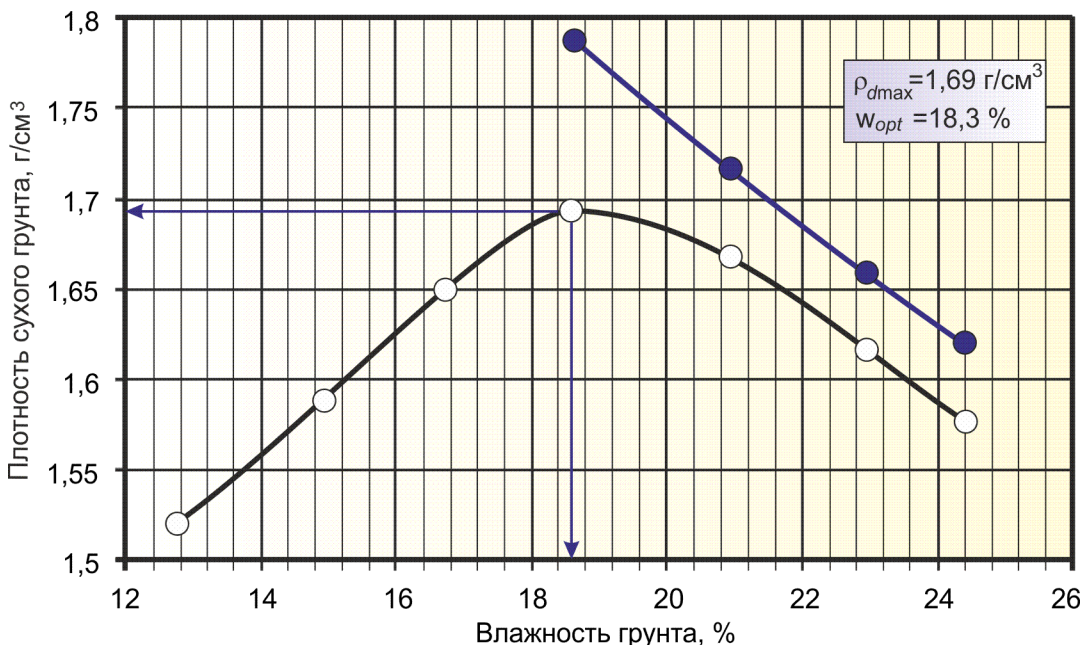


Рисунок 1 – Кривая стандартного уплотнения и линия нулевого содержания воздуха в грунте

Figure 1 – Standard compaction curve and the line of zero air content in the soil

Гранулометрический состав грунта определен согласно указаниям ГОСТ 12536–2014⁷, а результаты лабораторных работ приведены в таблице 1.

Таблица 1
Гранулометрический состав грунта

Table 1
Grain size distribution

Размер частиц, мм	2	1	0,5	0,25	0,1	0,05	0,01	<0,01
Содержание частиц, %	0	0	1	5	20	87	87	100

Определение физических характеристик проведено с соблюдением требований ГОСТ 5180–2015⁸, а результаты обработки данных лабораторных испытаний даны в таблице 2.

⁵ ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. Введен в действие 01.01.2021. Взамен ГОСТ 25100–2011. М.: Стандартинформ, 2020.

⁶ ГОСТ 22733–2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. Введен в действие 01.01.2017. Взамен ГОСТ 22733–2002. М.: Стандартинформ, 2019.

⁷ ГОСТ 12536–2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2019.

⁸ ГОСТ 5180–2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. Введен в действие 01.04.2016. Взамен ГОСТ 5180–84. М.: Стандартинформ, 2019.

Таблица 2
Показатели физических свойств грунта

Table 2
Indicators of physical properties of the soil

Наименование показателя	Величина
Естественная влажность, %	19,9
Влажность на границе текучести, %	36,6
Влажность на границе раскатывания, %	19,5
Число пластичности, %	16,8
Показатель текучести, д.е.	0,03
Плотность частиц грунта, г/см ³	2,68

Таблица 3
Зерновые составы щебня

Table 3
Grain size distribution of crushed stone

Параметр	Значения параметров						
Результаты испытания щебня фракции 20–40 мм							
Размер сита, мм	50	40	30	20	2,5	1,25	дно
Частный остаток, %	0	4,69	31,05	54,63	9,53	0,00	0,10
Полный остаток, %	0	4,7	35,74	90,37	99,89	99,90	100
Требования ГОСТ 8267–93	< 0,5	< 10	30–60	90–100	95–100	95–100	–
Результаты испытания щебня фракции 40–70 мм							
Размер сита, мм	70	60	50	40	2,5	1,25	дно
Частный остаток, %	1,61	9,14	24,85	36,32	27,30	0,20	0,58
Полный остаток, %	1,61	10,7	35,60	71,92	99,22	99,42	100
Требования ГОСТ 8267–93	< 0,5	< 10	30-60	90-100	95-100	95-100	–

Для строительства моделей однослойных дорожных одежд из грунтово-щебеночных смесей применяли щебень двух фракций 20–40 мм и 40–70 мм. Щебень обеих фракций испытан согласно требованиям ГОСТ 8269.0–97⁹ для определения соответствия контролируемых параметров регламентациям ГОСТ 8267–93¹⁰. В таблице 3 приведены результаты определения зерновых составов щебня обеих фракций и требования к ним.

В таблице 4 приведены результаты определения контролируемых параметров щебня и их требуемые значения. Соответствие зна-

чений этих параметров требованиям стандарта необходимо для качественного устройства моделей дорожных одежд в грунтовом лотке, расположенном в лабораторном помещении.

Из анализа данных таблиц 3 и 4 следует, что щебень обеих фракций пригоден для строительства моделей дорожных одежд.

По используемой фракции щебня модели дорожной одежды разделяли на две группы. В моделях первой группы применяли щебень фракции 20–40 мм, а в моделях второй группы использован щебень фракции 40–70 мм. В моделях каждой группы строили три секции

⁹ ГОСТ 8269.0–97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний. Введен в действие 06.01.1998. Взамен ГОСТ 3344–83, ГОСТ 7392–85 в части методов физико-механических испытаний, ГОСТ 8269–87. М.: Стандартинформ, 2018.

¹⁰ ГОСТ 8267–93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. Введен в действие 17.06.1994. Взамен ГОСТ 8267–82, ГОСТ 8268–82, ГОСТ 10260–82, ГОСТ 23254–78, ГОСТ 26873–86. М.: Стандартинформ, 2018.

Таблица 4
Значения контролируемых параметров щебня

Table 4
Values of controlled parameters of crushed stone

Наименование показателя	Значение показателя для щебня фракций		Требования стандарта
	20–40 мм	40–70 мм	
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	0,34	0,50	До 1
Дробимость, %	9,19	8,34	До 11 для марки 1200
Содержание зерен пластинчатой и лещадной формы, %	2	29	Группа 1 до 10%
			Группа 3 – 15–25%
			Группа 4 – 25–35%
Истинная плотность, г/см ³	2,81	2,75	–
Насыпная плотность, кг/м ³	1536,6	1406,85	–

грунтощебеночного слоя. Содержание щебня в грунтово-щебеночной смеси, применяемой для строительства секций, было разное. В первой секции содержание щебня составляет 40% по объему смеси, во второй секции – 50% и в третьей секции – 60%.

При строительстве модели земляного полотна применяли послойную отсыпку. При отсыпке каждого слоя грунт, высушенный до оптимальной влажности $w_{\text{opt}}=18,3\%$, распределяли ровным слоем толщиной 11–12 см. Уплотнение грунта выполнялось ручной трамбовкой и вибрационной плитой. В итоге получался слой грунта толщиной около 10 см, уплотненный до требуемой величины коэффициента уплотнения. Высота модели земляного полотна наращивалась постепенно, выполняя перечисленные операции при устройстве каждого слоя.

По завершению строительства земляного полотна были произведены штамповые испытания статической нагрузкой. Лоток снабжен металлической упорной балкой, представляющей собой конструкции из швеллеров. Нагрузка на испытываемую поверхность создается за счет упора домкрата в металлическую балку. Упорная металлическая балка снабжена колесами, которые перемещаются по рельс-формам, установленным на поверхности боковых стенок лотка. Возможность перемещения упорной балки по длине лотка позволяет производить испытание в любом выбранном поперечном сечении модели земляного полотна. В пределах этого сечения выбирали точку ис-

пытаний, в которой монтировалась штамповая установка.

Перед испытанием каждой точки производили подготовку поверхности земляного полотна, устраняя все неровности, а при необходимости выполняя подсыпку сухого песка. Далее устанавливали штамп, обеспечивая его полное прилегание к грунтовой поверхности. Для этого установленный на грунтовой поверхности штамп поворачивали влево и вправо (по часовой стрелке и против нее), притирая штамп к грунту или песчаной подсыпке. Штамповая установка снабжена гидравлическим домкратом, вертикальная ось которого строго совпадает с центром штампа. Для измерения нагрузки использован электронный динамометр, которым снабжен домкрат. Деформации определяли при помощи индикаторов, которые устанавливали в задней части длиннобазового прогибомера, используя специальное зажимное устройство. Применение длиннобазового прогибомера позволяет исключить попадание пяты прогибомера в чашку прогибов, образуемую распространением упругих деформаций грунта за пределы штампа. При установке прогибомера его наконечник вводили в тоннель штампа и располагали точно над центральной точкой круглого штампа, не допуская эксцентриситета нагрузки. Таким образом, расчетной точкой испытания являлся центр жесткого круглого штампа. Основные моменты строительства модели земляного полотна и ее испытания приведены на рисунке 2.



Рисунок 2 – Иллюстрации строительства и испытания модели земляного полотна: а – подготовленный лоток; б – разравнивание грунта; в – трамбовка слоя; г – уплотнение слоя вибрационной плитой; д – установка штампа; е – испытание; ж – отбор грунта после испытания для определения влажности

Figure 2 – Illustrations of construction and testing a model of subgrade: а–prepared tray; б–leveling the soil; в–layer compaction; г–compaction of the layer with a vibroplate; д–stamp installation; е–test; ж–sampling of soil after testing to determine moisture

Завершив испытание модели земляного полотна, приступали к строительству модели дорожной одежды из грунтощебеночного слоя, содержащего щебень фракции 20–40 мм. При этом производили разбивку лотка на три секции. В пределах каждой секции устраивали грунтощебеночный слой с определенным содержанием щебня. Для приготовления грунто-щебеночной смеси отмеряли необходимые объемы грунта, имеющего оптимальную влажность, и щебня. Грунт и щебень подавали в секцию лотка и смешивали вручную. Одно-

родность получаемой смеси контролировали визуально. При положительной оценке однородности смеси ее разравнивали и уплотняли вибрационной плитой. По завершению строительства модели ее испытывали, после чего демонтировали, подготавливая грунтовую поверхность для строительства другой модели с использованием щебня фракции 40–70 мм.

На рисунке 3 приведены основные технологические операции по строительству грунтощебеночного слоя.



Рисунок 3 – Иллюстрации строительства модели грунтощебеночного слоя: а – подача требуемого количества грунта в секцию; б – подача в секцию щебня в требуемом количестве; в – смешивание щебня и грунта; г – визуальная оценка однородности; д – уплотнение слоя вибрационной плитой; е – демонтаж слоя после испытания

Figure 3 – Illustrations of construction a model of a soil-crushed-stone layer: а–supply of the required amount of soil to the section; б–supply of crushed stone to the section in the required amount; в–mixing crushed stone and soil; г–visual assessment of homogeneity; д–compaction of the layer with a vibroplate; е–layer dismantling after testing

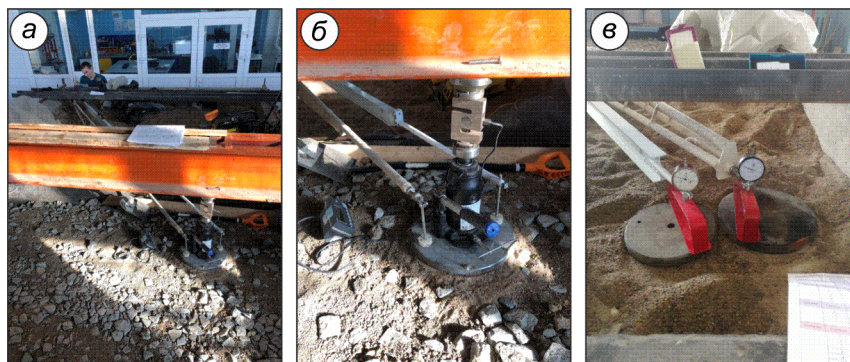


Рисунок 4 – Иллюстрации штамповых испытаний грунтощебеночного слоя: а – общий вид установки штамповых испытаний; б – расположение измерительных стержней прогибомера и гидравлического домкрата на штампе; в – расположение индикаторов, закрепленных в задней части прогибомеров и введенных в контакт с клиновой опорой

Figure 4 – Illustrations of stamping tests of a soil-crushed-stone layer: а–general view of the installation for stamp tests; б–location of measuring rods of the deflectometer and hydraulic jack on the stamp; в–location of indicators, fixed at the rear of the deflectometers and brought into contact with the wedge support

После устройства модели дорожной одежды выполняли штамповые испытания (рисунок 4).

Для испытаний грунтощебеночного слоя применяли жесткий круглый штамп, на который ставили гидравлический домкрат, обеспечивая совпадение его вертикальной оси с центром штампа. Нагрузку фиксировали по электронному динамометру. Для измерения деформаций применяли два прогибомера, измерительные стержни которых устанавливали

на одинаковых расстояниях от центра штампа. В зажимных устройствах, имеющихся в задней части прогибомера, крепили индикаторы. Измерительный стержень каждого индикатора вводили в соприкосновение с клиновой опорой, которой укомплектован каждый прогибомер. Клиновую опору ставили на жесткую металлическую подкладку.

Из анализа рисунков 2 и 4 следует, что методики штамповых испытаний земляного полотна и грунтощебеночной дорожной одежды отлича-

ются количеством применяемых прогибомеров и размещением их измерительных стержней на штампе. Отметим, что такие отличия непринципиальны, они обуславливают разный подход к вычислению осадок. При использовании одного прогибомера упругопластические осадки вычисляются по разности показаний индикатора до и после приложения нагрузки. Упругие деформации в стадии разгрузки земляного полотна определяются разностью показаний индикатора до и после снятия нагрузки. При применении двух прогибомеров, снабженных двумя индикаторами, упругопластические и упругие деформации измеряются по каждому индикатору, а их расчетные значения вычисляются как среднее из двух величин.

В остальном методика испытаний земляного полотна и грунтощебеночной дорожной одежды одинаковая. В обоих случаях нагрузка прикладывалась ступенями до тех пор, пока величина усилия не достигнет предельной величины. Предельная величина усилия определяется из условия возникновения максимального давления, которое ограничивается величиной 0,25 МПа при испытании земляного полотна и 0,5 при испытании дорожной одежды.

Деформации измеряли по достижению условной стабилизации осадки, наступление которой определяется выполнением двух условий. Согласно первому условию отсчеты с индикаторов снимают не ранее чем через 60 с при испытании конструктивных слоев дорожной одежды и не ранее чем через 120 с при испытании земляного полотна. Вторым условием наступления условной стабилизации осадки является снижение ее скорости до величины 0,02 мм/мин. Обратим внимание, что при использовании прогибомера деформация вычисляется произведением разности показаний по индикатору и коэффициента, величина которого определяется отношением длин плеч прогибомера. В составе нашей штамповой установки применены прогибомеры с соотношением длин плеч, равным 2. Поэтому критерием наступления условной стабилизации осадки является уменьшение скорости изменения показаний каждого индикатора до величины 0,01 мм/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты испытаний получали в виде зависимостей осадок земляного полотна или до-

рожной одежды из грунтощебеночного слоя от давления. Эти зависимости использовали для вычисления модуля деформации грунта и общего модуля деформации дорожной одежды.

Анализ стандартов Российской Федерации показал, что в настоящее время для расчета модуля деформации грунта регламентируются три разных формулы. Первая зависимость вытекает из традиционной формулы для расчета осадки S_z полупространства от нагрузки, передаваемой круглым штампом. Решив эту зависимость относительно модуля деформации E_d , выводят формулу для его расчета. Традиционные формулы для расчета осадки (см) и модуля деформации (МПа) имеют вид:

$$S_z = \frac{a \cdot p \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{E_d}; \quad E_d = \frac{a \cdot p \cdot D \cdot (1 - \mu^2)}{S_z}, \quad (1)$$

где a – коэффициент, учитывающий вид штампа и точку, в которой определяется осадка (для центра круглого жесткого штампа $a = \pi/4 \approx 0,79$); D – диаметр штампа, см; p – давление, передаваемое штампом, МПа; μ – коэффициент Пуассона (для крупнообломочного грунта $\mu = 0,27$; песков и супесей $\mu = 0,3$; суглинков $\mu = 0,35$ и глин $\mu = 0,42$).

