

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



научный рецензируемый журнал

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

СИБАДИ •

“Vestnik SibADI”

Том 17, № 6. 2020
Сквозной номер выпуска – 76
Vol. 17, no. 6. 2020
Continuous issue – 76

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 17, № 6. 2020. СКВОЗНОЙ НОМЕР ВЫПУСКА – 76
(VOL. 17, NO. 6. 2020. CONTINUOUS ISSUE – 76)**

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
ОАО Агентство «Роспечать» 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: vestnik_sibadi@sibadi.org

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», 2020

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

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

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

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

05.22.08 – Управление процессами перевозки (технические науки),

05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки),

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки),

05.23.05 – Строительные материалы и изделия (технические науки),

05.23.08 – Технология и организация строительства (технические науки),

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

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), регистрационный номер СМИ ПИ № ФС 77-73591 от 31.08. 2018 г. Входит в перечень ведущих периодических изданий, рекомендованных ВАК решением президиума ВАК от 25.02.2011 г.; в соответствии с распоряжением Минобрнауки России от 28 декабря 2018 г. № 90 – р включен в новый перечень. С 2017 г. всем номерам и статьям журнала присваиваются цифровые идентификаторы объектов (DOI), данные о которых размещены в электронной версии на сайте vestnik.sibadi.org. Редакция осуществляет рецензирование (двухстороннее «слепое») всех поступающих в редакцию материалов с целью взыскательной экспертной оценки и проверки 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 ВИНИТИ 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 30.12.2020. Дата выхода в свет 30.12.2020. 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)», 2020

“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 30.12.2020. Publication date is 30.12.2020. 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)", 2020

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

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

Коротаев 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. Днепрпетровск, 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

Черкашина Валентина Сергеевна редактор-ответственный секретарь
e-mail: vestnik_sibadi@sibadi.org

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

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

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

EDITORIAL TEAM

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

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

Transport, mining and mechanical engineering

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

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

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

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

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

Zhirgalbek 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

Valentina S. Cherkashina
Executive Journal Secretary
e-mail: vestnik_sibadi@sibadi.org

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

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

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

РАЗДЕЛ I. ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

А.П. Щербаков

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РАБОЧИХ
МЕХАНИЗМОВ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН..... 664**

В.А. Николаев

**ЗАТРАТЫ ЭНЕРГИИ НА РЕЗАНИЕ ГРУНТА КОВШАМИ АГРЕГАТА
НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ
ПОДСТИЛАЮЩЕГО СЛОЯ АВТОДОРОГИ..... 676**

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

А.Н. Новиков, И.А. Новиков, Н.А. Загородний, А.С. Семькина

**РАЗРАБОТКА НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАРЬЕРНОГО ТРАНСПОРТА 690**

И.Н. Якунин

**ВЛИЯНИЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР И СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА
АВАРИЙНОСТЬ НА АВТОМОБИЛЬНОМ ТРАНСПОРТЕ В ЛЕТНЕЕ ВРЕМЯ 704**

А.Ю. Михайлов, Е.Л. Попова

**АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТА ИНТЕРВАЛОВ СЛЕДОВАНИЯ
В ГЛАВНЫХ ПОТОКАХ ДЛЯ ПРЕОБЛАДАЮЩИХ ДОРОЖНЫХ УСЛОВИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ 714**

И.А. Новиков, А.Г. Шевцова, А.А. Кравченко, А.Г. Бурлуцкая

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АДАПТАЦИИ МОДЕЛИ РЕГУЛИРУЕМОГО
ПЕРЕСЕЧЕНИЯ..... 726**

А.Н. Котомчин, Ю.В. Штефан, В.А. Зорин

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ХРОМИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН 736**

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

И.И. Подшивалов, А.В. Журавлев

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КИРПИЧНОГО ЗДАНИЯ ПОВЫШЕННОЙ ЭТАЖНОСТИ
НА СВАЙНОМ ФУНДАМЕНТЕ..... 754**

А.А. Лыткин, Г.Б. Старков, Е.Я. Вагнер

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕЛИТОВОГО
ШЛАМА ДЛЯ УСТРОЙСТВА МОНОЛИТНЫХ СЛОЕВ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД
МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО РЕСАЙКЛИНГА 764**

PART I. TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

Alexander P. Scherbakov

**EXPERIMENTAL STUDIES OF HEAT TREATMENT INFLUENCE
ON THE WELDED CONNECTIONS PROPERTIES IN WORKING MECHANISMS
OF ROAD BUILDING..... 665**

Vladimir A. Nikolaev

**ENERGY EXPENDITURE ON GROUND CUTTING BY CONTINUOUS ACTION
BUCKETS TO FORM THE UNDERLYING LAYER OF THE ROAD 677**

PART II. TRANSPORT

Alexander N. Novikov, Ivan A. Novikov, Nikolay A. Zagorodnij, Alla S. Semykina

**DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL APPROACHES
TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF QUARRY TRANSPORT OPERATION 691**

Ivan N. Yakunin

**INFLUENCE OF HIGH TEMPERATURES AND SOLAR RADIATION
ON ACCIDENTS ON ROAD TRANSPORT IN THE SUMMER 705**

Alexander Yu. Mikhailov, Ekaterina L. Popova

**ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS FOR CALCULATING FOLLOWING
INTERVALS IN MAIN FLOWS THE PREVAILING ROAD CONDITIONS
IN THE RUSSIAN FEDERATION..... 715**

Ivan A. Novikov, Anastasia G. Shevtsova, Andrey A. Kravchenko, Alina G. Burlutskaya