В формулах (1) постулируется линейная зависимость осадки от давления. Такая линейная зависимость характерна для сравнительно небольшого диапазона давлений, ограничиваемого первой критической нагрузкой Н.М. Герсегонова. В настоящее время ГОСТ 20276.1–2020 содержит регламент определения модуля деформации на линейном участке графической зависимости осадки от давления. Методика ГОСТ 20276.1–2020¹¹ содержит указания по определению координат начальной (p_0 и S_0) и конечной (p_n и S_n) точек этого линейного участка. Так как определение первой критической нагрузки по Н.М. Герсегонову совпадает с определением конечного значения давления по ГОСТ 20276.1–2020, то обе эти величины давления характеризуют одно и то же предельное значение давления. При превышении давлением величины первой критической нагрузки или ее аналога p_n в трактовке ГОСТ 20276.1–2020 зависимость осадок от давления приобретает нелинейный характер. Поэтому при нелинейной зависимости осадки от давления модуль деформации зависит от нагрузки и уменьшается при увеличении дав-

¹¹ ГОСТ 20276.1–2020. Грунты. Метод испытания штампом. Введен в действие 11.08.2020. Взамен ГОСТ 20276–2012 в части метода испытания штампом. М.: Стандартинформ, 2020.

ления. Учет такой зависимости осадки от давления требует выполнять расчет модуля деформации от приращений осадок и давлений, характерных для линейного участка графика. Поэтому стандарт ГОСТ 20276.1–2020 для расчета модуля деформации регламентирует формулу

$$E_d = (1 - \mu^2) \cdot K_1 \cdot D \cdot \frac{\Delta p}{\Delta S}, \quad (2)$$

где K_1 – коэффициент, принимаемый для жесткого круглого штампа равным 0,79, этот коэффициент приблизительно равен коэффициенту a в формулах (1); Δp – приращения давления, МПа равное $\Delta p = p_n - p_o$; и ΔS – приращения осадки, см, соответствующее приращению давления Δp , равная $\Delta S = S_n - S_o$.

Две другие методики вычисления модуля деформации содержатся в стандартах дорожной отрасли ПНСТ 371–2019 и ПНСТ 311–2018¹². Формулы этих методик позволяют вычислять как модуль деформации грунта земляного полотна, так и общий модуль деформации на поверхности каждого испытанного слоя и всей дорожной одежды.

Согласно методике, регламентируемой ПНСТ 371–2019, модуль деформации грунта и дорожной одежды вычисляют по формулам:

$$E_d = \frac{p}{\lambda}; \quad E_d = \frac{\pi \cdot p}{2 \cdot \lambda}; \quad \lambda = \frac{S}{D}, \quad (3)$$

где λ – требуемая величина относительной деформации, значение которой принимается в диапазоне $\lambda = 0,01 \dots 0,02$ для грунтов земляного полотна и $\lambda = 0,04 \dots 0,08$ для дорожных одежд.

Методика, регламентируемая ПНСТ 311–2018, исходит из предположения, что осадки штампа связаны с максимальной величиной давления на ступени приложения нагрузки $p_{\max}$ полиномиальной зависимостью второй степени, вследствие чего для расчета осадки штампа и модуля деформации регламентированы формулы:

$$S_z = a_0 + a_1 \cdot p_{\max} + a_2 \cdot p_{\max}^2; \\ E_d = \frac{0,75 \cdot D}{a_1 + a_2 \cdot p_{\max}}, \quad (4)$$

где a_0 , a_1 и a_2 – постоянные многочлена второй степени; $p_{\max}$ – максимальная величина дав-

ления, переданного штампом на земляное полотно или дорожную одежду, при измерении, МПа.

Используя данные об упругих деформациях, возникающих при разгрузке испытываемой конструкции, методика ПНСТ 311–2018 позволяет вычислять модуль упругости грунта земляного полотна или дорожной одежды. Расчет модуля упругости выполняют по формуле:

$$E_{el} = \frac{0,75 \cdot D \cdot p_{\max 1}}{S_{el}}, \quad E_{el} = \frac{0,75 \cdot D}{S_{el}} \quad (5)$$

где $p_{\max 1}$ – максимальная величина давления, достигнутая на стадии нагрузки, МПа; S_{el} – упругая деформация, измеренная при разгрузке.

Для расчета модулей деформации земляного полотна и дорожной одежды применена формула (4). Некоторые из полученных нами экспериментальных зависимостей осадок земляного полотна и дорожных одежд от давления приведены в виде графиков на рисунке 5.

После выполнения штамповых испытаний дорожной одежды грунтощебеночный слой демонтировали, а непосредственно вблизи точек испытаний измеряли толщину слоя. Таким образом, в результате эксперимента получены значения модулей деформации грунта земляного полотна, общего модуля деформации дорожных одежд в пределах каждой секции и толщин грунтощебеночного слоя в точках его испытания. Для расчета модуля деформации грунтощебеночного слоя применена методика, регламентированная стандартом ПНСТ 371–2019. Расчет модуля деформации выполнялся методом последовательных приближений. Суть метода состоит в том, что необходимо задаться модулем деформации грунтощебеночного слоя. Затем при известных из данных экспериментов значениях модуля деформации земляного полотна, толщины слоя и диаметра штампа вычислить общий модуль деформации на поверхности дорожной одежды. Если значение вычисленного модуля деформации меньше значения, полученного на основе экспериментальных данных, то величину модуля деформации грунтощебеночного слоя повышают. Расчет выполняют до тех пор, пока не будет достигнуто равенство между значениями модулей деформации дорожной одежды, вычисляемого по методике ПНСТ 371–2019 и полученного в результате эксперимента.

¹² ПНСТ 311–2018. Дороги автомобильные общего пользования. Показатели деформативности конструктивных слоев дорожной одежды из несвязных материалов и грунтов земляного полотна. Технические требования и методы определения. Введен в действие 25.12.201. Введен впервые. М.: Стандартинформ, 2019.

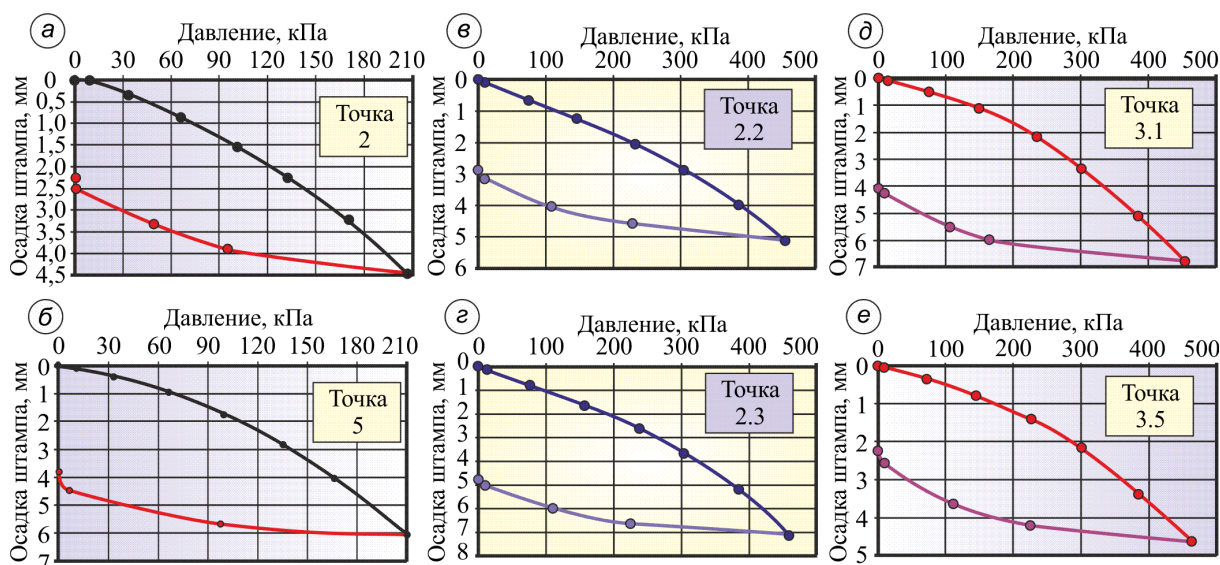


Рисунок 5 – Зависимости осадок земляного полотна и дорожной одежды от давления:
а, б – максимальная и минимальная осадки земляного полотна; в, г – максимальная и минимальная осадки
грунтощебеночной дорожной одежды с щебнем фракции 20–40 мм; д, е – максимальная и минимальная осадки
грунтощебеночной дорожной одежды с щебнем фракции 40–70 мм

Figure 5 – Dependences the settlement of subgrade and road pavement from pressure: а and б – maximum and minimum
settlement of the subgrade; в and г – maximum and minimum settlement of soil-crushed-stone road pavement with crushed
stone of 20-40 mm fraction; д and е – maximum and minimum settlement of soil-crushed-stone road pavement with crushed
stone of fraction 40-70 mm

В таблице 5 приведены данные эксперимента о значениях модулей деформации грунта и дорожных одежд, а также толщины грун-

тощебеночных слоев в точках испытаний, а в таблице 6 даны результаты расчета модуля деформации грунтощебеночного слоя.

Таблица 5
Результаты эксперимента

Table 5
Experiment results

Сек-ция	Точка измерения	Материал слоя	Толщина слоя, см	Ed, МПа	
				грунта	дорожной одежды
Дорожная одежда с грунтощебеночным слоем с применением щебня фракции 20–40 мм					
3	2.1	Грунтощебень (щебень 60% по объему)	15,6	12,1	22,5
	2.2		15,2	11,7	22,2
2	2.5	Грунтощебень (щебень 50% по объему)	16,0	8,7	18,1
	2.6		15,4	8,7	17,3
1	2.3	Грунтощебень (щебень 40% по объему)	15,0	9,2	16,5
	2.4		15,7	10,2	19,4
Дорожная одежда с грунтощебеночным слоем с применением щебня фракции 40–70 мм					
1	3.1	Грунтощебень (щебень 60% по объему)	15,2	12,1	16,2
	3.2		15,0	11,7	17,1
2	3.3	Грунтощебень (щебень 50% по объему)	15,6	8,7	18,6
	3.4		15,8	8,7	18,9
3	3.5	Грунтощебень (щебень 4 % по объему)	15,5	9,2	24,4
	3.6		16,0	10,2	24,1

Таблица 6
Результаты вычисления модуля деформации грунтощебеночного слоя

Table 6
Results of calculation of the modulus of deformation soil-crushed-stone layer

Фракция щебня, мм	Содержание щебня, %, по объему	Модуль деформации грунтощебеночного слоя, МПа
20–40	40	47,5
	50	70
	60	77,5
40–70	40	43,5
	50	80
	60	90

Модули деформации грунтощебеночного слоя (см. таблицу 6) могут быть использованы в расчете дорожных одежд при условии, что влажность грунта в этом слое равна оптимальной влажности для уплотнения. При других значениях влажности грунта величина модуля деформации грунтощебеночного слоя будет иной. В этом случае значения модулей деформации, представленные в таблице 6, не применимы.

Для ликвидации данного недостатка проведена серия экспериментов по одноосному сжатию грунтощебеночных образцов диаметром 10 см и высотой 20 см. В этих целях сотрудниками кафедры СЭД ФГБОУ ВО «СибАДИ» разработана специальная методика, состоящая из трехосновных этапов: изготовление образцов и подготовки их к испытанию, проведение испытания одноосным сжатием и обработки результатов опыта с применением статистических методов. Образцы высотой 20 см приготавливали, используя две цилиндрические формы прибора стандартного уплотнения. Для испытаний готовили несколько групп образцов. По плану эксперимента влажность грунта в образцах каждой группы должна быть одинаковой, а влажности грунта в образцах разных групп, наоборот, должны отличаться. Соблюдение этого условия обеспечивали тем, что образцы, входящие в одну и ту же группу, насыщали водой в одинаковых условиях в течение одного и того же времени. Образцы других групп увлажнили в течение другого времени. Это позволило обеспечить различную влажность грунта в образцах разных групп. Подготовленные образцы испытывались одноосным сжатием с построением за-

висимости деформации образца от давления. Целью эксперимента являлось вычисление отношения модуля деформации грунтощебеночного образца при произвольной влажности грунта в нем к модулю деформации грунтощебеночного образца при оптимальной влажности грунта в нем. Это отношение названо поправочным коэффициентом к значениям модуля деформации грунтощебеночного и обозначено k_w . Для вычислений коэффициентов k_w использовали расчетные значения модуля деформации грунта при различных влажностях грунта. Вычисление расчетных значений модулей деформации выполнено с использованием методов статистической обработки, которые регламентированы ГОСТ 20522–2012¹³ для грунтов. По величине коэффициентов вариации установлено, что статистическая обработка должна выполняться с применением нормального закона распределения случайной величины. В этом случае применялся весь алгоритм статистической обработки, регламентируемой ГОСТ 20522–2012. Суть такого алгоритма сводится к проверке каждой выборки на наличие грубых ошибок и вычислении расчетных значений случайной величины при предварительном вычислении всех необходимых статистик (среднего значения по выборке, среднеквадратического отклонения, коэффициента вариации, показателя точности среднего значения).

Более подробно методику испытаний и статистическую обработку их результатов, примененную для определения коэффициентов k_w , мы поясним в отдельной статье. В настоящей публикации мы приведем расчетные значения коэффициентов k_w , они даны в таблице 7.

¹³ ГОСТ 20522–2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. Введен в действие 01.06.2013. Взамен ГОСТ 20522–96. М.: Стандартинформ, 2013.

Таблица 7
Расчетные значения коэффициентов k_w для вычисления модуля деформации грунтощебеночного слоя при влажности грунта в нем отличной от оптимального для уплотнения значения

Table 7
Calculated values of the k_w coefficients for calculating the modulus of deformation of the gravel layer with soil moisture in it different from the optimal value for compaction

Содержание щебня, %, по объему	Поправка k_w при относительной влажности грунта (W/W_L)					
	0,50	0,55	0,62	0,71	0,80	0,89
40	1,00	0,88	0,68	0,60	0,56	0,54
50	1,00	0,90	0,72	0,66	0,63	0,61
60	1,00	0,92	0,78	0,73	0,71	0,69

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные значения модуля деформации грунтощебеночного слоя и поправок в виде коэффициента k_w можно применять при проектировании дорожных одежд низшего типа. Порядок расчета дорожной одежды должен быть следующий:

1. Определение расчетной относительной влажности грунта W_{cal}/W_L . Для этого применяют общепринятую методику, учитывающую разновидность грунтов, дорожно-климатическую зону и ее подзону, конструктивные особенности дорожной одежды. Таким образом, определение расчетной влажности производится точно так же, как ее расчет при проектировании дорожной одежды типа.

2. Интерполяцией данных таблицы 7 находят величину коэффициента k_w , соответствующую вычисленной расчетной относительной влажности грунта.

3. Вычисляют модуль деформации грунтощебеночного слоя $E_{dw(cal)}$, соответствующий влажности грунта в нем. Это вычисление выполняют по формуле

$$E_{dw(cal)} = k_w \cdot E_{dw(opt)}, \quad (5)$$

где $E_{dw(opt)}$ – модуль деформации грунтощебеночного слоя при оптимальной влажности грунта в нем, МПа.

4. Используя найденное значение модуля деформации грунтощебеночного слоя $E_{dw(cal)}$ и значения толщины слоя, параметров нагрузки и модуля деформации грунта земляного полотна выполняют вычисления общего модуля деформации однослойной дорожной одежды низшего типа.

5. Вычисленное значение общего модуля деформации однослойной дорожной одежды сравнивают с его требуемым значением

$E_{d(required)}$, проверяя выполнение условия прочности, регламентированного ПНСТ 371–2019.

6. Используя представленную последовательность расчета, во всех трех ДКЗ Омской области рассчитаны и отстроены опытные участки. По результатам испытания этих участков будут определены типовые конструкции однослойных дорожных одежд с грунтощебеночным покрытием.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Брехман А.И., Ильина О.Н., Трифонов А.А. Органоминеральные смеси на основе нефтяных шламов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 1(13). С. 264–267.
- Ilina, O.N., Ilin, I.B.: Road organo-mineral mixtures based on oil sludge. Magazine of Civil Engineering 92(8), 115–126 (2019).
- Лыткин А.А., Старков Г.Б., Вагнер Е.Я. Исследование эффективности использования белитового шлама для устройства монолитных слоев дорожных одежд методом холодного ресайклинга // Вестник СибАДИ. 2020. № 6, Т.17. С. 764–776.
- Лыткин А.А. Влияние повторного уплотнения и транспортных нагрузок на характер твердения белитового шлама в слоях дорожных одежд // Вестник СибАДИ. 2017. № 3(55). С. 125–132.
- Lytkin, A.A.: Study of the Transport Loads Influence on the Nature of Belite Sludge Hardening in Pavement. Materials Science Forum 992, 79–85 (2020).
- Gulzadyan, H., Voskanyan, G., Ter-Simonyan, V.: Exploration Results of Applying Limestone Powder in Crushed-Stone-Sand Mixtures for Road Pavement Layers. Advanced Materials Research 1020, 31–36 (2014).
- Satyanarayana Reddy C.N.V., Prasad, A.C.S.V.: Performance Studies on Cement Stabilized Gravelly Soil Exposed to Sulfate Environment. Indian Geotechnical Journal 45(2), 217–224 (2014).
- Rudgalskiy, D., Chusov, V., Aleksandrov, A.: Strength indices of sand reinforced by foamed

bitumen. In: International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019, Journal of Physics: Conference Series, vol. 1614, pp. 1-9. IOP Publishing Ltd (2020).