**DEVELOPMENT OF A PROCEDURE FOR ADAPTING A MODEL
OF ADJUSTABLE INTERSECTION..... 727**

Aleksei N. Kotomchin, Yurii V. Shtefan, Vladimir A. Zorin

**SIMULATION OF CURRENT OUTPUT DURING CHROME PLATING
OF PARTS FOR HARDENING AND CAR PARTS RESTORATION..... 737**

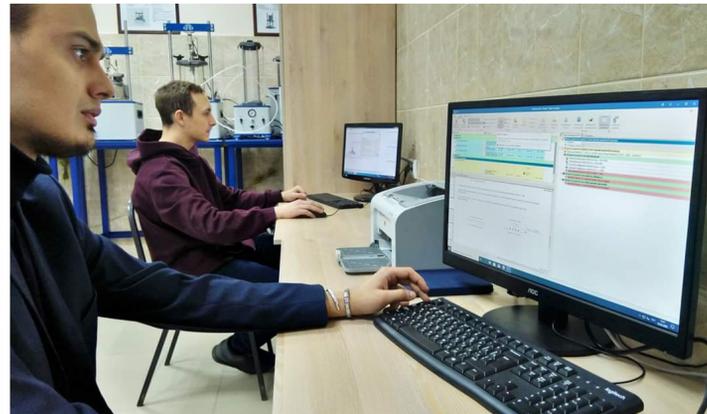
PART III. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Ivan I. Podshivalov, Alexey V. Zhuravlev

**MODELING OF A BRICK BUILDING OF HIGH STOREYS
ON A PILE FOUNDATION 755**

Alexander A. Lytkin, Gleb B. Starkov, Evgeniy Ya. Wagner

**RESEARCH OF THE EFFICIENCY OF THE USE OF BELITE SLUDGE
FOR THE DEVICE OF MONOLITHIC LAYERS OF ROAD CLOTHES
BY THE METHOD OF COLD RECYCLING 765**



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



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

УДК 621.86

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-665-675>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РАБОЧИХ МЕХАНИЗМОВ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

А.П. ЩербаковФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Проводятся экспериментальные исследования влияния термической обработки на свойства сварных соединений рабочих механизмов дорожно-строительных машин. Изучая структуры как непосредственно металла, так и сварных соединений и основываясь на их неоднородности, автор анализирует прочностные характеристики указанных объектов.

Материалы и методы. Прибегнув к металлографическому анализу, а также используя в качестве материала исследования борсодержащую сталь 30MnB5, применяемую для изготовления конструкций строительных машин, автор исследовал ее микроструктуру на тех или иных зонах сварных соединений. В частности, были изучены сварные швы, зоны сплавления с участком перегрева, участок полной перекристаллизации и основной металл. Также были исследованы особенности проведения холодной пластической деформации указанного образца стали.

Результаты. Было определено, что механическая неоднородность стали на указанных соединениях стала причиной структурной неоднородности сварных соединений. Данный процесс способствовал образованию опасных зон концентрации действующих напряжений. Эти выводы говорят о необходимости выявить те или иные зоны, которые концентрируют в себе напряжения; при этом обязательным условием является усиление металла в таких зонах до нормативных показателей.

Повышение прочностных свойств исследуемой стали возможно посредством применения холодной пластической деформации и последующей термоциклической обработки (ТЦО). Это достигается за счет получения мелкозернистой структуры металла, имеющей более высокую прочность.

В качестве наиболее опасных участков, подвергающихся нагрузке, автором были определены сварной шов и зона его сплавления с основным металлом и участком перегрева. В качестве средства контроля за данным процессом в настоящей работе рекомендован к использованию пассивный феррозондовый метод; при этом контролю должна подвергаться вначале зона сплавления с участком перегрева, а после – сварной шов.

Обсуждение и заключение. Автор приходит к выводу, что проведенные экспериментальные исследования могут способствовать повышению эффективности процесса снижения концентрации напряжений (КН) в выполненных из стали и подвергающихся интенсивной эксплуатации элементах строительных машин за счет снижения структурной и механической неоднородности сварных соединений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: металлографический анализ, сварные металлические конструкции, сварные соединения, зоны концентрации напряжений.

Поступила 17.11.20, принята к публикации 25.12.2020.

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: А.П. Щербаков. Экспериментальные исследования влияния термической обработки на свойства сварных соединений рабочих механизмов дорожно-строительных машин. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-665-675>

© Щербаков А.П.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-665-675>

EXPERIMENTAL STUDIES OF HEAT TREATMENT INFLUENCE ON THE WELDED CONNECTIONS PROPERTIES IN WORKING MECHANISMS OF ROAD BUILDING

Alexander P. Scherbakov

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

ABSTRACT

Introduction. *The experimental studies of the heat treatment effect on the properties of welded joints in working mechanisms of road-building machines are carried out in the work. Studying the structures of the metal itself, as well as welded joints and considering their heterogeneity, the author analyzes the strength characteristics of these objects.*

Materials and methods. *By means of metallographic analysis, as well as using boron-containing steel 30MnB5, which is used for the manufacture of structures for construction machines, as a research material, the author examined its microstructure, which took place in certain zones of welded joints. In particular, welded joints, fusion zones with an overheating area, a complete recrystallization area and the base metal were studied. We also studied the features of cold plastic deformation of the specified steel sample.*

Results. *It was determined that the mechanical inhomogeneity of the steel at these joints is the cause of the structural inhomogeneity of the welded joints. As a result of this process, some dangerous zones of acting voltages concentration are formed. These conclusions predetermine the need to identify some certain zones that concentrate stresses in themselves, while it is mandatory to strengthen the metal in such zones to standard indicators.*

An increase in the strength properties of the steel under study is possible by applying cold plastic deformation and subsequent thermal cycling (STC). This is achieved by obtaining a fine-grained metal structure with higher strength. The author defines the welded joints and the zone of its fusion with the base metal and the overheating area as the most dangerous areas subject to loading. To control this process, it is recommended to use the passive fluxgate method in the work, while the fusion zone with the overheating section should be inspected first, and then the weld.