9. Naeini, S.A., Naderinia, B., Izadi, E.: Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer KSCE Journal of Civil Engineering 16(6), 943–949 (2012).

10. Ismaiel, H.A.H.: Cement Kiln Dust Chemical Stabilization of Expansive Soil Exposed at El-Kawther Quarter, Sohag Region, Egypt. International Journal of Geosciences 4, 1416–1424 (2013).

11. Cui, S.L., et al: Mechanical behavior and micro-structure of cement kiln dust-stabilized expensive soil. Arabian Journal of Geosciences 11, 521 (2018).

12. Thomas, A., Tripathi, R.K., Yadu, L.K.: A Laboratory Investigation of Soil Stabilization Using Enzyme and Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag. Arabian Journal of Geosciences 43, 5193–5202 (2018).

13. FOP Oriola, Moses, G., Sani, J.E.: Stabilization of lateritic soil with cement kiln dust for road pavement material based on defined curing temperature conditions. Indian Journal of Engineering 14(37), 215–226 (2017).

14. Vdovin, E.A., Stroganov, V.F.: Properties of cement-bound mixes depending on technological factors. Magazine of Civil Engineering 93(1), Pp. 147–155 (2020).

15. Вдовин Е.А., Мавлиев Л.Ф., Строганов В.Ф. Пути повышение эффективности укрепления грунтов для строительства дорожных одежд // Вестник СибАДИ. 2013. № 1 (29). С. 52–58.

16. Буланов П.Е., Мавлиев Л.Ф., Вдовин Е.А. Оптимизация состава щебеночно-песчаной смеси обработанной портландцементом в комплексе с пластифицирующей и гидрофобизирующей добавкой // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 2 (32). С. 300–305.

17. Adeyanju, E.A., Okeke, C.A.: Clay soil stabilization using cement kiln dust. In: 1st International Conference on Sustainable Infrastructural Development, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 640, pp. 1-10. IOP Publishing Ltd (2019).

18. Dolinsky, Y.A., Starkov, G.B., Matveev, S.A. Experience in Repairing Highways Using Cold Regeneration Technology in the Altai Republic. In: International science and technology conference FarEastCon-2019, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 753, pp. 1-5. IOP Publishing Ltd (2020).

19. Chen, X., Chen, L., Zhang, J.: Permanent Deformation Behavior of Coarse-Grained Residual Subsoil Under Large Amplitude Loading Cycles. In: Tutumluer E., Chen X., Xiao Y. (eds) Advances in Environmental Vibration and Transportation Geodynamics. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 66. Springer, Singapore (2020).

20. Александров А.С., Семенова Т.В., Александрова Н.П. Метод расчета остаточных деформаций,

применяемых в основаниях дорожных одежд // Вестник СибАДИ. 2019. № 4(16). С. 456–471.

21. Rahman, M.S., Erlingsson, S.: Predicting permanent deformation behaviour of unbound granular materials. International Journal of Pavement Engineering 16(7), 587–601 (2015).

22. Salour, F., Erlingsson, S.: Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests. International Journal of Pavement Engineering 18(3), 236–246 (2017).

23. Salour, F., Erlingsson, S. Characterisation of Permanent Deformation of Silty Sand Subgrades from Multistage RLT Tests. In: 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016), Procedia Engineering vol. 143, pp. 300–307 (2016).

24. Niemunis A., Wichtmann T. Separation of time scale in the HCA model for sand. Acta Geophysica 62(5), 1127–1145 (2014).

25. Александров А.С., Семенова Т.В., Калинин А.Л. Анализ причин колебания на покрытиях нежестких дорожных одежд и рекомендации по уменьшению этого явления // Вестник СибАДИ. 2019. № 6(70). С. 718–745.

26. Матвеев С.А., Немировский Ю.В. Свойства упругого слоя основания, армированного объемной георешеткой // Наука и техника в дорожной отрасли. 2005. № 2(33). С. 24–28.

27. Матвеев С.А., Литвинов Н.Н. Определение деформационных характеристик щебеночно-песчаного основания, армированного стальной геосеткой // Вестник СибАДИ. 2013. № 4(32). С. 57–61.

28. Матвеев С.А., Мартынов Е.А., Литвинов Н.Н. Экспериментально-теоретические исследования армированного основания дорожной одежды // Вестник СибАДИ. 2015. 44(4). С. 80–86.

29. Matveev, S.A., et al: The geogrid-reinforced gravel base pavement model. Magazine of Civil Engineering 94(2), 21–30 (2020).

30. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Determine the reinforcement effect of gravel layer on a sandy foundation. Applied Mechanics and Materials 662, 164–167 (2014).

31. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Effect of Reinforcing the Base of Pavement with Steel Geogrid Applied Mechanics and Materials 587–589, 1137–1140 (2014).

32. Андреева Е.В. Исследование модулей деформации мерзлого, талого и оттаивающего золошлакового материала для целей рекультивации на примере воркутинской ТЭЦ-2 // Инженерные изыскания. № 13(4). С. 8–15.

33. Лунёв А.А., Сиротюк В.В. Применение золошлаковых смесей для вертикальных планировок и строительства городских дорог // Техника и технологии строительства. 2015. 1(1). С. 24–31.

34. Лунёв А.А., Сиротюк В.В., Барац Н.И. Экспериментальные исследования прочностных характеристик золошлаковой смеси // Вестник СибАДИ. 2016. № 6 (52). С. 72–79.

35. Лунёв А.А., Сиротюк В.В., Иванов Е.В. Результаты исследований деформационных характеристик золошлаковых смесей // Вестник СибАДИ. 2017. № 1 (53). С. 103–110.

36. Лунёв А.А., Сиротюк В.В. Сопоставление деформационных параметров золошлаковой смеси, полученных в лабораторных и натурных условиях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 2(21). С. 215–227.
37. Попкова А.В., Попкова А.В. Обоснование модуля упругости земляного полотна из золошлаковой смеси для расчёта дорожных одежд // Техника и технологии строительства. 2017. № 1(9). С. 128–133.
38. Разуваев Д.А., Чахлов М.Г. Результаты исследования золошлаков новосибирской ТЭЦ-3 на предмет применения в качестве материала в дорожном строительстве // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2020. 1(1). С. 62–68.
39. Сиротюк В.В., Иванов Е.В. Исследование свойств золошлаковых отходов омских ТЭЦ для применения в дорожном строительстве // Вестник МАНЭБ. 2011. № 2(17). 66 с.
40. Сиротюк В.В., Троян Т.П. Влияние углистых остатков на качество золошлаков, применяемых для строительных технологий // Вестник СибАДИ. 2017. № 6(58). С. 119–125.
41. Lunev, A.A., Sirotyuk, V.V.: Plate load test of base taken from coal ash and slag mixture in experimental tray and on experimental section of embankment. In: International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2018), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 451, pp. 1-6. IOP Publishing Ltd (2018).
42. Sirotyuk, V.V., Lunev, A.A.: Strength and deformation characteristics of ash and slag mixture. Magazine of Civil Engineering 74(6), 3–16 (2017).
43. Lunev, A.A., Sirotyuk, V.V.: Stress distribution in ash and slag mixtures. Magazine of Civil Engineering 86(2), 72–82 (2019). (in Russian)

REFERENCES

1. Brekhman A.I., Il'ina O.N., Trifonov A.A. Organomineral'nye smesi na osnove neftnykh shlamov [Organomineral mixtures based on oil sludge] // *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2013, 13(1): 264-267. (in Russian)
2. Ilina, O.N., Ilin, I.B.: Road organo-mineral mixtures based on oil sludge. Magazine of Civil Engineering 2019 92(8): 115–126.
3. Lytkin A.A., Starkov G.B., Vagner E.YA. Issledovanie effektivnosti ispol'zovaniya belitovogo shlama dlya ustrojstva monolitnykh sloev dorozhnykh odezhd metodom holodnogo resajklinga [Investigation of the effectiveness of the use of whitewash sludge for the device of monolithic layers of road clothes by cold recycling] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020, 17(6): 764-776. (in Russian)
4. Lytkin A.A. Vliyaniye povtornogo uplotneniya i transportnykh nagruzok na harakter tverdeniya belitovogo shlama v sloyah dorozhnykh odezhd [The effect of re-compaction and transport loads on the character of hardening of whitewash sludge in layers of road clothes] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2017, 55(3): 125-132. (in Russian)
5. Lytkin, A.A.: Study of the Transport Loads Influence on the Nature of Belite Sludge Hardening in Pavement. Materials Science Forum 992, 79–85 (2020).
6. Gyulzadyan, H., Voskanyan, G., Ter-Simonyan, V.: Exploration Results of Applying Limestone Powder in Crushed-Stone-Sand Mixtures for Road Pavement Layers. Advanced Materials Research 1020, 31–36 (2014).
7. Satyanarayana Reddy C.N.V., Prasad, A.C.S.V.: Performance Studies on Cement Stabilized Gravelly Soil Exposed to Sulfate Environment. Indian Geotechnical Journal 45(2), 217–224 (2014).
8. Rudgalskiy, D., Chusov, V., Aleksandrov, A.: Strength indices of sand reinforced by foamed bitumen. In: International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019, Journal of Physics: Conference Series, vol. 1614, pp. 1-9. IOP Publishing Ltd (2020).
9. Naeini, S.A., Naderinia, B., Izadi, E. Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer KSCE Journal of Civil Engineering 16(6), 943–949 (2012).
10. Ismaiel, H.A.H.: Cement Kiln Dust Chemical Stabilization of Expansive Soil Exposed at El-Kawther Quarter, Sohag Region, Egypt. International Journal of Geosciences 4, 1416-1424 (2013).
11. Cui, S.L., et al: Mechanical behavior and micro-structure of cement kiln dust-stabilized expensive soil. Arabian Journal of Geosciences 11, 521 (2018).
12. Thomas, A., Tripathi, R.K., Yadu, L.K.: A Laboratory Investigation of Soil Stabilization Using Enzyme and Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag. Arabian Journal of Geosciences 43, 5193–5202 (2018).
13. FOP Oriola, Moses, G., Sani, J.E.: Stabilization of lateritic soil with cement kiln dust for road pavement material based on defined curing temperature conditions. Indian Journal of Engineering 14(37), 215-226 (2017).
14. Vdovin, E.A., Stroganov, V.F.: Properties of cement-bound mixes depending on technological factors. Magazine of Civil Engineering 93(1), 147–155 (2020).
15. Vdovin E.A., Mavliev L.F., Stroganov V.F. Puti povysheniye effektivnosti ukrepleniya gruntov dlya stroitel'stva dorozhnykh odezhd [Ways to increase the effectiveness of soil strengthening for the construction of road clothes] // *Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2013. 29(1): 52-58. (in Russian)
16. Bulanov P.E., Mavliev L.F., Vdovin E.A. Optimizatsiya sostava shchebenochno-peschanoy smesi obrabotannoy portlandcementom v komplekse s plastificiruyushchej i gidrofobiziruyushchej dobavkoj [Optimization of the composition of crushed stone-sand mixture treated with Portland cement in combination with plasticizing and hydrophobizing additive] // *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2015. 2 (32): 300-305. (in Russian)

17. Adeyanju, E.A., Okeke, C.A.: Clay soil stabilization using cement kiln dust. In: 1st International Conference on Sustainable Infrastructural Development, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 640, pp. 1-10. IOP Publishing Ltd (2019).
18. Dolinsky, Y.A., Starkov, G.B., Matveev, S.A. Experience in Repairing Highways Using Cold Regeneration Technology in the Altai Republic. In: International science and technology conference FarEast-Con-2019, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 753, pp. 1-5. IOP Publishing Ltd (2020).
19. Chen, X., Chen, L., Zhang, J.: Permanent Deformation Behavior of Coarse-Grained Residual Subsoil Under Large Amplitude Loading Cycles. In: Tutumluer E., Chen X., Xiao Y. (eds) Advances in Environmental Vibration and Transportation Geodynamics. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 66. Springer, Singapore (2020).
20. Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Aleksandrova N.P. Metod rascheta ostatochnykh deformacij, primenyaemykh v osnovaniyah dorozhnykh odezhd [Method of calculation of residual deformations used in the bases of road clothes] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2019, 68(4): 456-471. (in Russian)
21. Rahman, M.S., Erlingsson, S.: Predicting permanent deformation behaviour of unbound granular materials. *International Journal of Pavement Engineering* 16(7), 587-601 (2015).
22. Salour, F., Erlingsson, S.: Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests. *International Journal of Pavement Engineering* 18(3), 236-246 (2017).
23. Salour, F., Erlingsson, S. Characterisation of Permanent Deformation of Silty Sand Subgrades from Multistage RLT Tests. In: 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016), *Procedia Engineering* vol. 143: 300-307 (2016).
24. Niemunis A., Wichtmann T. Separation of time scale in the HCA model for sand. *Acta Geophysica* 62(5), 1127-1145 (2014).
25. Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Kalinin A.L. Analiz prichin koleeobrazovaniya na pokrytiyah nezhestkih dorozhnykh odezhd i rekomendacii po umen'sheniyu etogo yavleniya [Analysis of the causes of rutting on the coatings of non-rigid road clothes and recommendations for reducing this phenomenon] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2019, 70(6): 718-745. (in Russian)
26. Matveev S.A., Nemirovskij YU.V. Svoystva uprugogo sloya osnovaniya, armirovannogo ob'yomnoj geosetkoj [Properties of the elastic layer of the base reinforced with a volumetric geogrid] // *Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli*, 2005, 33(2): 24-28.
27. Matveev S.A., Litvinov N.N. Opredelenie deformacionnykharakteristik shchebenochno-peschachanogo osnovaniya, armirovannogo stal'noj geosetkoj [Determination of the deformation characteristics of a crushed-sand foundation reinforced with a steel geogrid] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2013, 32(4): 57-61. (in Russian)
28. Matveev S.A., Martynov E.A., Litvinov N.N. Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya armirovannogo osnovaniya dorozhnoj odezhd [Experimental and theoretical studies of reinforced pavement foundation] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2015, 44(4): 80-86. (in Russian)
29. Matveev, S.A., et al: The geogrid-reinforced gravel base pavement model. *Magazine of Civil Engineering* 94(2), 21-30 (2020).
30. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Determine the reinforcement effect of gravel layer on a sandy foundation. *Applied Mechanics and Materials* 662, 164-167 (2014).
31. Matveev, S.A., Martynov, E.A., Litvinov, N.N.: Effect of Reinforcing the Base of Pavement with Steel Geogrid *Applied Mechanics and Materials* 587-589, 1137-1140 (2014).
32. Andreeva E.V. Issledovanie modulej deformacii merzlogo, talogo i ottaivayushchego zoloshlakovogo materiala dlya celej rekul'tivacii na primere vorkutinskoj TEC-2 [Investigation of deformation modules of frozen, thawed and thawing ash and slag material for reclamation purposes on the example of Vorkuta CHP-2] // *Inzhenernye izyskaniya*, 13(4): 8-15.
33. Lunyov A.A., Sirotyuk V.V. Primenenie zoloshlakovykh smesey dlya vertikal'nykh planirovok i stroitel'stva gorodskih dorog [The use of ash and slag mixtures for vertical planning and construction of urban roads] // *Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva*, 2015, 1(1): 24-31.
34. Lunyov A.A., Sirotyuk V.V., Barac N.I. Eksperimental'nye issledovaniya prochnostnykh harakteristik zoloshlakovoj smesi [Experimental studies of the strength characteristics of the ash-slag mixture] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2016, 52(6): 72-79. (in Russian)
35. Lunyov A.A., Sirotyuk V.V., Ivanov E.V. Rezul'taty issledovaniy deformacionnykh harakteristik zoloshlakovykh smesey [Results of studies of deformation characteristics of ash and slag mixtures] // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2017, 53(1): 103-110. (in Russian)
36. Lunyov A.A., Sirotyuk V.V. Sopostavlenie deformacionnykh parametrov zoloshlakovoj smesi, poluchennykh v laboratornykh i naturnykh usloviyakh [Comparison of deformation parameters of ash and slag mixture obtained in laboratory and field conditions] // *Vestnik Tomskogo gosudarstvenno-go arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2019, 21(2): 215-227. (in Russian)
37. Popkova A.V., Popkova A.V. Obosnovanie modulya uprugosti zemlyanogo polotna iz zoloshlakovoj smesi dlya raschyota dorozhnykh odezhd [Substantiation of the modulus of elasticity of the roadbed made of ash and slag mixture for the calculation of road clothes] // *Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva*, 2017, 9(1): 128-133. (in Russian)
38. Razuvaev D.A., Chahlov M.G. Rezul'taty issledovaniya zoloshlakov novosibirskoj TEC-3 na predmet primeneniya v kachestve materiala v dorozhnom stroitel'stve [The results of the study of the ash slag of the Novosibirsk CHP-3 for use as a material in road construction] // *Fundamental'nye i prikladnye voprosy transporta*, 2020, 1(1): 62-68.

39. Sirotyuk V.V., Ivanov E.V. Issledovanie svoystv zoloshlakovykh othodov omskih TEC dlya primeneniya v dorozhnom stroitel'stve [Investigation of the properties of ash and slag waste from Omsk thermal power plants for use in road construction]// *Vestnik MANEB*, 2011, 17(2): 66. (in Russian)
40. Sirotyuk V.V., Troyan T.P. Vliyanie ugliстых ostatkov na kachestvo zoloshlakov, primenyaemykh dlya stroitel'nykh tekhnologiy [The influence of carbonaceous residues on the quality of ash and slag used for construction technologies]// *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2017, 58(6): 119-125. (in Russian)
41. Lunev, A.A., Sirotyuk, V.V.: Plate load test of base taken from coal ash and slag mixture in experimental tray and on experimental section of embankment. In: International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2018), IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, vol. 451, pp. 1-6. IOP Publishing Ltd (2018).
42. Sirotyuk, V.V., Lunev, A.A.: Strength and deformation characteristics of ash and slag mixture. *Magazine of Civil Engineering* 74(6), 3–16 (2017).
43. Lunev, A.A., Sirotyuk, V.V.: Stress distribution in ash and slag mixtures. *Magazine of Civil Engineering* 86(2), 72–82 (2019).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Александров А.С. Произвел постановку задачи, выполнил разработку методики эксперимента и обработки его результатов, написал текст статьи.

Долгих Г.В. Произвел обработку результатов эксперимента и принял участие в редактировании текста статьи.

Пролыгин А.С. Произвел штамповые испытания и принял участие в строительстве моделей дорожных одежд, рассчитав их толщину, в обработке результатов штамповых испытаний и редактировании текста статьи.

Чусов В.В. Произвел испытания по определению физико-механических грунта и щебня, выполнил лабораторные работы по контролю качества строительства моделей, принял участие в штамповых испытаниях и редактировании текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Aleksandr S. Prolygin made the statement of the problem, developed the methodology of the experiment and processing its results, wrote the text of the article.

Anatoliy S. Aleksandrov processed the results of the experiment and took part in editing the text of the article.

Gennady V. Dolgikh performed the stamp tests and took part in the construction of road clothes models, calculating their thickness, processing the results of the stamp tests and editing the text of the article.

Vasiliy V. Chusov performed the tests to determine the physical and mechanical soil and crushed stone, performed laboratory work to control the quality of construction of models, took part in stamp tests and editing the text of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пролыгин Александр Сергеевич – аспирант кафедры «Строительство и эксплуатация дорог», Author ID: 57222243670.

Александров Анатолий Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительство и эксплуатация дорог», Author ID: 57191531014, ResearcherID: I-8860-2018.

Долгих Геннадий Владимирович – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Строительство и эксплуатация дорог», Author ID: 57199391542.

Чусов Василий Владимирович – преподаватель кафедры «Строительство и эксплуатация дорог», Author ID: 5719153040/57213840332.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr S. Prolygin – Postgraduate student of the Roads Construction and Operation Department, Author ID: 57222243670.

Anatoliy S. Aleksandrov – Cand. of Sci., Associate Professor of the Roads Construction and Operation Department, Author ID: 57191531014, Researcher ID: I-8860-2018.

Gennady V. Dolgikh – Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Roads Construction and Operation Department, Author ID: 57199391542.

Vasiliy V. Chusov – Teacher of the Roads Construction and Operation Department, Author ID: 5719153040/57213840332.

Научная статья

УДК 691.32

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-790-799>

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ДРОБЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗРАБОТКЕ СОСТАВОВ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ

Э.Н. Хафизова, Ю.Ф. Панченко, Д.А. Панченко

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

hafizova_elza@mail.ru,

panchenkojf@tyuiu.ru,

panchenkoda@tyuiu.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье изучены актуальные вопросы использования технологических отходов, образующихся при дроблении горных пород.

Материалы и методы. В проведенных исследованиях использованы отсе́вы дробления горных пород производства Режевского щебеночного завода и доломитовый отсе́в Саткинского щебеночного завода. Приведены данные физико-механических свойств отходов дробления, а также исследования пылевидных частиц отсе́вов горных пород, выполненных лазерным анализатором размеров частиц Fritsch Analysette 22. Для изучения структуры бетона применялся электронный сканирующий микроскоп JEOL JSM-6510.

Результаты. Приводятся результаты исследования тяжелых цементных бетонов классов В22,5-В40 с использованием отходов дробления горных пород. Для регулирования свойств бетонов использована добавка гиперпластификатор марки MC-PowerFlow 3100 и воздухововлекающая добавка Centrament Air 202. Исследован фазовый состав контактной зоны между цементным камнем и заполнителем – гранитным отсе́вом.

Заключение. Разработаны составы тяжелых бетонов с применением отсе́вов дробления щебня и химических добавок для регулирования свойств бетона. Выпущена опытная партия железобетонных изделий на заводе ЖБИ «Ротор» п. Винзили Тюменской области.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: отходы дробления, горные породы, строительные материалы, отсе́вы дробления щебня, тяжелый бетон, добавки в бетон

Статья поступила в редакцию 12.08.2021; одобрена после рецензирования 14.11.2021; принята к публикации 14.12.2021.

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: Хафизова Э.Н., Панченко Ю.Ф., Панченко Д.А. Применение технологических отходов дробления горных пород при разработке составов цементных бетонов // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 6(82). С. 790-799. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-790-799>

© Хафизова Э.Н., Панченко Ю.Ф., Панченко Д.А., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-790-799>

USE OF ROCK CRUSHING TECHNOLOGICAL WASTES FOR CEMENT CONCRETE COMPOSITIONS

Elza N. Khafizova, Iuliia F. Panchenko, Dmitrii A. Panchenko

Tyumen Industrial University,

Tyumen, Russia

khafizova_elza@mail.ru

panchenkojf@tyuiu.ru

panchenkoda@tyuiu.ru

ABSTRACT

Introduction. the article deals with the issues of the use of technological waste generated during rocks crushing.

Materials and Methods. In the research the rock crushing screenings from the Rezhevsky crushed rock plant and dolomite screenings from the Satkinsky crushed rock plant were used. The data on the physical-mechanical properties of crushing waste is presented, as well as a study of dusty rock cuttings made with a Fritsch Analysette 22 laser particle size analyser. The structure of concrete was analyzed by JEOL JSM-6510 electron microscope.

Results. The studying results of heavy weight cement concretes of classes B22.5 - B40 with crushed stone are presented in the article. To control the properties of concrete an MC-PowerFlow 3100 hyperplasticizer additive and an air-entraining additive Centrament Air 202 were used. The phase composition of the contact zone between the cement stone and the aggregate - granite screening has been investigated.

Conclusion. compositions of heavy concrete have been developed with the use of crushed stone screenings and chemical additives to regulate concrete properties. A pilot batch of reinforced concrete products was produced at the Rotor reinforced concrete plant in Vinzili, Tyumen Region.

KEYWORDS: stone crushing waste, rocks, building materials, screenings of crushed stone, heavy weight concrete, concrete additives.

The article was submitted 12.08.2021; approved after reviewing 14.11.2021; accepted for publication 14.12.2021.

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: Khafizova E.N., Panchenko I.F., Panchenko D.A. Use of rock crushing technological wastes for cement concrete compositions. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2021; 18 (6): 790-799. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-790-799>

© Khafizova E.N., Panchenko I.F., Panchenko D.A., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Применение технологических отходов для замены природного сырья является одним из способов снижения себестоимости строительных материалов. Кроме того, это снижает нагрузку на окружающую среду и позволяет экономить природные ресурсы [1, 2, 3, 4]. На любом производстве образуются отходы и, как следствие, ухудшается экологическая обстановка регионов [5, 6, 7]. В качестве вторичного сырья отходы производства применяются в среднем около 11%. На предприятиях по производству щебеночных материалов образуется 60–90 млн м³/год отходов, в том числе при производстве щебня образуется около 20–30% отсеков, часть которых используется, однако большая часть отправляется в отвалы. По своим характеристикам и удельной стоимости отсеки дробления горных пород могут быть альтернативным вариантом в качестве мелкого заполнителя в составе тяжелых цементных бетонов [8, 9, 10, 11].

Возможность получения бетонных композиций с использованием технологических отходов дробления горных пород послужила научной предпосылкой для проведения исследований.

Для исследования авторами статьи были проанализированы близлежащие карьеры и сделан выбор в пользу изучения технологических отходов дробления горных пород карьеров Челябинской и Свердловской обл. в виде отсеков от дробления щебня [13, 14, 15, 16].

В большинстве случаев бетонные смеси с применением отходов дробления имеют недостатки в виде повышенной водопотребности, что влечет за собой снижение прочностных показателей, морозостойкости, повышение расхода цемента, и, следовательно, стоимости бетона [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25].

Целью проведения исследования является получение тяжелых бетонов для условий Тюменского региона с применением технологических отходов дробления горных пород в качестве мелкого заполнителя.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе исследования использовались местные материалы Уральского федерального округа. Исходя из показателей модуля крупности и содержания ПГИ были выбраны два отхода дробления горных пород: гранитный отсев Режевского щебеночного завода и доломитовый отсев Саткинского щебеночного завода. При исследовании показателей бетона

в качестве контрольного применялся состав на природном песке производства ООО «Тюменьнеруд».

В качестве вяжущего вещества использовался портландцемент класса прочности 42,5, нормально твердеющий ЦЕМ I 42,5Н ГОСТ 31108–2016 производства ОАО «Сухо-ложскцемент».

Для регулирования свойств бетона применялся гиперпластификатор MC Power Flow 3100 и воздухововлекающая добавка Centrament Air 202. Для исследований по определению морозостойкости использовалась комплексная добавка, состоящая из 80% поликарбоксилатов и 20% воздухововлекающей добавки.

В исследованиях применялись стандартные физико-механические и химические методы испытаний заполнителей и бетонов. Размеры пылевидных частиц отсеков дробления горных пород определялись методом лазерной дифракции. Структуру бетонов исследовали на электронном сканирующем микроскопе JEOL-JSM6510LV. Для определения фазового состава использовался рентгенофазовый анализ методом «порошка».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Авторами были изучены свойства отходов дробления горных пород с гранитного (г. Реж, Свердловская обл.) и доломитового (г. Сатка, Челябинская обл.) карьеров. Основные показатели гранитного отсека: насыпная плотность составляет 1450 кг/м³, модуль крупности – 2,57, марка щебня по плотности – 1000, содержание ПГИ – 2,9%. Основные характеристики доломитовых отсеков: насыпная плотность – 1380 кг/м³, модуль крупности – 3,3, марка щебня по дробимости – 800 и содержание ПГИ – 5%. Минерало-петрографический состав гранита представлен следующими минералами: кварц (до 45–65%), биотит, мусковит (до 15%), роговая обманка (до 10%), полевошпат (до 15%), темноцветные минералы (до 0,5%). Гранитный отсев по крупности зерен относится к группе крупных песков. Для данного отсека характерно высокое содержание пылевидной составляющей размером менее 0,15 мм, которое согласно ГОСТ 31424–2010 не должно превышать 15% по массе для песков II класса. В анализируемом материале содержится 13% пылевидных фракций, что допустимо для бетонов низких классов по прочности на сжатие до В20, но недостаточно для применения в тяжелых бетонах классов В30–В40 и марки по морозостойкости F300. Доломитовый отсев

имеет модуль крупности выше, чем гранитный отсев, что позволяет получать заполнитель более разнообразного фракционного состава.

При выполнении экспериментальных исследований было установлено, что размеры пылевидных частиц отходов дробления горных пород составляют 10–200 мкм (рисунок 1).



Рисунок 1 – Показатели рассева отходов дробления гранитной породы

Figure 1 – Granite crushing waste dispersion indicators

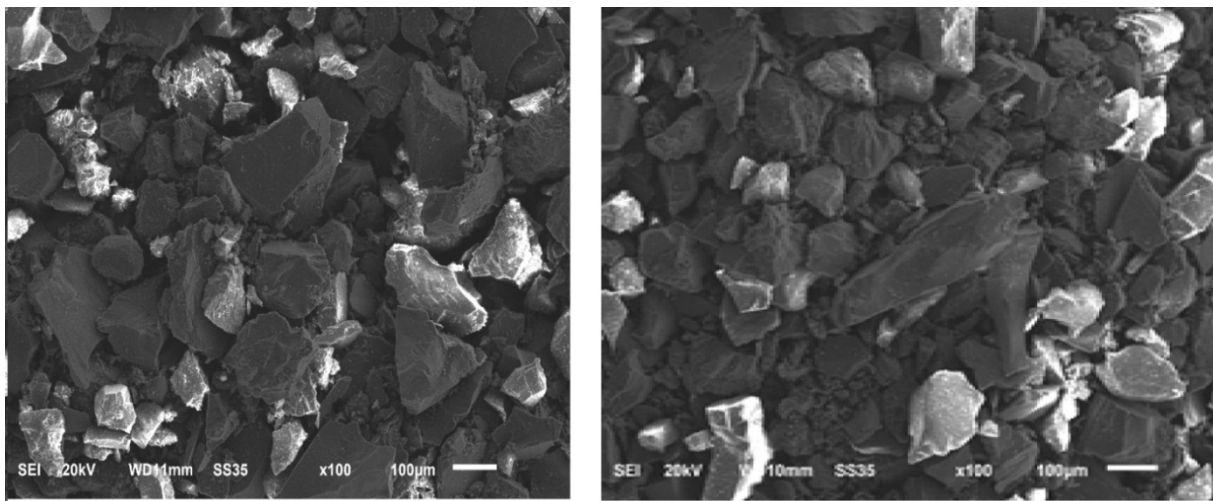


Рисунок 2 – Проба отхода дробления гранитной породы (увеличение в 100 раз)

Figure 2 - Granite fragmentation waste sample (100-fold increase)

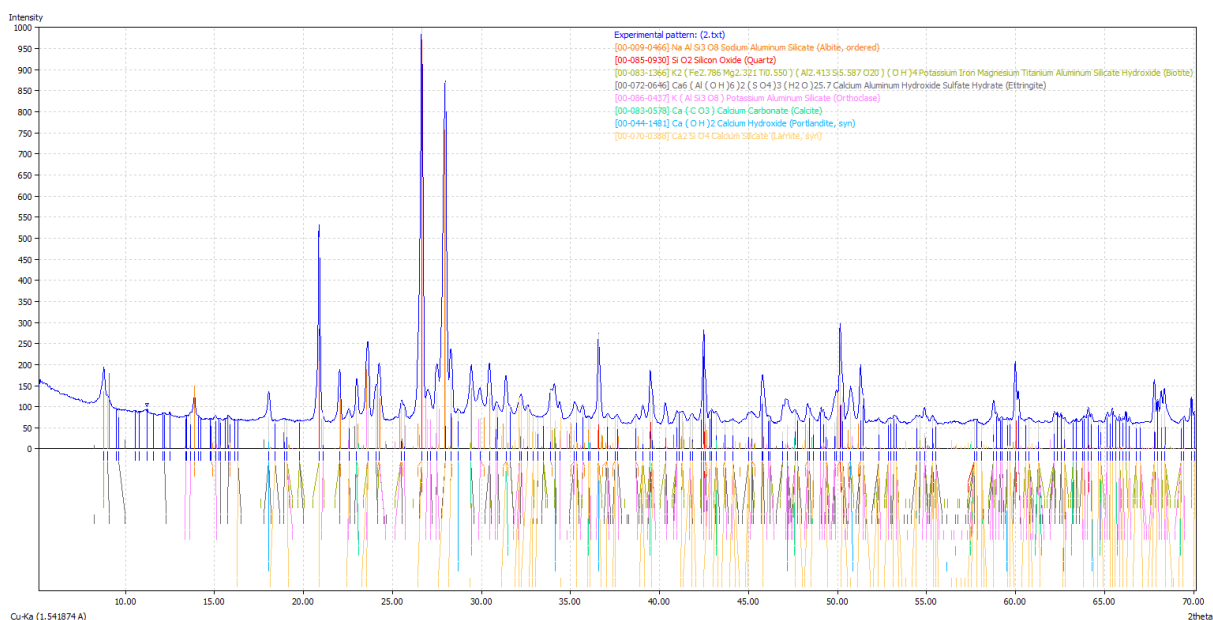


Рисунок 3 – Фазовый состав контактной зоны «цементный камень / гранитный отсев»

Figure 3 – Phase composition of the cement stone / granite cut contact zone

Как видно из результатов исследования структуры пылевидных частиц отходов дробления горных пород, выполненных электронным сканирующим микроскопом (при увеличении в 100 раз), исследуемые образцы имеют кубическую, плоскую, ромбическую форму (рисунок 2). Поверхность пылевидных фракций отходов дробления имеет микрорельефную структуру, что в дальнейшем будет способствовать лучшему сцеплению с вяжущим веществом и это позволит рассматривать ее в качестве минеральной добавки в тяжелые бетоны.