Discussion and conclusion. *The author comes to the conclusion that the experimental studies carried out can contribute to an increase in the efficiency of the process of reducing the stress concentration (SC) in the elements of construction machines made of steel and subjected to intensive operation by reducing the structural and mechanical inhomogeneity of welded joints.*

KEYWORDS: *metallographic analysis, welded metal structures, welded joints, stress concentration zones.*

Submitted 17.11.20, revised 25.12.2020.

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: Alexander P. Scherbakov. Experimental studies of the influence of heat treatment on the properties of welded connections of working mechanisms of road building machines. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-665-675>

© Scherbakov A.P.



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

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях ускоренный износ строительной техники становится достаточно серьезной проблемой для потребителей, так как в связи с ростом курса мировых валют увеличивается и стоимость самих машин. Следствием этого является рост стоимости основных средств, вновь приобретаемых строительной компанией, что не может не отражаться на стоимости и работ, и готового строительного объекта. По этой причине представляется актуальным поиск возможных путей снижения уровня износа отдельных узлов и агрегатов строительных машин в целях продления срока эксплуатации последних [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

Известно, что на некоторых участках и зонах сварного соединения структура металла не отличается однородностью. Она может быть крупно- или мелкозернистой в зоне перегрева, зоне полной перекристаллизации и основного металла соответственно или же быть литой дендритной в зоне сварного шва. Проанализированные исследования, где рассматривается конструкционная борсодержащая сталь 30MnB5, свидетельствуют о том, что существует несколько путей решения проблемы снижения износостойкости узлов и агрегатов, выполненных из данного вида стали: это применение термоциклической обработки (ТЦО) сварных образцов, за счет чего снижается структурная неоднородность всех зон и участков сварного соединения, а также уменьшение зерна при крупнозернистой структуре, что дает возможность повысить прочность металла в тех зонах, в которых уровень концентрации напряжения (КН) очень высок [11, 12, 13, 14, 15].

При этом нельзя не отметить, что длительность эксплуатации той или иной строительной машины может стать причиной возникновения опасных локальных зон, так как металл в них постоянно находится под влиянием холодной пластической деформации. Кроме того, на участках сварных соединений могут возникнуть и развиваться различные трещины, причиной которых чаще всего выступает структурная неоднородность металла [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22].

В этой связи представляется актуальным рассмотрение проблемы влияния на неоднородность структуры сварных соединений холодной пластической деформации и термических нагрузок.

Отдельные исследования, проведенные в рамках поставленной проблемы, позволи-

ли определить, что применение пассивного феррозондового метода дает возможность обозначить опасные зоны КН и держать под постоянным контролем их состояние. Данный метод позволяет вывести корреляцию между магнитным параметром H_p и структурными изменениями металла в ходе холодной пластической деформации. Это дает возможность улучшить диагностику строительных машин, подвергающихся длительной и интенсивной эксплуатации. В рассматриваемом разрезе определенный интерес также представляет исследование влияния ТЦО на структурную неоднородность деформированных зон и участков сварных соединений.

Цели настоящей работы заключались в изучении структуры металла, подвергающегося воздействию, в различных зонах сварного соединения, а также в определении уровня ее влияния на механические свойства. Планировалось определить как влияние ТЦО на неоднородность структуры сварных соединений, так и возможность повысить с ее помощью прочностные свойства металла [23, 24, 25].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследований была обозначена сталь 30MnB5. Указанный вид конструкционной борсодержащей стали на сегодняшний день широкое применение в различных областях промышленности, в том числе при сборке различных видов строительных машин. Прочность данной стали достаточно высока: она устойчива к износу и имеет высокий уровень ударной вязкости. Указанную сталь рекомендуется применять там, где планируется использовать высокие нагрузки. Оборудование, изготовленное из такой стали, высокопрочное. Оно имеет меньшую массу по сравнению с аналогами, произведенными из других видов стали, что дает возможность сократить объем используемого топлива и обеспечить высокопрочную конструкцию изделий. Кроме того, данная сталь экономична в производстве, что означает сокращение себестоимости конечной продукции.

При изготовлении данную сталь термически обрабатывают определенным способом, который включает закалку и последующий отпуск. Данный способ обработки эффективно влияет на качество указанной стали. Срок ее службы при этом возрастает. Химический состав данной стали, при условии определенной обработки, позволяет повысить ее характеристики, что благотворно повлияет на конечный продукт.

Данный вид стали также позволяет изготавливать из нее различные сложные узлы и агрегаты машин, так как при нагреве пластичность стали достаточно высока. Однако при охлаждении прочность такой стали позволяет говорить о высокой прочности изделий, изготовленных из нее.

Технические характеристики рассматриваемой стали приведены в таблице 1.

В таблице 2 представлен химический состав указанной стали.

Сварные образцы были изготовлены на основе требований из стальных пластин, толщина которых составляла 3, 5 и 10 мм.

Образцы, которые использовались для проведения металлографического анализа, были произведены на прецизионном отрезном станке Brillant 220 (рисунок 1).



Рисунок 1 – Универсальный отрезной станок Brillant 220

Figure 1 – Brillant 220 Universal cut-off machine

Указанный станок представляет собой агрегат, способный работать в нескольких режимах резки материала, позволяющих идеально использовать пространство. Конструкция станка модульная; сам аппарат полностью автоматизирован, что дает возможность осуществлять резку небольших частиц, геометрия которых различна. Станок оснащен вакуумным держателем, что повышает уровень точности получаемых образцов до 0,001 мм.

Микрошлифы были подготовлены в установке для запрессовки микрошлифов Opal 460 (рисунок 2).