Изучение контактной зоны между отходом дробления горных пород пробы «гранит» и цементным камнем было проведено методом рентгенофазового анализа (рисунок 3).

Мелкодисперсная составляющая отходов дробления участвует в формировании структуры и свойств контактной зоны цементного камня и заполнителя – гранитного отсева. Мелкодисперсная составляющая за счет своей плоской и ромбической формы улучшает трещиностойкость контактной зоны.

Как известно, прочность и морозостойкость бетонов зависят от таких основных факторов, как вид и активность цемента, водоцементное соотношение, условия твердения, воз-

раст к моменту замораживания [15, 16, 17, 18, 19, 20].

В ходе дальнейших исследований были разработаны составы тяжелых цементных бетонов с применением технологических отходов дробления горных пород. Примерный состав опытных образцов для испытаний: вода – 170 кг/м³, цемент – 550 кг/м³, щебень – 1040 кг/м³, отход дробления горных пород – 750 кг/м³, в контрольном образце использовался природный песок. В составах 1-1, 1-2, 1-3 был применен гранитный отсев, в составах 2-1, 2-2, 2-3 использовался доломитовый отсев.

Для регулирования свойств бетонов применялись гиперпластификатор марки MC-PowerFlow 3100 и воздухововлекающая добавка Centrament Air. Соотношение добавок: MC-PowerFlow 3100 + CentramentAir 202 = (80 + 20) масс % от общей массы добавки. Количество добавок (MC-PowerFlow + CentramentAir 202) вводилось в бетонную смесь в количестве от 0,4 до 0,8% (от массы цемента).

Введение этих добавок способствует набору кинетики прочности бетона, и к 28 сут нормального твердения прочность находится в пределах 38,5-65 МПа (рисунки 4, 5).

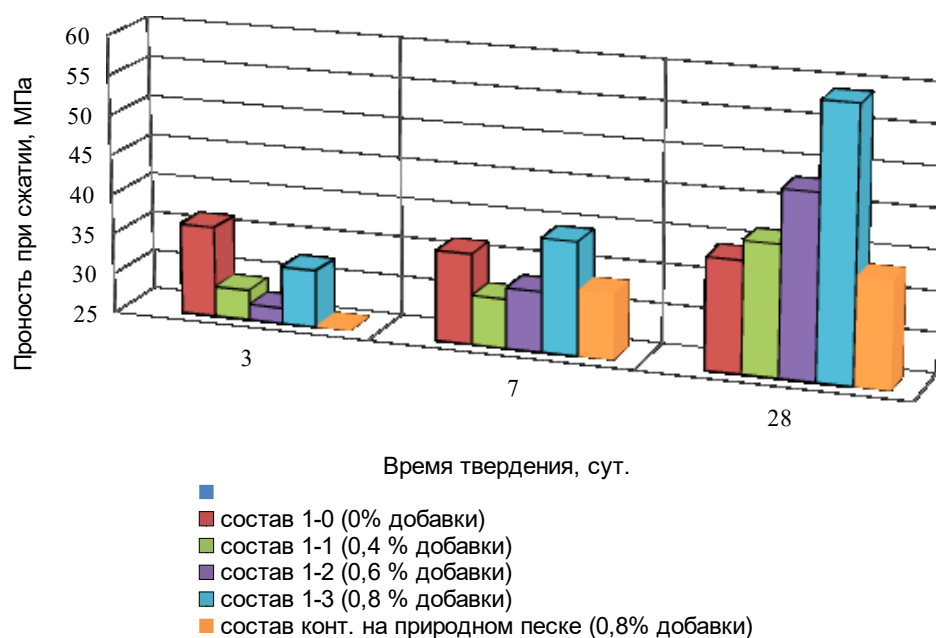


Рисунок 4 – Исследование прочности бетона при сжатии
(гранитный отсев + добавка MC-PowerFlow 3100 + Centrament Air)

Figure 4 – Concrete compression strength study (MC-PowerFlow 3100 Centrament Air Granite Cut Off Additive)

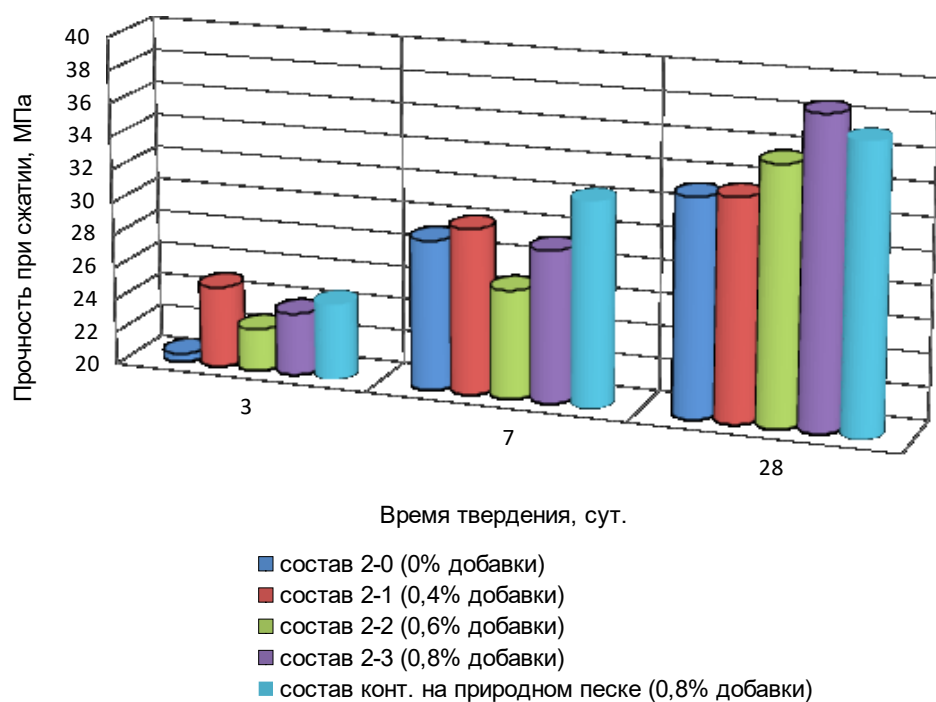
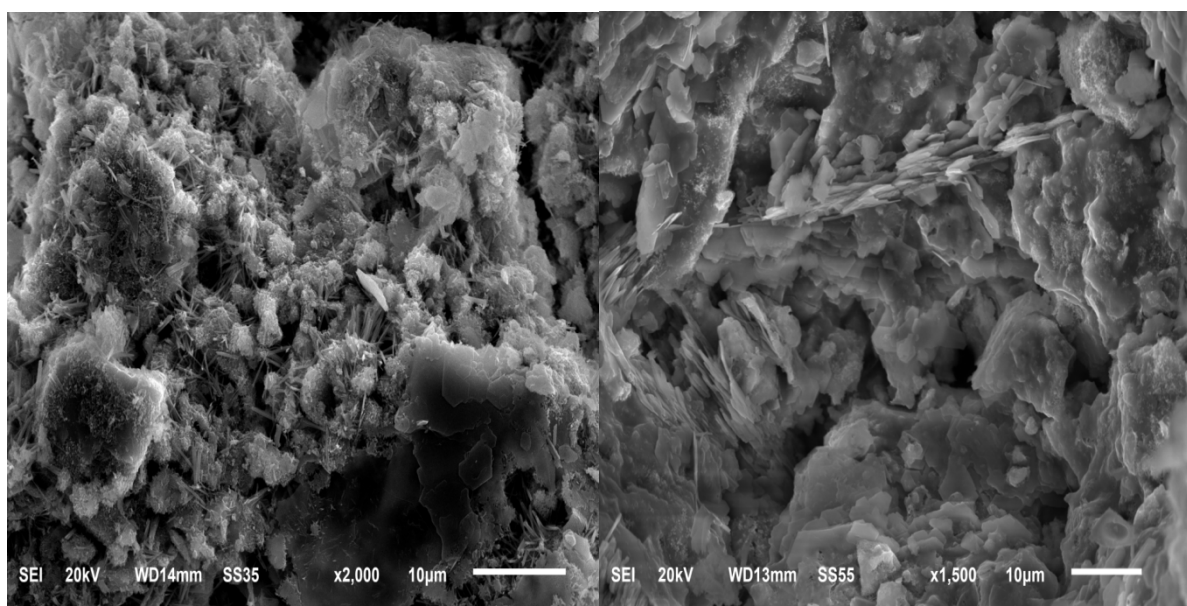


Рисунок 5 – Изменение прочности бетона при сжатии
(доломитовый отсев + добавка MC-PowerFlow 3100 + Centrament Air)

Figure 5 – Variation of concrete compression strength
(MC-PowerFlow 3100 Centrament Air dolomite cut-off)



а

б

Рисунок 6 – Структура цементного бетона (28 сут нормального твердения):
а – с использованием отходов дробления гранита (увеличение $\times 2000$);
б – с использованием природного песка (увеличение $\times 1500$)

Figure 6 – Cement concrete structure (28 suts of normal hardening):
a Using granite crushing residues (increase $\times 2000$); b using natural sand (increase $\times 1,500$)

Была изучена структура полученных образцов тяжелого цементного бетона с увеличением в 1500 и 2000 раз (рисунок 6). Было выявлено, что в возрасте 28 сут преобладает аморфная структура цементного вяжущего. Применение отходов дробления горных пород, особенно мелких фракций 10–200 мкм, дает более плотную упаковку частиц на поверхности, чем образцы на природном песке.

Полученные данные позволяют утверждать, что при введении в бетонную смесь гиперпластификатора и вследствие этого уменьшение количества связанной воды на поверхности заполнителя при смачивании и адсорбции, мелкодисперсная составляющая способна переходить в объем цементного теста, становясь микрозаполнителем бетонной смеси.

Для улучшения показателей морозостойкости и других технологических параметров бетона было выполнено комплексное использование пластификатора и воздухововлекающей добавки (80% MC-PowerFlow 3100 + 20% Centrament Air 202). Использование этих добавок позволило получить образцы с морозостойкостью F200-F300. Исследования на морозостойкость были проведены по

ГОСТ 10060–2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости» по второму ускоренному методу. Результаты экспериментальных исследований составов были приведены ранее в статье авторов [13].

Выпущена опытная партия железобетонных лотков Л 15-11/2 (серия 3.006.1-2.87.) в количестве 20 шт. (объем 20 м³) производства завода ЖБИ «Ротор» (п. Винзили, Тюменская обл.) с применением технологических отходов дробления по рецептурам и результатам проведенных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследованы свойства отходов дробления горных пород Режевского щебеночного завода и доломитовых отсеков Саткинского щебеночного завода и установлено, что мелкодисперсная составляющая способна переходить в объем цементного теста, становясь микрозаполнителем бетонной смеси.

2. Определено влияние гиперпластифицирующей добавки MC-PowerFlow 3100 и воздухововлекающей добавки CentramentAir 202 на свойства тяжелого цементного бетона, что позволило получить бетоны с марками по морозостойкости F200- F300.

3. Выполнено опытно-промышленное апробирование разработок составов тяжелых цементных бетонов с применением отходов дробления горных пород на предприятии Тюменского региона в п. Винзили на заводе ЖБИ «Ротор».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Отсевы дробления – эффективный способ повышения качества бетонов / Д.Д. Хамидуллина [и др.] // Строительные материалы. 2006. № 11. С. 50–51.
2. Леонович С.Н., Полейко Н.Л. Эксплуатационные характеристики бетона на заполнителе из осадочных горных пород // Строительные материалы. 2016. № 8. С. 66–69.
3. Использование отходов переработки горных пород при производстве нерудных строительных материалов / О.Е. Харо [и др.] // Строительные материалы. 2003. № 9. С. 18–19.
4. Применение рециклируемых материалов в дорожном строительстве США и Европы. БИНТИ. 2002. № 1. С. 16–18.
5. Левкова Н.С., Горностаева Т.А. Повышение эффективности комплексного использования сырья за счет отсевов дробления щебня из изверженных пород // Вестник БГТУ им. Шухова. 2003. № 5. С. 308–311.
6. Нгуен Вьет Кыонг, Чумаков Л.Д. Комплексное использование базальтовых заполнителей в бетоне // Вестник МГСУ. 2009. № 1. С. 164–167.
7. Крючкова И.В. Анализ нормативно-правовой базы по регулированию рынка вторичного сырья для строительства // Воронежский государственный архитектурно-строительный университет. 2006. 5 с.
8. Yoshio Kasai. Criteria for use of scrap as a concrete aggregate. / Cement and Concrete. 1981. № 9. Pp.182-188.
9. Malhotra, V.M. Fly Ash in Concrete / V.M. Malhotra, A.R. Ramezaniapour // 2nd Ed, CANMET, Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa. Canada. – 1994. – 307 p.
10. Yanagibashi K. A new recycling process for coarse aggregate to be used concrete structure. / K. Yanagibashi, T. Yonezawa, T. Iwashimizu, D. Tsuji, K.Arakawa, M. Yamada. Environmental-Conscious Materials and System for Sustainable Development. Proceedings of RILEM International Symposium. Tokyo. – 2004. – Pp.137-143.
11. Yasuhiro Dosho. Development of a Sustainable Waste Recycling System «Application of Recycled Aggregate Concrete Produced by Aggregate Replacing Method» // Journal of Advanced Concrete Technology. Japan Concrete Institute. Scientific paper. – 2007. – Vol. 5. - № 1. - Pp. 27-42.
12. Шатов А.Н. Способ получения качественных товарных бетонов с учетом специфики материальной базы УрФО // Технологии бетонов. 2017. № 1–2. С. 10–11.
13. Leming M.L. Comparison of mechanical properties of high-strength concrete made with different raw materials. / Transportation Research Record. - 1990. - № 1284. - Pp.23-30.
14. Ахтямов В.Ф., Хафизова Э.Н. Влияние отходов нерудного производства на свойства тяжелых бетонов // Вестник СибАДИ. 2018. № 2 (60). С. 261–268.
15. Khafizova E.N. Heavy weight concretes based on technological non-metallic production wastes / E.N. Khafizova, K.A. Ibatulina, V.F. Akhatyamov / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 463 (2018) 032042 doi:10.1088/1757-899X/463/3/032042.
16. Хафизова Э.Н., Ахмятов В.Ф. Исследование влияния техногенных отходов нерудного производства на свойства бетонов // Вестник ТГАСУ. 2017. № 4. С.107–116.
17. Мелкодисперсная составляющая отсевов горных пород в тяжелых цементных бетонах / Э.Н. Хафизова [и др.] // Инновации и инвестиции. 2019. № 9. С. 261–266.
18. Лотов В.А. Приготовление бетонных смесей при производстве высокопрочных бетонов / В.А. Лотов, О.Г. Тарбеев, В.А. Кутугин // Сб. докладов 3-го (XI) Международного совещания по химии и технологии цемента. Санкт-Петербург: АЛИТинформ. 2009. 141 с.
19. Федосов С.В., Акулова М.В., Падохин В.А. Мелкозернистый бетон на механомагнитоактивированной воде с добавкой суперпластификатора // Вестник МГСУ. 2012. № 5. С. 120–127.
20. Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Полянских И.С. Бетон повышенной долговечности при производстве опор линий электропередач // Строительные материалы. 2014. № 5. С. 1–3.
21. Леонович С.Н., Полейко Н.Л. Эксплуатационные характеристики бетона на заполнителе из осадочных горных пород // Строительные материалы. 2016. № 8. С. 66–69.
22. Бетонные композиты с использованием гравийно-песчаных смесей месторождений Чеченской Республики / А.Х. Аласханов [и др.] // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019. Т. 46, № 2. С. 136–147.
23. Муртазаев С-А. Ю., Саламанова М.Ш. Перспективы использования термоактивированного сырья алюмосиликатной природы // Приволжский научный журнал. 2018. № 2 (46). С. 65–70.
24. Естемесов. З.А. Строительные отходы – неисчерпаемый источник богатства для строителей / З.А. Естемесов [и др.] // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2020. Том XVI, № 4 (22). С. 57–63.
25. Bataev D. K-S., Murtazayev S-A. Yu., Salamanova M.Sh., Viskhanov S.S. Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders (Использование цементной пыли в производстве бесклнкерных вяжущих щелочной активации) // Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1. P. 457460.