Рисунок 2 – Пресс для горячей запрессовки Opal 460

Figure 2 – Opal 460 press for hot pressing

Таблица 1
Технические характеристики стали 30MnB5

Table 1
Technical characteristics of 30MnB5 steel

Толщина, мм		Ширина, мм		Длина листов, мм
3–16		900–1800		2000–12000
Предел текучести, МПа		Предел прочности, МПа		Твердость, HRC
В состоянии поставки	После ТО	В состоянии поставки	После ТО	
400	1200	650	1700	52

Таблица 2
Химический состав стали 30MnB5, %

Table 2
Chemical composition of 30MnB5 steel, %

C	Mn	Si	P	S	Cu	B
0,27–0,33	1,15–1,45	≤0,40	≤0,025	≤0,035	≤0,40	0,0008–0,0050

Затем проводилась шлифовка и полировка образцов на установке Metapol 160E.

Травление шлифов осуществлялось в 4%-м растворе HNO_3 в этиловом спирте. После соответствующей обработки образцов был проведен их микроструктурный анализ, для чего применялся металлографический микроскоп Olympus SpinSR10, оснащенный системой количественного анализа изображений Thixomet (рисунок 3).



Рисунок 3 – Металлографический микроскоп Olympus SpinSR10

Figure 3 – Olympus SpinSR10 metallographic microscope

Указанный микроскоп оснащен вращающимся диском, позволяющим получить изображения с суперразрешением. Глубина таких изображений составляет до 100 мкм; в данном случае исследованию подвергаются области, которые недоступны для изучения, если применяются другие оптические приборы. Скорость обработки спектральных данных при этом очень высокая.

Все поле зрения при использовании микроскопа равномерно освещено, а переход от конфокального режима к режиму суперразрешения достаточно плавный.

Технология работы данного прибора основана не на тщательном сканировании той или иной области образца, а на быстрых снимках исследуемых областей, что позволяет наблюдать за реальными процессами. Оснащение прибора двумя камерами дает возможность видеть изображение в двухцветном режиме. Конструкция микроскопа включает вращающийся диск, который позволяет получать на выходе достаточно яркие изображения исследуемого объекта и его составляющих.

Вся информация, полученная при помощи указанного оборудования, напрямую передавалась на ПК и обрабатывалась при помощи специальной программы.

Также для измерения микротвердости в сварных соединениях применялся универсальный твердомер DuraVision-30 (рисунок 4).



Рисунок 4 – Универсальный твердомер DuraVision-30

Figure 4 – DuraVision-30 universal hardness tester

В структуру твердомера входит монолитная чугунная рама, за счет чего повышаются точность и стабильность измерений. Также микроскоп оснащен семипозиционной моторизованной турелью, которая дает возможность измерять твердость различными методами без изменения конструктива прибора, что свидетельствует об универсальности данного аппарата. Указанный твердомер находит свое применение и в лабораторных условиях, и в производственном процессе.

Указанный прибор обладает следующими положительными качествами:

- нагрузки, возможные для применения, – 3–3000 кгс;
- 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 результате проведенного анализа на сварных швах была обнаружена структурная неоднородность, свойственная борсодержащим сталям. Данная неоднородность обычно имеет место при сварных работах, вызывающих в металле структурные изменения.

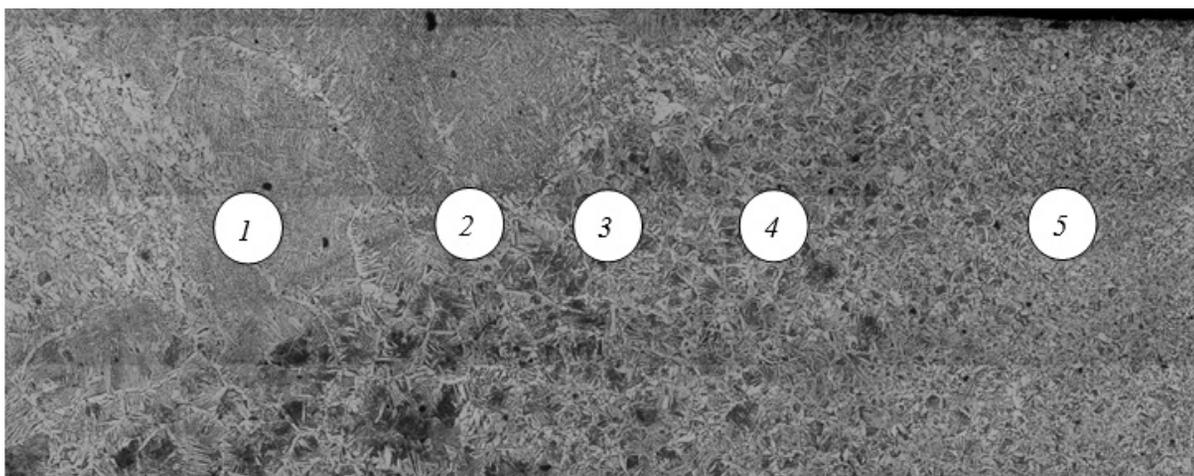


Рисунок 5 – Микроструктура стыкового сварного соединения из стали Ст30МнВ5 толщиной 3 мм, $\times 50$:
1 – сварной шов; 2 – зона сплавления; 3 – участок перегрева; 4 – зона полной перекристаллизации стали;
5 – основной металл

Figure 5 – Microstructure of a butt weld made of St30MnB5 steel with a thickness of 3 mm, $\times 50$:
1 – weld; 2 – fusion zone; 3 – overheating area; 4 – zone of complete recrystallization of steel;
5 – base metal

Панорама структуры стыкового сварного соединения из стали Ст30МнВ5 представлена на рисунке 5.

На рисунке 6 представлена микроструктура сварного шва стыкового сварного соединения из стали Ст30МнВ5 толщиной 3 мм, $\times 100$. Изображение демонстрирует, что микроструктура сварного шва имеет дендритное строение.

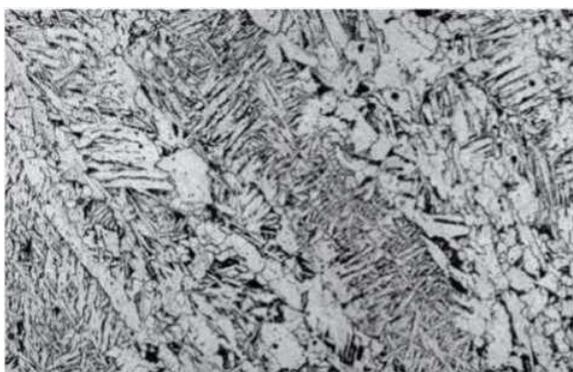


Рисунок 6 – Микроструктура сварного шва стыкового сварного соединения из стали Ст30МнВ5 толщиной 3 мм, $\times 100$

Figure 6 – Microstructure of a 3 mm thick St30MnB5 steel butt weld, $\times 100$

Причина этого кроется в условиях проведения сварных работ, а также в свойствах самой стали. Можно отметить, что оси роста кристаллов, которые располагаются в сварных швах, представлены пространственными кривыми, что является следствием как изменения формы сварочной ванны в плоскостях, парал-

лельных плоскости свариваемого листа, так и перемещения теплового поля в направлении производимой сварки.

Если же проводимая сварка тонких листов является стыковой, то имеет место смена пространственной схемы кристаллизации на плоскую, что переносит оси роста образующихся кристаллов в параллельные плоскости. Увеличение разориентации кристаллов в сварном шве по сравнению со слитками находится в прямой зависимости от размера сварочной ванны и кривизны оплавленной поверхности (рисунок 7).



Рисунок 7 – Микроструктура зоны сплавления стыкового сварного соединения из стали Ст30МнВ5 толщиной 3 мм, $\times 100$

Figure 7 – Microstructure of the fusion zone of a butt welded joint made of St30MnB5 steel with a thickness of 3 mm, $\times 100$

Если рассмотреть микроструктуру зоны сплавления (см. рисунок 7), то можно увидеть, что металл в процессе сварки имеет твердое жидкое состояние и находится между температурами ликвидуса и солидуса.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Химический состав стали выступает фактором, влияющим на ширину зоны плавления. При этом в данной зоне происходят различные диффузионные процессы и имеет место процесс кристаллизации.

На участке перегрева измерение температуры происходит от линии солидуса до A_{c3} . Указанная зона становится тем местом, где происходят изменения металла, свойственные углеродистым сталям. Перегрев вызывает снижение прочности стали на данном участке, а ее зернистость укрупняется (рисунок 8).

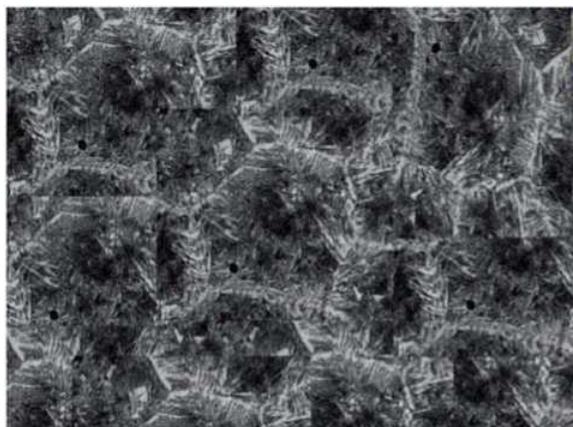


Рисунок 8 – Микроструктура участка перегрева стыкового сварного соединения из стали St30MnB5 толщиной 3 мм, $\times 100$

Figure 8 – Microstructure of the superheating section of a butt weld made of 3 mm thick St30MnB5 steel, $\times 100$

В данной зоне происходят полное и частичное фазовое превращение, а также рекристаллизация под воздействием высоких температур.

Следующий участок – это область механического и термомеханического влияния. Фазовые и структурные изменения здесь невозможны, так как этого не позволяет уровень температуры на данном участке (рисунок 9).

На данном участке определенные сварочные напряжения вызывают упругую и пластическую деформацию материала.

Фотография на рисунке 10 демонстрирует зону, в которой отсутствуют изменения в микроструктуре материала. Зерно металла здесь мельче, нежели в двух представленных ранее зонах, а прочность металла – выше. О

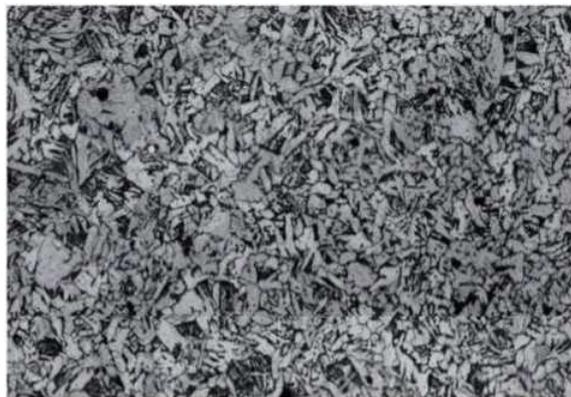


Рисунок 9 – Микроструктура участка полной перекристаллизации стыкового сварного соединения из стали St30MnB5 толщиной 3 мм, $\times 100$

Figure 9 – Microstructure of the section of complete recrystallization of a butt welded joint made of St30MnB5 steel with a thickness of 3 mm, $\times 100$

бъяснение этому можно найти в уравнении Холла – Петча, где предел текучести металла связан с размером зерен следующим образом:

$$\sigma_T = \sigma_0 + k_d - \frac{1}{2},$$

где σ_0 – параметр, характеризующий сопротивление кристаллической решетки движению дислокаций; k – параметр, характеризующий барьерный эффект границ зерен при переходе скольжения от зерна к зерну; d – размер зерен.