REFERENCES

1. Hamidullina D.D., Garkavi M.S., Jakubov V.I., Rodin A.S., Kushka V.N. Otsevy drobleniya - jeffektivnyj sposob povysheniya kachestva betonov. [Stone screening dust are the effective way to improve the quality of concretes]. *Stroitel'nye materialy*. 2006. 11: 50-51. (in Russian)
2. Kharo O.E., Levkova N.S., Lopatnikov M.I., Gornostaeva T.A. Ispol'zovanie otkhodov pererabotki gornyx porod pri proizvodstve nerudnykh stroitel'nykh materialov. [Use of recycling rock wastes in the manufacture of non-metallic building materials]. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2003. 9: 18-19. (in Russian)
3. Primenenie retsikliruemykh materialov v dorozhnom stroitel'stve SShA i Evropy. [Application of recyclable materials in road construction in Europe and the United States]. *BINTI*. 2002. 1: 16-18. .
4. Levkova N.S., Gornostayeva T.A. Povyshenie jeffektivnosti kompleksnogo ispol'zovaniya syr'ya za schet otsevoy drobleniya shhebnja iz izverzhennykh porod. [Increase of complex use efficiency of raw materials due to screenings of crushed stone from igneous rocks]. *Bulletin of BSTU named after Shukhov*. 2003. 5: 308-311. (rus).
5. Nguyen Viet Kyong, Chumakov L.D. Kompleksnoe ispol'zovanie bazalt'ovykh zapolnitelej v betone. [Complex use of basalt aggregates in concrete]. Scientific and technical journal "Vestnik MSSU", 2009. 1: 164-167. (rus).
6. Kryuchkova I.V. Analiz normativno-pravovoj bazy po regulirovaniyu rynka vtorichnogo syr'ya dlja stroitel'stva. [Analysis of the regulatory and legal framework for regulating the market of secondary raw materials for construction]. *Voronezh State Architectural and Construction University*. 2006. 5. (in Russian)
7. Yoshio Kasai. Criteria for use of scrap as a concrete aggregate. *Cement and Concrete*. 1981. 9:182-188.
8. Malhotra V.M., Ramezaniapour A.R. Fly Ash in Concrete. 2nd Ed, CANMET, Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa. Canada, 1994, 307 p.
9. Yanagibashi K., Yonezawa T., Iwashimizu T., Tsuji D., Arakawa K., Yamada M. A new recycling process for coarse aggregate to be used concrete structure. *Environmental-Conscious Materials and System for Sustainable Development. Proceedings of RILEM International Symposium*. Tokyo. 2004: 137-143.
10. Yasuhiro Dosho. Development of a Sustainable Waste Recycling System "Application of Recycled Aggregate Concrete Produced by Aggregate Replacing Method". *Journal of Advanced Concrete Technology. Japan Concrete Institute. Scientific paper*. 2007. 5(1): 27-42.
11. Shatov A.N. Sposob polucheniya kachestvennykh tovarnykh betonov s uchedom spetsifiki material'noi bazy UrFO. [Method for obtaining high-quality commercial concretes taking into account the specificity of the material base of the Urals Federal District]. *Tekhnologii betonov [Concrete Technologies]*. 2017. 1-2: 10-11 (in Russian)
12. Leming M.L. Comparison of mechanical properties of high-strength concrete made with different raw materials. *Transportation Research Record*. 1990. 1284: 23-30.
13. Akhtyamov V.F., Khafizova E.N. Vliyanie otkhodov nerudnogo proizvodstva na svoystva tjazhelyh betonov [Influence of technological non-metallic production wastes on heavy weight concrete properties]. May 2018. The Russian Automobile and Highway Industry Journal 15(2):261-268 DOI:10.26518/2071-7296-2018-2-261-268
14. Khafizova E.N. Heavy weight concretes based on technological non-metallic production wastes / E.N. Khafizova, K.A. Ibatulina, V.F. Akhtyamov / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 463 (2018) 032042 doi:10.1088/1757-899X/463/3/032042.
15. Khafizova E.N., Akhtyamov V.F. Issledovanie vlijanija tehnogennykh otkhodov nerudnogo proizvodstva na svoystva betonov. [Study of technological wastes influence of non-metallic production on concrete properties]. *Vestnik of TSUAB*. 2017. 4: 107-116 (in Russian)
16. Khafizova E.N., Akhtyamov V.F., Panchenko I.F., Panchenko D.A. Melkodispersnaja sostavljajushaja otsevoy gornyx porod v tjazhelyh cementnyh betonah. [Micro-fine component of stone screening dust in heavy weight cement concrete]. *Innovacii i investicii*. 2019. 9: 261-266.
17. Lotov V.A., Tarbeev O.G., Kutugin V.A. Prigotovlenie betonnykh smesej pri proizvodstve vysokoprochnykh betonov. [Preparation of concrete mixtures for the production of high-strength concrete] *Reports of the 3rd (XI) International Meeting on Chemistry and Cement Technology*. St. Petersburg: ALITinform, 2009: 141 (in Russian)
18. Fedosov S.V., Akulova M.V., Slizneva T.E., Padokhin V.A. Melkozernistyj beton na mehanomagnitoaktivirovannoju vode s dobavkoj superplastifikatora. [Fine-grained concrete on mechano-magneto-activated water with the addition of a superplasticizer]. *Bulletin of MGSU*. 2012. 5: 120-127 (in Russian)
19. Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Polyansky I.S. M.M. Beton povyshennoj dolgovechnosti pri proizvodstve opor linij jelektroperedach. [Concrete of increased durability in the production of power transmission towers]. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*. 2014. 5: 1-3 (in Russian)
20. Berdichevsky G.I., Vasiliev A.P., Malinina L.A. Proizvodstvo sbornyx zhelezobetonnykh izdelij. [Manufacture of precast concrete units]. Reference guide: Stroizdat. 1989. 447 p. (rus).
21. Leonovich S.N., Polejko N.L. Jekspluatacionnye harakteristiki betona na zapolnitele iz osadochnykh gornyx porod [Performance characteristics of concrete on aggregate from sedimentary rocks]. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*. 2016. 8: 66-69 (in Russian).
22. Alaskanov, A. Kh., Murtazaev, S.A. Yu., Saidumov, M. S. and Khubaev, M.S. M. [et al.] (2019) 'Betonne kompozity s ispol'zovaniem graviino-peschanykh smesei mestorozhdenii Chechenskoj Respubliki' [Concrete composites using gravel-sand mixtures from the deposits of the Chechen Republic]. Bulletin of the

Dagestan State Technical University. Technical sciences. 46. 2: 136147.

23. Murtazaev, S.A. Yu. and Salamanova, M. Sh. (2018) 'Perspektivy ispol'zovaniya termoaktivirovannogo syr'ya alyumosilikatnoi prirody'. Privolzhskii nauchnyi zhurnal. [Prospects for the use of thermally activated raw materials of aluminosilicate nature. Volga Scientific Journal]. 2 (46): 6570.

24. Estemesov Z.A., Sultanbekov T.K., Sarsenbaev N.B., Sauganova G.R. Stroitel'nye othody – neischerpaemyi istochnik bogatstva dlja stroitelej. [Construction waste – an inexhaustible source of wealth for builders]. Herald of GSTOU. Engineering sciences. V XVI. 2020. 4 (22): 57-63.

25. Bataev, D. K-S., Murtazayev, S-A. Yu., Salamanova, M. Sh. and Viskhanov, S. S. (2019) 'Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders'. Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. 1: 457460.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Хафизова Э.Н. Постановка цели и задачи исследования, анализ результатов исследования, редактирование статьи.

Панченко Ю.Ф. Проведение экспериментальных исследований, обработка результатов экспериментов.

Панченко Д.А. Проведение экспериментальных исследований, оформление статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Elza N. Khafizova. Statement of the goal and objectives of the research, analysis of results, editing of the article.

Iuliia F. Panchenko. Experimental research, calculation of results.

Dmitrii A. Panchenko. Experimental research, paper work.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хафизова Эльза Назифовна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные материалы», Scopus Author ID - SC 57205439303.

Панченко Юлия Федоровна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные материалы», Scopus Author ID – SC 57200297111.

Панченко Дмитрий Алексеевич – старший преподаватель кафедры «Строительные материалы», Scopus Author ID – SC 57200293773.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Elza N. Khafizova, Cand. of Sci., Associate Professor, Scopus Author ID - SC 57205439303.

Iuliia F. Panchenko, Cand. of Sci., Associate Professor, Scopus Author ID – SC 57200297111.

Dmitrii A. Panchenko, Senior Lecturer, Scopus Author ID – SC 57200293773.

Научная статья
 УДК 625.7.8, 624.132, 624.138
 DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-800-810>

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ГЛИНИСТОГО ГРУНТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА СОСРЕДОТОЧЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ИЗВЕСТИ

Е.Н. Алькаев, А.А. Лунёв, В.В. Голубенко

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

alkaev.en@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9344-0643>,
lunev.al.al@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5857-1891>,
v-golubenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3973-6122>

АННОТАЦИЯ

Введение. Обилие в Сибирском федеральном округе источников глинистых грунтов с влажностью выше оптимальной существенно усложняет технологию производства работ, снижает скорость работы, а также делает некоторые резервы непригодными для использования. Для решения этих проблем была рассмотрена возможность использования негашёной извести для подготовки к разработке карьеров с глинистыми грунтами с влажностью выше оптимальной.

Были проведены экспериментальные исследования по изучению динамики осушения грунта (суглинка легкого пылеватого) в результате бурения скважины, которая заполнялась негашёной известью (метод сосредоточенного воздействия извести). В ходе данного исследования выполнено три эксперимента над массивами грунта с различной начальной влажностью, два из которых проводились при воздействии извести и один (контрольный) без её воздействия.

Дополнительно была проведена оценка изменения оптимальной влажности и максимальной плотности сухого грунта при введении извести в суглинистый грунт (дозировка от 2 до 6% по массе). На основе полученных результатов и анализа литературных источников обоснованы рациональные расстояния между прорезями (скважинами) при использовании технологии сосредоточенного воздействия извести для осушения грунтов с повышенной влажностью в карьерах.

Обсуждение и заключение. На основании полученных в ходе исследования результатов, можно сделать вывод, что осушение грунта известью предложенным методом сосредоточенного воздействия оказывает положительный эффект на физико-механические показатели грунта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, автомобильные дороги, техническая мелиорация, стабилизация грунтов, подготовка карьеров, глинистые грунты, известь

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

Статья поступила в редакцию 05.10.2021; одобрена после рецензирования 10.2021; принята к публикации 14.12.2021.

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: Алькаев Е.Н., Лунёв А.А. Голубенко В.В. Изучение свойств глинистого грунта при использовании метода сосредоточенного воздействия извести // Вестник СибАДИ. 2021. Т.18, № 6(82). С. 800-810. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-800-810>

© Алькаев Е.Н., Лунёв А.А., Голубенко В.В., 2021



Контент доступен под лицензией
 Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-800-810>

STUDY OF CLAY SOIL PROPERTIES WHEN USING THE METHOD OF CONCENTRATED LIME EXPOSURE

Evgeniy N. Alkaev, Alexander A. Lunev, Vladimir V. Golubenko

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),

Omsk, Russian Federation

alkaev.en@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9344-0643>

lunev.al.al@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5857-1891>

v-golubenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3973-6122>

ABSTRACT

Introduction. In the Siberian Federal Area, the abundance of clay soils sources with above-optimal moisture content significantly complicates the technology of operations, reduces the speed of work, and makes some reserves unusable. To solve these problems, the use of quicklime in preparation for quarrying of clay soils with above-optimal moisture content was considered.

The experimental studies have been carried out on the dynamics of soil drainage (lightweight dust loam) from drilling a well filled with lightweight lime (concentrated lime method). During this study, three experiments were carried out on soil masses with different initial humidity, two of which were carried out under the influence of lime and one (control) without the effect thereof.

In addition, the change in optimum humidity and maximum density of dry soil during lime injection into loamy soil (dosage from 2% to 6% by mass) was evaluated. On the basis of the results obtained and the analysis of literature sources rational distances between slots (wells) are justified when using concentrated lime action technology to drain soils with increased humidity in quarries.

Negotiations and conclusions. On the basis of the results obtained in the course of the study, it can be concluded that drying the soil with lime by the proposed concentrated method has a positive effect on the physical and mechanical characteristics of the soil.

KEYWORDS: construction, roads, technical reclamation, soil stabilisation, quarry preparation, clay soils, lime.

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors would like to thank the editors of the Russian Automobile and Highway Industry Journal and the reviewers of the article.

The article was submitted 05.10.2021; approved after reviewing 07.10.2021; accepted for publication 14.12.2021.

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: E. N. Alkaev, A. A. Lunev, Golubenko V.V. Study of clay soil properties when using the method of concentrated lime exposure. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2021; 18 (6): 800-810. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-800-810>

© Alkaev E.N., Lunev A.A., Golubenko V.V., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современной рыночной экономики часто под карьеры отводят наименее ценные территории. Данные резервы сложены глинистыми грунтами, имеющими влажность выше допустимой. При попытках использования в земляном полотне таких глинистых грунтов возникают проблемы уплотнения, а деформативность земляного полотна может увеличиваться в 3–4 раза [1, 2, 3, 4].

В подобной ситуации требуется применять методы технической мелиорации грунтов (например методы стабилизации) [5] для доведения переувлажненных грунтов до кондиционного состояния. Однако традиционные методы мелиорации в основном требуют предварительной разработки грунта и проведение дальнейших мероприятий по его осушению. При разработке такого грунта отмечается повышенное налипание на рабочие органы, что снижает производительность, кроме того, наличие влаги понижает прочностные параметры грунта, что может вести к оползанию забоя. По результатам работы [6] можно сделать вывод, что при увеличении водонасыщения угол внутреннего трения и удельное сцепления грунта уменьшаются, а при увеличении плотности угол внутреннего трения и удельное сцепления грунта увеличиваются.

Каждый из традиционных методов снижения влажности имеет и дополнительные недостатки. Так, низкая несущая способность вместе с повышенной липкостью затрудняют использование методов радиационного осушения, особенно в регионах с высоким количеством осадков.

При использовании химических способов мелиорации помимо разработки требуется перемешивание химической добавки и массива грунта с более допустимой влажностью, что весьма осложняется налипанием глинистого грунта и невозможностью измельчения грунта, необходимого для равномерного перемешивания. Россыпь реагентов по поверхности грунта не дает ощутимого результата, поскольку образование корки сухого грунта, атмосферные осадки и ветер негативно сказываются на качестве работ. Также ветром могут уноситься пылевидные частицы реагентов, что способствует загрязнению территорий и может влиять на здоровье персонала [11].

При введении гранулометрических добавок к проблеме налипания и невозможности измельчения грунта добавляется проблема неоднородности механических свойств полученного материала. Изменение прочностных и деформационных параметров грунта, связанное со сложностью равномерного перемешивания глинистого грунта с добавкой, необходимо учитывать на этапе проектирования сооружения. Что, как правило, приводит к удорожанию получаемого материала и снижению его прочностных показателей.

Одним из нетрадиционных, но перспективных способов технической мелиорации грунтов является электрохимическая обработка, основанная на воздействии на грунт электромагнитного поля [5, 7]. Этот способ заключается в пропускании через влажный грунт постоянного электрического тока, который подается в массив посредством погружения в него металлических электродов. При этом полярные молекулы воды устремляются к отрицательно заряженному перфорированному электроду-катоде, из которого вода удаляется. Однако использование этого метода требует наличия высококвалифицированных специалистов, сложного оборудования и высокой культуры производства работ.

Также возможно комплексное воздействие, например, введение химических реагентов с помощью электромагнитного поля [8, 9, 10].

По причине наличия недостатков существующих методов осушения грунтов в карьерах был предложен новый, комбинирующий особенности некоторых других, метод сосредоточенного воздействия негашёной извести. Сосредоточенное воздействие подразумевает устройство вертикальных скважин или прорезей определенных размеров в грунте и заполнение их размельченной негашёной известью с трамбованием. Осушение глинистого грунта с повышенной влажностью достигается за счет химической реакции (экзотермической) негашёной извести с водой.

Кроме осушения, введение извести способствует укреплению связных грунтов и приводит к следующим коренным преобразованиям их физико-механических свойств [11]:

- снижение пластичности^{1, 2};
- увеличение значений допустимой влажности и снижение максимальной плотности сухого грунта^{1, 2};

¹. Могилевич В.М., Щербаков Р.П., Тюменцева О.В. Дорожные одежды из цементогрунта. М.: Транспорт, 1973. 216 с.

². Левчановский Г.Н., Марков Л.А., Попандопуло Г.А. Укрепление грунтов известью в дорожном и аэродромном строительстве. М.: Транспорт, 1977. 149 с.