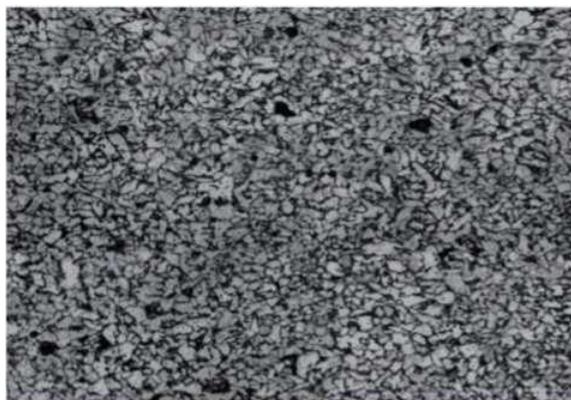


Рисунок 10 – Микроструктура зоны основного металла стыкового сварного соединения из стали St30MnB5 толщиной 3 мм, $\times 100$

Figure 10 – Microstructure of the base metal zone of a butt weld made of 3 mm thick St30MnB5 steel, $\times 100$

В литературе отмечено, что уменьшение зерна металла влечет за собой рост твердости, ударной вязкости, а также повышение предела прочности. На рисунке 11 продемонстрированы изменения микротвердости в различных зонах, подвергшихся исследованию.

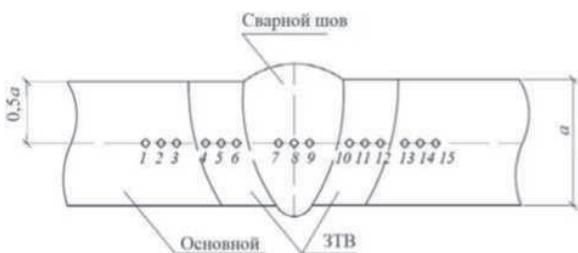
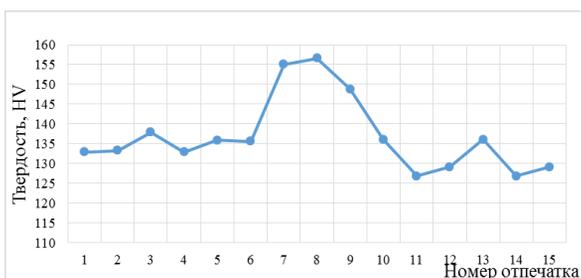


Рисунок 11 – Изменение микротвердости в различных зонах стыкового сварного соединения из стали Ст30MnB5 толщиной 3 мм

Figure 11 – Changes in microhardness in various zones of butt welded joints made of 3 mm thick St30MnB5 steel

Согласно данным рисунка 11, изменения микротвердости незначительны, что нельзя отметить в отношении сварного шва.

В таблицу 3 включены данные, касающиеся исследования температуры микроструктур других зон сварных соединений толщиной 5 и 10 мм. Также были проанализированы влияние ТЦО на неоднородность структуры сварных соединений и повышение прочностных свойств металла.

Перед началом эксперимента образцы бордосержащей стали 30MnB5 были подвергнуты

дробной холодной пластической деформации на 20 и 50%. Затем проведена ТЦО. Ее режим был следующим: температура нагрева составила 770 °С, после чего производилось охлаждение на воздухе (число циклов – 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10). Для учета результатов применялись различные методы контроля с использованием вышеуказанного лабораторного оборудования.

На рисунке 12 продемонстрирована зависимость величины магнитного параметра H_p от числа циклов при ТЦО сварного соединения в зонах сварного шва и основного металла, значительно отличающихся по исходной структуре.

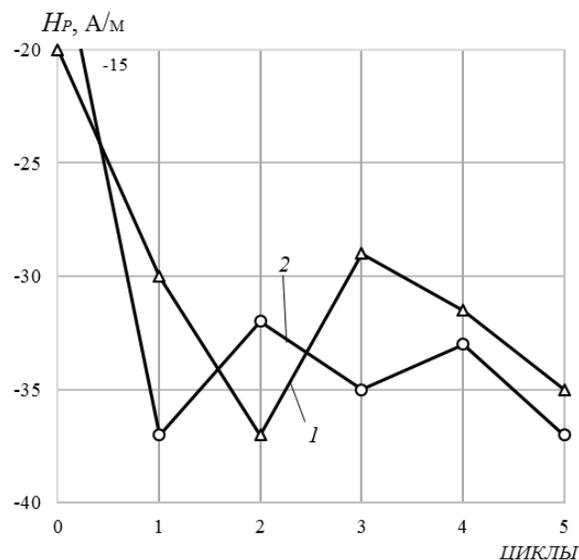


Рисунок 12 – Зависимость магнитного параметра H_p от числа циклов при ТЦО сварного соединения из стали Ст30MnB5: 1 – зона сварного шва; 2 – зона основного металла

Figure 12 – Dependence of H_p magnetic parameter on the number of cycles in the STC of a welded joint made of St30MnB5 steel: 1 – weld zone; 2 – base metal zone

Таблица 3
Температура и размеры зон сварных соединений

Table 3
The temperature and size of the welded joints zones

Зона сварного соединения	Структура металла	Температура, °С	Ширина зоны, мм
Сварной шов	Столбчатая, литая, с пониженными механическими свойствами	1530 ± 5	½ ширины шва
Линия сплавления	Рост зерна, образование игольчатой структуры с повышенной хрупкостью	1530–1470	0,1–0,4
Участок перегрева	Крупнозернистая, с пониженной ударной вязкостью и пластичностью	1470–1100	3–4
Участок полной перекристаллизации	Измельчение зерна, повышение механических свойств	1100–880	0,2–4,0
Основной металл	Структурных изменений нет	510–200	0,8–12

Согласно рисунку 12, налицо высокая динамика изменения значений H_p во время осуществления первых 2–3 циклов. Чем больше количество циклов, тем стабильнее величина напряженности магнитного поля рассеяния H_p . С пятого цикла измерения рассматриваемого параметра практически не происходит. Это является следствием структурных преобразований металла, происходящих в процессе ТЦО, ранее описанных в работах автора.

На рисунке 13 показано, что под влиянием ТЦО существенно измельчается структура металла: отмечается высокая трансформация специфической дендритно-ориентированной литой структуры сварного шва (рисунок 13, а) и сокращается размер зерен в зоне перегрева (рисунок 13, б). Максимальные структурные изменения отмечены на участках полной перекристаллизации стали и основного металла (рисунок 13, в, г).

Если степень предварительной холодной пластической деформации сварного соединения увеличивается до 50%, то после проведения ТЦО можно увидеть более мелкозернистую структуру во всех зонах и участках. Наиболее мелкозернистой структура становится в зоне сплавления сварного шва с основным металлом и на участке перегрева. Соответственно, предварительная деформация сварного соединения является предпосылкой образования более мелкозернистой структуры металла после проведения ТЦО. Если же образцы не были изначально подвергнуты холодной пластической деформации, то влияние количества циклов ТЦО в данной ситуации на указанный процесс несущественно. Все вышесказанное подтверждает необходимость осуществления холодной пластической деформации перед проведением ТЦО, чтобы повысить дисперсность структуры всех зон и участков сварного соединения.

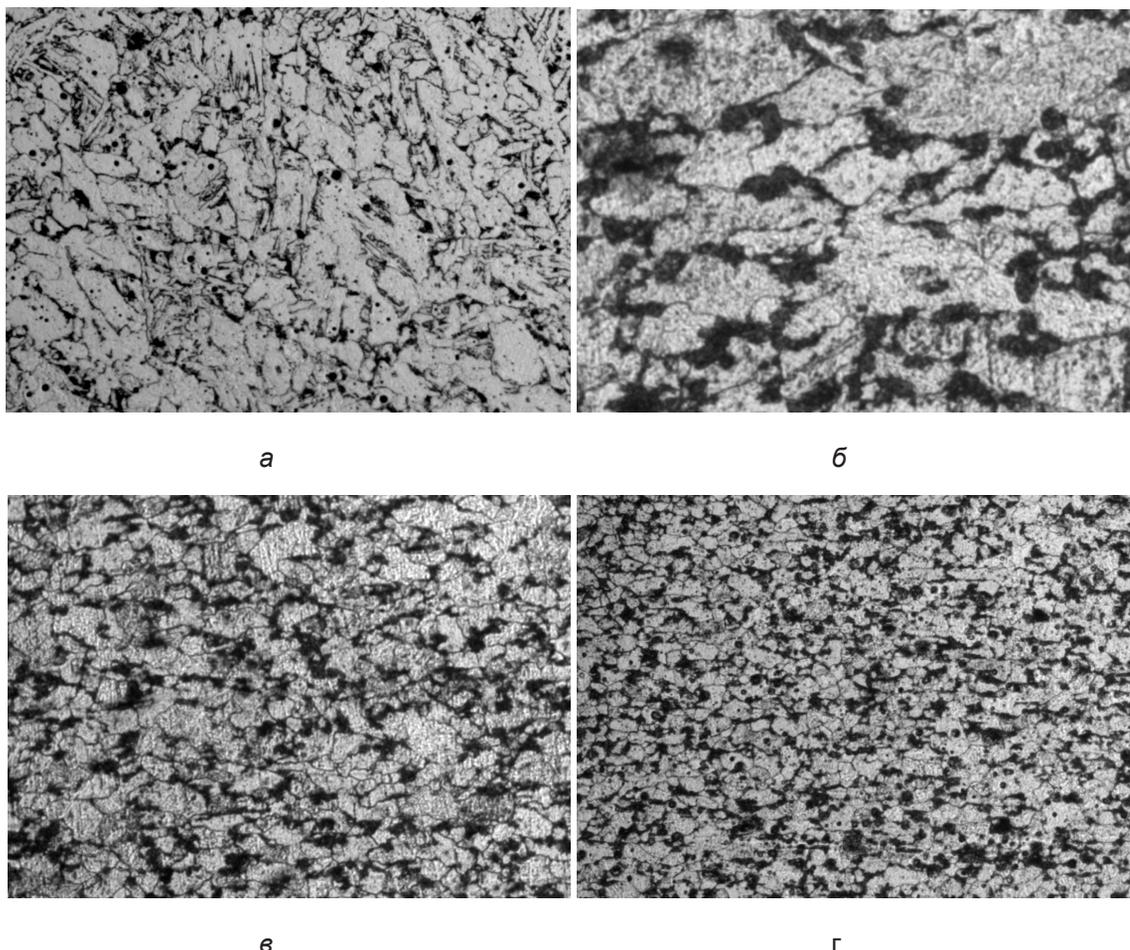


Рисунок 13 – Строение стыкового сварного соединения из стали Ст30МнВ5 после деформации на 20% и трех циклов ТЦО ($\times 200$): а – сварной шов; б – участок перегрева; в – участок полной перекристаллизации; г – основной металл

Figure 13 – The structure of the butt welded joint made of steel St30MnB5 after deformation by 20% and three cycles of STC ($\times 200$): a – weld ; b – overheating area; c – full recrystallization area; d – base metal

Если количество циклов ТЦО свыше 3–5, то изменения структуры практически не происходит. Как следствие, вышеприведенные исследования позволяют соотнести данный процесс со снижением амплитуды колебаний магнитного поля.

Рассмотренный выше процесс повышения мелкозернистости структуры металла, подвергнутого сначала холодной пластической деформации, а затем ТЦО, скорее всего, связан с активизацией структурных изменений, происходящих в процессе ТЦО. В частности, в опытах с предварительной холодной деформацией при ТЦО отмечено увеличение количества центров образующейся γ -фазы, что влечет за собой измельчение зерна аустенита.