Таблица 1
Физико-механические свойства грунта

Table 1
Physical and mechanical properties of the soil

Наименование показателя	Фактические данные	Ед. изм.
1. Влажность на границе текучести	31,8	%
2. Влажность на границе раскатывания	18,8	%
3. Число пластичности	13	-
4. Оптимальная влажность	18,1	%
5. Максимальная плотность скелета грунта	1,71	г/см ³
6. Плотность частиц грунта	2,72	г/см ³
6. Содержание песчаных частиц (2–0,05 мм)	4,5	%
7. Ph водной вытяжки	9,13	
8. Емкость катионного обмена	7,7	г _{экв} /100 гр
9. Потери при прокаливании	7,62	%

- улучшение обрабатываемости и уплотняемости глинистых грунтов;
- практически ликвидирует усадку и набухание^{1,2};
- значительно увеличиваются прочностные характеристики глинистых грунтов^{1,2};
- увеличение водоустойчивости^{1,2}.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Суглинок легкий пылеватый

Для испытаний в карьере первого кирпичного завода (г. Омск), расположенного по GPS координатам 55.034498, 73.516907, были отобраны пробы суглинка легкого пылеватого, который является весьма распространённым видом грунтов в регионе. Перед проведением испытаний были определены его физико-механические показатели, которые приведены в таблице 1.

Молотая негашёная известь

Для опыта была использована молотая негашёная известь третьего сорта. По условиям твердения – воздушная, по содержанию оксидов кальция и оксидов магния – кальциевая. Содержание оксида кальция составило 73%, а оксида магния – 4%. По времени гашения данная известь относится к среднегасящейся.

Также для создания более однородной массы из извести удалялись крупные частицы методом просеивания через сито с ячейками 1 мм.

Исследование динамики осушения грунта при сосредоточенном воздействии извести

Подготовка образцов для исследования динамики осушения

В целях изучения динамики осушения грунта был изготовлен лоток из водостойкой древесной плиты размером 0,5х0,5х1,1 м, на внутреннюю часть которого был нанесен слой гидроизоляции для увеличения водостойкости и герметичности.

До уплотнения грунта в лоток устанавливалась пластиковая труба диаметром 0,06 м для создания полости, облегчающей заполнение ее негашёной известью после её извлечения. Далее грунт послойно загружался в лоток и увлажнялся до начальной влажности (опыт № 1 – 38,1%, опыт № 2 – 29,6%, опыт № 3 – 26,1%). Из-за неравномерности распределения влаги по толще грунта он выдерживался сутки в закрытом пленкой лотке перед началом опыта.

При подготовке образца была осуществлена попытка добиться естественной плотности грунта трамбованием. Однако вследствие переувлажнения любые попытки механического воздействия не позволяли добиться даже минимального коэффициента уплотнения $K_u=0,90$ (происходило выдавливание грунта из-под трамбующих устройств).

По тем же принципам загружался лоток для второго опыта с другой начальной влажностью, после чего выполнялся третий опыт (контрольный) для оценки динамики естественного осушения грунта в лотке без воздействия извести.

Для оценки результатов уплотнения отбирались пробы методом режущего кольца, результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2
Результаты определения коэффициента уплотнения

Table 2
Results of the compaction factor determination

Расстояние от скважины с известью, м	$W_{\text{факт}}, \%$	$W_{\text{опт}}, \%$	$\rho_{\text{макс}}, \text{г/см}^3$	$\rho_{\text{вл}}, \text{г/см}^3$	$\rho_{\text{ск}}, \text{г/см}^3$	$K_{\text{упл.факт.}}$
Опыт №1						
0,15	37,98	18,10	1,71	1,82	1,32	0,77
0,45	38,15	18,10	1,71	1,78	1,29	0,75
0,65	38,21	18,10	1,71	1,78	1,29	0,75
0,90	38,41	18,10	1,71	1,81	1,31	0,76
Опыт №2						
0,15	25,93	18,10	1,71	1,98	1,57	0,92
0,45	25,39	18,10	1,71	1,95	1,56	0,91
0,65	25,55	18,10	1,71	1,94	1,54	0,90
0,90	25,47	18,10	1,71	1,94	1,54	0,90
Опыт №3						
0,15	29,98	18,10	1,71	1,95	1,50	0,88
0,45	30,17	18,10	1,71	1,94	1,49	0,87
0,65	29,63	18,10	1,71	1,95	1,50	0,88
0,90	29,04	18,10	1,71	1,93	1,50	0,87

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

После уплотнения в полость от трубки засыпалась молотая негашёная известь в количестве 1,13 кг. Уплотнив ее, аккуратно из грунта удалялась пластиковая трубка и излишки извести. Лоток накрывался полиэтиленовой пленкой и закрывался крышкой.

Через определенное время (2–7 дней) в четырех точках лотка на расстоянии 0,15, 0,40, 0,65 и 0,90 м от скважины с известью с помощью бура отбирались по три пробы по толщине грунта для определения влажности методом высушивания до постоянной массы. Фотография с местами отбора проб представлена на рисунке 1.



а



б

Рисунок 1 – Отбор проб на влажность:
а – расположение точек отбора проб в лотке; б – отбор проб с помощью бура

Figure 1 – Moisture sampling: a – location of sampling points in the tray; b – drill sampling

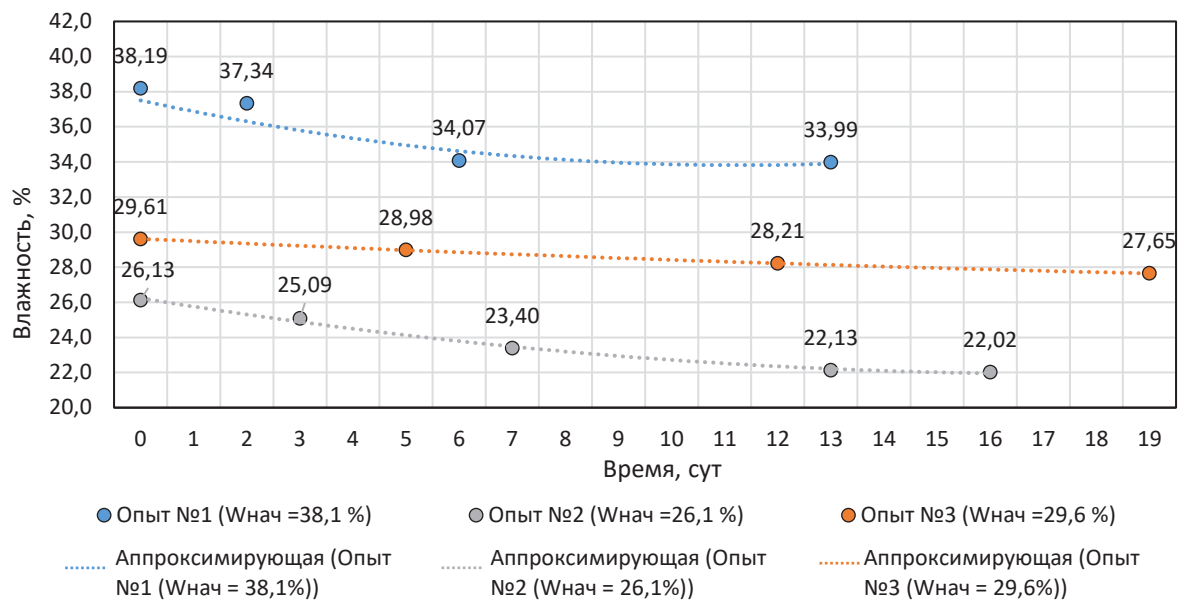


Рисунок 2 – Динамика осушения массива суглинка в ходе экспериментальных исследований

Figure 2 – Drying dynamics of the loam in experimental studies

Изучение изменения оптимальной влажности и максимальной плотности сухого грунта

Также исследовались изменения оптимальной влажности и максимальной плотности сухого грунта с различным содержанием извести и без её добавления.

Высушенный и измельченный грунт перемешивался с различной дозировкой гидратированной извести (известь добавлялась в количестве 2%, 4% и 6% от массы сухого грунта). После равномерного распределения извести по массе грунта добавлялась вода, начиная с 14% от массы сухого грунта и далее с шагом 2%. После чего с использованием метода стандартного уплотнения определялись оптимальная влажность и максимальная плотности сухого грунта. Результаты представлены на рисунке 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты исследования динамики осушения грунта при сосредоточенном воздействии извести

Опыт № 1 – осушение суглинка негашёной известью ($W_{нач} = 38,1\%$)

В первом опыте переувлажненный грунт с влажностью 38,1% ($K_{увл} = 2,10$) был уплотнен до коэффициента уплотнения 0,78. В ходе опыта на 2-е, 6-е, 13-е сут отбирались пробы

для определения влажности. Динамика осушения показана на рисунке 2.

Анализируя график, видно что изменение влажности стабилизировалось за 6 сут, при этом влажность снизилась на 4,1%.

Опыт № 2 – осушение суглинка негашёной известью ($W_{нач} = 26,1\%$)

Во втором опыте переувлажненный грунт с влажностью 26,1% ($K_{увл} = 1,44$) был уплотнен до коэффициента уплотнения 0,93. В ходе опыта на 3-и, 7-е, 14-е сут отбирались пробы для определения влажности. Динамика осушения показана на рисунке 2.

По графику видно, что влажность на всем протяжении времени уменьшалась равномерно и за 14 сут уменьшилась на 4,1%. После чего так же, как и в опыте она стабилизировалась.

Опыт № 3 – естественное осушение суглинка ($W_{нач} = 29,6\%$)

В третьем опыте переувлажненный грунт с влажностью 29,6% ($K_{увл} = 1,64$) был уплотнен до коэффициента уплотнения 0,90. В данном опыте известь не добавлялась, а грунт осушался за счет естественного испарения влаги. В ходе опыта на 5-е, 12-е, 19-е сут отбирались пробы для определения влажности. Динамика осушения показана на рисунке 2.

По графику видно, что влажность за 5 сут уменьшилась на 0,63%, а за 19 сут – всего на 1,96%.

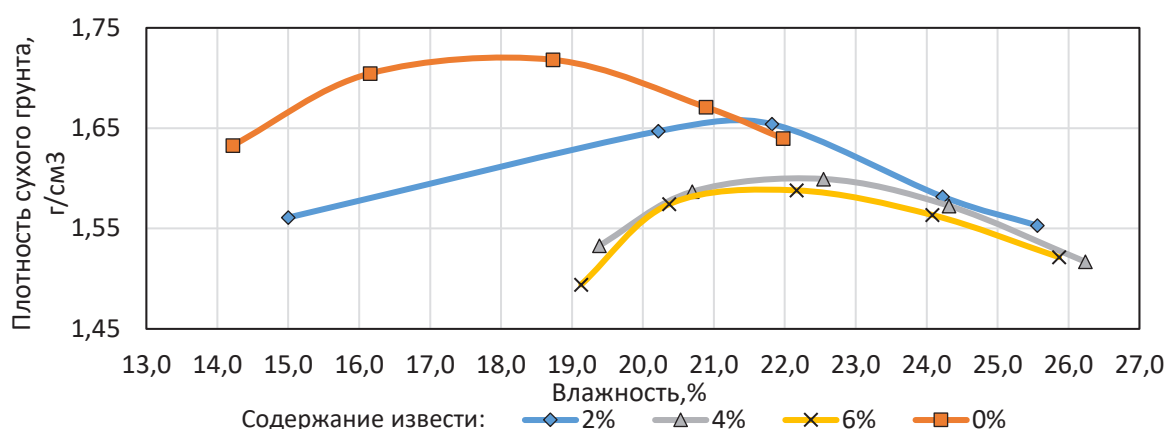


Рисунок 3 – Изменение значений плотности сухого грунта и оптимальной влажности в зависимости от дозировок извести

Figure 3 – Changes in dry soil density and optimal humidity according to lime doses

Динамика осушения во всех опытах дает возможность понять, что одинаковое (0,5% от массы грунта) количество извести снижает влажность приблизительно на 4%, при этом в зависимости от влажности и плотности меняются сроки, в течение которых происходит осушение (в процессе гидратации извести). Также на скорость осушения грунта, вероятно, оказывает влияние коэффициент уплотнения грунта [18, 19].

По результатам опыта № 3 можно сделать вывод, что грунт в данных экспериментах осушается ещё за счет естественных условий. Влажность грунта за 12 сут уменьшилась на 1,4%.

Проанализировав результаты осушения, можно сделать вывод о возможности осушения грунта методом сосредоточенного воздействия извести. Но устройство вертикальных скважин не позволяет рациональное размещение достаточного количества извести, кроме этого осушение грунта происходит недостаточно интенсивно.

Исследование изменения значений плотности сухого грунта и оптимальной влажности в зависимости от дозировок извести

По результатам (рисунок 3), полученным с помощью прибора стандартного уплотнения, видно, что введение гашеной извести способствует увеличению оптимальной влажности и снижению максимальной плотности сухого грунта, что подтверждает результаты исследований, описанных в [12, 13, 14, 16, 17].

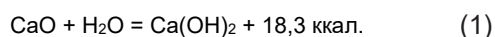
Оптимальная влажность увеличилась с 18,1% (для грунта без добавок) до 22,3% (для грунта с добавлением 4% извести). При этом максимальная плотность сухого грунта снизилась с 1,71 (для грунта без добавок) до 1,58 г/см³ (для грунта с добавлением 4% извести). Также по графикам уплотнения грунта оптимальная влажность равна 22,3 и 21,8% для дозировок извести 4 и 6% соответственно, можно сделать вывод, что существует оптимальная дозировка извести, позволяющая максимально увеличить оптимальную влажность [21, 22].

Введение извести в глинистые грунты приводит к увеличению значений оптимальной влажности и снижению максимальной плотности сухого грунта, тем самым изменяя границы допустимой влажности, смещая эту границу в сторону больших значений. Следовательно, грунт необходимо осушать на меньшую величину.

Причина этого явления заключается в изменении структуры грунта, так как в результате реакций между грунтом и известью изменяются связи в полученном материале. Образуются кристаллизационные и коагуляционные связи между частицами [13]. Новая образованная структура укрепленного грунта имеет большее количество порового пространства, значит снижается и плотность сухого материала, поэтому для ее уплотнения требуется большее количество воды, а следовательно, и увеличивается влажность. При этом стоит учитывать, что вводимая известь имеет меньшую плотность по отношению к грунту, что тоже влияет на плотность сухого материала.

Вывод зависимости для определения дозировки извести, необходимой для изменения влажности грунта.

Как было описано ранее, негашёная известь вводится в грунт посредством нарезанных вертикальных траншей (скважин) заданной глубины и ширины (диаметра). Г.Н. Левчановский в своих работах описывал реакцию гашения молотой негашёной извести, протекающей с выделением тепла, которое в значительной мере поглощается водой с повышением температуры смеси [10]. Реакция протекает по формуле



В предлагаемой нами технологии известь начинает реагировать с водой, находящейся в грунте, таким образом уменьшая влажность тонкого слоя грунта, находящегося вдоль устраиваемой прорези. Далее за счет реакции влагопереноса из полости грунта вода начинает перемещаться в сторону наименьшей влажности, а именно в сторону грунтов, влажность которых уменьшилась за счет реакции гашения извести.

Так как повышение температуры за счет выделения тепла при гашении извести будет способствовать повышению подвижности частиц воды и ускорению протекания различных реакций, грунт дополнительно будет осушаться за счет повышения испарения влаги. Но повышение температуры в данном случае имеет недостаток, а именно: миграция влаги происходит в точку с более низкими температурами, это подтверждают исследования [22], следовательно, данный негативный фактор будет отрицательно влиять на процесс переноса воды из массива грунта к заполненным известью прорезям.

Также свободная и часть капиллярной воды будут мигрировать к прорезям с известью за счет разности гидравлических напоров. Так как вертикальные прорези работают по принципу дренажа, созданный гидростатический напор будет способствовать миграции воды в места введения негашёной извести.

Кроме процессов, вызванных устройством прорезей и введением извести, осушение массива грунта будет происходить и за счет процессов естественного просыхания грунта посредством солнечного теплового излучения и ветра.

Таким образом, грунт будет осушаться за счет реакции гашения извести, испарения, связанного с выделением тепла при реакции гашения и за счет естественного осушения. А

влагоперенос будет обеспечен за счет разности гидравлических напоров, сконцентрированного сухого места и отрицательно будет влиять на повышение температуры в месте гашения извести.

Часть влаги при внесении в грунт извести вступает в химическое взаимодействие с ее активными компонентами и переходит в твердое состояние. Количество этой влаги определяется по формуле:

$$W_{\text{хим}} = K_1 D, \quad (2)$$

где D – дозировка извести в грунте в процентах от массы сухого грунта, %;

K_1 – коэффициент, характеризующий активность извести по отношению к воде, для CaO .

Внесенная в грунт известь в виде сухого порошка увеличивает его сухую массу за счет добавления сухого материала и за счет массы, химически связанной окисью кальция воды. Влажность грунтоизвестковой смеси с учетом этого фактора определяется по формуле [23]:

$$W_{\text{смесь}} = \frac{W_0}{1 + 0,01 \cdot D \cdot (1 + K_1)}, \quad (3)$$

где W_0 – начальная фактическая влажность грунта, %.

В процессе гашения извести водой происходит экзотермическая реакция с выделением тепла, повышающего температуру грунта и ускоряющего испарение влаги. Определить расчётным путём дополнительное количество испарившейся влаги $\Delta W_{\text{исп.}}$ трудно из-за многофакторности задачи. Гораздо проще использовать экспериментальные данные и формулу:

$$\Delta W_{\text{исп.}} = k_i \cdot k_2 \cdot D, \quad (4)$$

где k_i – коэффициент, учитывающий дополнительные испарения влаги;

k_2 – коэффициент, учитывающий относительное содержание в извести свободной окиси кальция ($k_2 = 0,5 \dots 0,85$).

Таким образом, величина уменьшения влажности грунта с повышенной влажностью за счет испарения после внесения извести зависит от коэффициента испарения и дозировки извести в процентах от массы сухого грунта D и может быть определена по формуле

Таким образом для упрощения расчета по формуле (3) и (4):

$$W_{\text{смесь}} = \frac{W_0}{1 + 0,01 \cdot D \cdot (1 + K_1 + k_i \cdot k_2)}. \quad (5)$$

Для того чтобы найти изменение влажности воспользуемся формулой

$$\Delta W = W_0 - W_{\text{смесь}}. \quad (6)$$

Исходя из формул (5) и (6), выразим дозировку извести, необходимую для изменения влажности на ΔW :

$$D = \frac{100\% \cdot \Delta W}{(W_0 - \Delta W) \cdot (1 + K_1 + k_i \cdot k_2)}. \quad (7)$$

Для корректного использования данной формулы необходимо уточнить коэффициенты K_1 и k_p , для этого требуется экспериментальное исследование данного вопроса. Кроме того, необходимо учитывать, что при введении в глинистые грунты извести происходит изменение структуры грунта и его поведение при уплотнении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализировав полученные экспериментальные данные, можно сделать следующие выводы:

1. Осушение грунта повышенной влажности методом сосредоточенного введения негашеной извести возможно. Введение 2% извести по массе позволяет снизить влажность приблизительно на 4% за период от 6 до 13 сут в зависимости от начальной влажности грунта и коэффициента уплотнения грунта.

2. При перемешивании подготовленного по предлагаемой технологии грунта будет также проходить смешение гашеной извести и грунта, что будет способствовать повышению оптимальной влажности с 18,1% (для грунта без добавок) до 22,3% (для грунта с добавлением 4% извести) и его уплотняемости.

3. Помимо эффектов снижения влажности, при перемешивании извести с глинистым грунтом она будет способствовать протеканию пуццолановых реакций и образованию новой структуры укрепленного грунта, что дополнительно повысит прочность земляного полотна. Данный эффект планируется изучить в дальнейших исследованиях.

4. Необходимы дополнительные исследования предложенной методики с применением прорезей в грунте вместо скважин для ускорения осушения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. B. R. Phanikumar, K. Amrutha, "Effect of overburden pressure and degree of saturation on compressibility characteristics, *International Journal of Geomechanics and Geoengineering*, 2013 9(1): 52-62.

2. I. L. Sabri, "Study on the impact of moisture content on subgrade strength," in Proc. 5th International Symposium, Sri Lanka, 2015, pp. 71-76

3. Effect of Soaking Period of Clay on its California Bearing Ratio Value Proceedings of the 4th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'19) Rome, Italy – April, 2019 Paper No. ICGRE 162 DOI: 10.11159/icgre19.162)

4. F. L. D. Woollorton, Moisture Content and the CBR Method of Design, – C. 268 – 297.

5. Sina Kazemian, Bujang B.K. Huat. Assessment of Stabilization Methods for Soft Soils by Admixtures / International Conference on Science and Social Research – 2010. – C.123 – 126.

6. Ф. З. Нгуен. Исследование зависимости прочностных свойств грунта от его физического состояния / Magazine of Civil Engineering – 2012. – №9. – C.23–28.

7. A.R. Estabragh, M. Naseh, A.A. Javad. Improvement of clay soil by electro-osmosis technique / Electrochimica Acta – 2015. – №95. – C. 32–36.

8. S. JAYASEKERA. Electrokinetics to Modify Strength Characteristics of Soft Clayey Soils: A Laboratory Based Investigation / Applied Clay Science – 2014.

9. Chang-Yu Ou, Shao-Chi Chien, Yi-Guang Wang. On the enhancement of electroosmotic soil improvement by the injection of saline solutions / Applied Clay Science – 2009. – №44. – C. 130–136.

10. W.S. Abdullah, A.M. Al-Abadi. Cationic-electrokinetic improvement of an expansive soil / Applied Clay Science – 2010. – №47. – C. 343–350.

11. Amir Hossein Vakili, Mohammad Kaedi, Mehdi Mokhberi, Mohamad Razip bin Selamat, Mahdi Salim. Treatment of highly dispersive clay by lignosulfonate addition and electroosmosis application / Applied Clay Science – 2018. – №152. – C. 1–8.

12. Little, D. N., Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime, Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque, Iowa, 1995.

13. Lawrence W., Timothy Shevlin, Stave Tutokey, Joel Beeghly, The Effects of Various Lime Products for Soil Drying / Technical Report Carmeuse Lime Company – 2007. – C. 1-10.

14. Слободчикова Н. А. Научные основы подбора состава грунтов, укрепленных известью // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2017. № 4. С. 1–7.

15. Самедов А.М., Ткач Д.В. Укрепление переувлажненных глинистых грунтов молотой негашёной известью или жженой магнезией // Известия ТулГУ. Науки о земле. 2012. № 2. С. 162–170.

16. Emmanuel Sunday Ajayi. Improv Effect of Lime Variation on the Moisture Content and Dry Density of Lateritic Soil in Ilorin, Nigeria / Int. J. Forest, Soil and Erosion – 2012. – №2 (4). – C. 159–162.

17. S. T. Noor, R. Uddin. Effect of Lime Stabilization on the Alteration of Engineering Properties of Cohesive Soil / Springer Nature Singapore Pte Ltd – 2019. – C. 1257–1267.

18. H. Ranaivomanana, A. Razakamanantsoa, O. Amiri. Permeability Prediction of Soils Including Degree of Compaction and Microstructure / *International Journal of Geomechanics* – 2017. – №17.

19. M. C. Wang, C. C. Huang. Soil Compaction and Permeability Prediction Models – 1984. – C. 1063–1083.

20. A. K. Singh, Ramvir Singh, Divyanshi Chaudhary. Heat conduction and moisture migration in unsaturated soils under temperature gradients / *Pramana*. – 1989. – C.587–594.

21. Jan, Mohammad Ashraf, Walker, Richard D. EFFECT OF LIME, MOISTURE AND COMPACTION ON A CLAY SOIL / *National Academy of Sciences* – 1963. – C.1–12.

22. A. Okeiyi, A.A. Amadi. Use of quick and hydrated lime in stabilization of lateritic soil: comparative analysis of laboratory data. / *International Journal of Geo-Engineering*. – 2017. – №8:3. C.1-13.

REFERENCES

1. B. R. Phanikumar, K. Amrutha, "Effect of overburden pressure and degree of saturation on compressibility characteristics," *International Journal of Geomechanics and Geoengineering*, 2013. 9(1): 52-62.

2. I. L. Sabri, "Study on the impact of moisture content on subgrade strength," in *Proc. 5th International Symposium, Sri Lanka*, 2015: 71-76

3. Effect of Soaking Period of Clay on its California Bearing Ratio Value Proceedings of the 4th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'19) Rome, Italy 2019 Paper ICGRE 162 DOI: 10.11159/icgre19.162)

4. F. L. D. Wooltorton, Moisture Content and the CBR Method of Design, pp. 268-297.

5. Sina Kazemian, Bujang B.K. Huat. Assessment of Stabilization Methods for Soft Soils by Admixtures / *International Conference on Science and Social Research*. 2010: 123 - 126.

F. Z. Nguyen. Issledovanie zavisimosti prochnostnyh svoystv grunta ot ego fizicheskogo sostojaniya [Investigation of the dependence of the strength properties of the soil on its physical condition] / *Magazine of Civil Engineering* 2012. 9:23-28. (in Russian)

6. A.R. Estabragh, M. Naseh, A.A. Javad. Improvement of clay soil by electro-osmosis technique / *Electrochimica Acta* 2015. 95: 32–36.

7. S. JAYASEKERA. Electrokinetics to Modify Strength Characteristics of Soft Clayey Soils: A Laboratory Based Investigation / *Applied Clay Science* 2014.

8. Chang-Yu Ou, Shao-Chi Chien, Yi-Guang Wang. On the enhancement of electroosmotic soil improvement by the injection of saline solutions / *Applied Clay Science* - 2009. 44: 130-136.

9. W.S. Abdullah, A.M. Al-Abadi. Cationic – electrokinetic improvement of an expansive soil / *Applied Clay Science* 2010.47: 343–350.

10. Amir Hossein Vakili, Mohammad Kaedi, Mehdi Mokhberi, Mohamad Razip bin Selamat, Mahdi Salim. Treatment of highly dispersive clay by lignosulfonate

addition and electroosmosis application / *Applied Clay Science* 2018. 152: 1–8.

11. Little, D. N., Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime, Kendall / Hunt Publishing Company, Dubuque, Iowa, 1995.

12. Lawrence W., Timothy Shevlin, Stave Tutokey, Joel Beeghly, The Effects of Various Lime Products for Soil Drying / *Technical Report Carmeuse Lime Company* 2007: 1-10.

13. Slobodchikova N. A. Nauchnye osnovy podbora sostava gruntov, ukreplennyh izvest'ju [Scientific foundations for the selection of the composition of soils fortified with lime] / *Bulletin of Science and Education of the North-West of Russia* 2017. 4: 1-7.

14. Samedov A.M. Ukreplenie pereuvlazhennnyh glinistyh gruntov molotoj negashjonoj izvest'ju ili zhzhenoj magneziej [Strengthening waterlogged clayey soils with ground quicklime or burnt magnesia] // *Bulletin of TUSU. Geosciences*. 2012. 2: 162-170.

15. Emmanuel Sunday Ajayi. Improv Effect of Lime Variation on the Moisture Content and Dry Density of Lateritic Soil in Ilorin, Nigeria / *Int. J. Forest, Soil and Erosion* 2012 2 (4): 159-162.

16. S. T. Noor, R. Uddin. Effect of Lime Stabilization on the Alteration of Engineering Properties of Cohesive Soil / *Springer Nature Singapore Pte Ltd* 2019: 1257–1267.

17. H. Ranaivomanana, A. Razakamanantsoa, O. Amiri. Permeability Prediction of Soils Including Degree of Compaction and Microstructure / *International Journal of Geomechanics* – 2017: 17.

18. M. C. Wang, C. C. Huang. Soil Compaction and Permeability Prediction Models 1984: 1063–1083.

19. A. K. Singh, Ramvir Singh, Divyanshi Chaudhary. Heat conduction and moisture migration in unsaturated soils under temperature gradients / *Pramana*. 1989: 587-594.

20. Jan, Mohammad Ashraf, Walker, Richard D. EFFECT OF LIME, MOISTURE AND COMPACTION ON A CLAY SOIL / *National Academy of Sciences* 1963: 1-12.

21. A. Okeiyi, A.A. Amadi. Use of quick and hydrated lime in stabilization of lateritic soil: comparative analysis of laboratory data. / *International Journal of Geo-Engineering*. 2017. 8(3):1-13.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Алькаев Е.Н. Обоснование концепции исследования, планирование исследований, проведение сравнительного анализа, обобщение результатов исследования, формулировка выводов, работа с графическим материалом (65%).

Лунев А.А. Планирование исследований, обобщение результатов исследования, интерпретация результатов исследования, консультация по вопросам проведения испытаний, редактирование и переработка статьи (30%).

Голубенко В.В. Анализ и обобщение данных литературы, сбор и систематизация данных литературы; оформление статьи (5 %).

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Evgeniy N. Alkaev justification of the research concept; research planning; comparative analysis; generalization of research results; statement of the conclusions; work with graphic material (65 %).

Alexander A. Lunev research planning; generalization of research results; interpretation of research results; consultation on testing issues; editing and revision of the article (30 %).

Vladimir V. Golubenko analysis and generalization of literature data, collection and systematization of literature data; article design (5 %).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алькаев Евгений Николаевич – аспирант кафедры «Проектирование дорог».

Лунёв Александр Александрович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Проектирование дорог».

Голубенко Владимир Владимирович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Проектирование дорог».

INFORMATION ABOUT THE AUTHERS

Evgeniy N. Alkaev – post-graduate student, the Road Design Department.

Alexander A. Lunev – Cand. Of Sci., Associate Professor of the Road Design Department.

Vladimir V. Golubenko – Cand. Of Sci., Associate Professor of the Road Design Department.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются рукописи по направлениям: Транспорт. Транспортные и технологические машины; Строительство. Строительные материалы и изделия; Редакция принимает к рассмотрению **оригинальные научные статьи** объемом 8–10 стр. машинописного текста через 1 интервал, 5–8 рисунков и (или) таблиц, 20–40 ссылок; **обзорные статьи** – (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – от 10 и более страниц, от 5 и более рисунков, до 80 ссылок.

Статья должна быть неопубликованной ранее в других изданиях, написана в контексте современной литературы, обладать новизной и соответствовать профилю журнала. Автор отвечает за достоверность сведений, точность цитирования и ссылок на официальные документы и другие источники. Редакция принимает на себя обязательство ограничить круг лиц, имеющих доступ к присланной в редакцию рукописи, сотрудниками редакции, членами редколлегии, а также рецензентами данной работы. В случае обнаружения одновременной подачи рукописи в несколько изданий статья будет **ретрагирована** (отозвана из печати).

Следует уделить особенное внимание качеству перевода. Недопустимо при переводе пользоваться машинами-переводчиками. Перевод должен быть выполнен профессиональными переводчиками, а лучше – носителем английского языка. Необходимо учесть, что законодательство охраняет права переводчиков авторским правом наравне с правами авторов оригинальных произведений. Перевод текста – творческий процесс, производный объект авторского права, т.е. переводчик – соавтор нового произведения.

1 УДК. На первой странице, слева в верхнем углу без отступа, указываются индекс по универсальной десятичной классификации (УДК) (размер шрифта 10 пт).

2. Заглавие статьи. Заголовок (максимально 10-12 слов) должен быть информативным, лаконичным, соответствовать научному стилю текста, содержать основные ключевые слова, характеризующие тему (предмет) исследования и содержание работы. Приводится на русском и английском языках, по центру полужирным шрифтом размером 12 пт. прописными буквами.

3. Фамилии авторов. Количество авторов не должно превышать четырех. Для англоязычных метаданных важно соблюдать вариант написания сведений об авторе в последовательности: полное имя, инициал отчества, фамилия (Anna V. Ivanova). При латинизации фамилии можно воспользоваться системой 1 BSI – Британский Институт Стандартов (British Standards Institution) транслитерации на сайте <http://translit.ru>, при этом необходимо выбрать вариант стандарта, например, BSI. Перечень авторов располагается после заголовка статьи обычным шрифтом (размер шрифта 12 пт.).

4. Аннотация. Аннотация включает характеристику основной темы, проблемы объекта, цели исследования, основные методы, результаты исследования и главные выводы. В аннотации необходимо указать, что нового несет в себе научная статья в сравнении с другими, родственными по тематике и целевому назначению, объем от 200 до 250 слов. Структура аннотации представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Приводится на русском и английском языках. Начинается словом «Аннотация» с прописной буквы (шрифт полужирный, курсив, 10 пт); точка; затем с прописной буквы текст (курсив, 10 пт).

5. Ключевые слова служат ориентиром для читателя и используются для поиска статей в электронных базах, поэтому должны отражать дисциплину (область науки, в рамках которой написана статья), тему, цель и объект исследования.

Рекомендуемое количество ключевых слов – 10–12, количество слов внутри ключевой фразы – не более трех.

Размещаются после аннотации, на русском и английском языках.

6. Благодарности. Раздел включен в требования всеми крупными издательствами. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

7. Основные положения. Отражают ключевые результаты исследования, основное содержание статьи, изложенные тезисно и оформленные в виде 3–5 пунктов маркированного списка.

8. Основной текст статьи излагается на русском или английском языках, в электронном и бумажном виде (шрифт «Arial» (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный), в следующей последовательности:

Введение (1–4 стр.) В этом разделе описываются общая тема исследования, цели и задачи планируемой работы, теоретическая и практическая значимость, приводятся наиболее известные и авторитетные публикации по изучаемой теме, обозначаются нерешенные проблемы. Данный раздел должен содержать обоснование необходимости и актуальности исследования. Информация во Введении должна быть организована по принципу «от общего к частному».

Подразделы введения представлены на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Методы и материалы (от 2 стр. и более) В этом разделе в деталях описываются методы, которые использовались для получения результатов. Обычно сначала дается общая схема экспериментов/исследования, затем они представляются настолько подробно и с таким количеством деталей, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, организационных или структурных диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. Если было получено много похожих зависимостей, представляемых в виде графиков, то приведите только один типичный график, а данные об имеющихся количественных отличиях между ними, представьте в таблице.

Способы представления результатов представлена на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Обсуждение и заключение. Раздел содержит интерпретацию полученных результатов исследования, предположения о полученных фактах, сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

9. 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.