Кроме того, значительную трансформацию структуры металла при ТЦО после холодной пластической деформации можно объяснить перераспределением дефектов кристаллического строения (дислокации, вакансии, дефекты упаковки) и повышением их плотности, а также образованием и развитием мало- и высокоугловых границ. Все вышесказанное подтверждает эффективность применения холодной пластической деформации перед проведением ТЦО, если целью экспериментатора заявлено получение более мелкозернистой структуры сталей.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование свидетельствует о том, что следствием появления механической неоднородности сталей выступает структурная неоднородность различных зон сварных соединений. Проведенный эксперимент позволяет говорить о существовании зависимости между напряженностью магнитного поля рассеяния H_p и структурными изменениями в различных зонах и участках сварных соединений, предварительно деформированных сварных образцов при ТЦО, контролируемой пассивным феррозондовым методом. Определена зависимость величины магнитного параметра H_p , числа циклов ТЦО, исходной микроструктуры участков и количества зон сварного соединения.

Если в период первых 3–5 циклов, включающих нагрев-охлаждение, значения H_p изменяются достаточно интенсивно, то с ростом количества циклов такая амплитуда сокращается. Соответственно, чувствительность магнитного метода может быть использована в проведении контрольных процедур, связанных с отслеживанием процесса формирования мелкозернистой структуры в опасных локальных зонах КН (концентрации напряжений) сварных соединений на самых ранних стадиях ТЦО.

Влияние холодной пластической деформации, проведенной перед ТЦО, на повышение мелкозернистости стали, несомненно, имеет

связь с активизацией проходящих при ТЦО структурных изменений.

При этом было определено, что если повысить степень предварительной холодной пластической деформации с 20 до 50%, то мелкозернистость структуры зон и участков сварных соединений также возрастет.

Результаты данного исследования будут способствовать повышению эффективности сварных соединений и элементов длительно эксплуатируемых МК (металлических конструкций) строительных машин. При этом появляется возможность уменьшить структурную и механическую неоднородность сварных соединений, а также повысить степень равнопрочности различных зон и участков сварных соединений. Данный процесс обещает значительно повысить безопасность эксплуатации строительных машин, так как позволит устранить опасные локальные зоны КН с металлом в стадии предразрушения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щербаков А.П., Пушкарев А.Е., Манвелова Н.Е. Рабочие механизмы строительных машин и способы технологического обеспечения прочности сварных соединений из высокопрочных сталей // Недвижимость: экономика, управление. 2020. № 1. С. 63-68.
2. Мухаметшина Р.М. Отказы дорожно-строительных машин по параметрам коррозии // Известия КазГАСУ. 2013. № 4 (26). С. 62-67.
3. Щербаков А.П. Выбор материала и метода повышения износостойкости элементов строительных машин // Вестник СибАДИ. 2020. № 17 (4). URL: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-464-68>.
4. Вишнякова Е.В. История развития конструкционных материалов // Холодильная техника и кондиционирование. 2016. № 1. С. 51-56.
5. Гордиенко В.Е., Трунова Е.В., Абросимова А.А., Шананина Н.В. Пассивный феррозондовый контроль длительно эксплуатируемых сварных металлоконструкций с коррозионными повреждениями // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 3 (56). С. 193-197.
6. Болдырев А.М. Технология сварки в строительстве. Воронеж, ВГУ. 1987. 196 с.
7. Гордиенко В.Е., Абросимова А.А., Трунова Е.В., Щербаков А.П. К выбору конструкционных сталей для изготовления сварных металлических конструкций строительных машин // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6 (65). С. 233-238.
8. Floreen S., Hayden H.W. The deformation and fracture of stainless steels having microduplex structures (Deformation characteristics and fracture strength of Cr-Ni stainless steels with fine scale two-phase ferrite plus austenite microstructures) // ASM Transactions Quarterly. 1968. Vol. 61. Pp. 489-499.
9. Березина А.А. Некоторые особенности оценки структурной и механической неоднородности сварных соединений металлических конструкций строительных машин // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 4 (51). С. 123-127.
10. Мыльников В.В. Влияние частоты нагружения на усталость конструкционных материалов // Наука и техника. 2019. № 5. С. 52-55.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

24. Бубликов Ю.А. Основные направления повышения свойств конструкционных сталей ферри-

то-перлитного класса // ВЕЖПТ. 2014. № 11 (72). С. 81-82.

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

REFERENCES

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

2. Mukhametshina R.M. Otkazy dorozhno-stroitel'nyh mashin po parametram korrozii [Failures of road construction machines in terms of corrosion parameters]. *Izvestiya KazGASU. – News of the University*. 2013; 4 (26): 62-67. (in Russian)

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

4. Vishnyakova E.V. Istoriya razvitiya konstrukcionnykh materialov [History of the development of structural materials]. *Holodil'naya tekhnika i kondicionirovanie – Refrigerating Equipment and Air Conditioning*. 2016; 1: 51-56. (in Russian)

5. Gordienko V.E., Trunova E.V., Abrosimova A.A., Shananina N.V. Passivnyy ferrozondovyy kontrol'ditel'no ehkspluatiruemykh svanykh metallokonstruktsiy s korrozionnymi povrezhdeniyami [Passive ferrosonde monitoring of long-term operation of welded metal structures with corrosion damage]. *Vesnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2016; 3 (56): 193-197. (in Russian)

6. Boldyrev A.M. *Tekhnologiya svarki v stroitel'stve* [Welding technology in construction]. Voronezh, VSU, 1987. 196 p. (in Russian)

7. Gordienko V.E., Trunova E.V., Abrosimova A.A., Shananina N.V. K vyboru konstrukcionnykh stalej dlya izgotovleniya svarnykh metallicheskih konstrukcij stroitel'nyh mashin [To the choice of structural steels for the manufacture of welded metal structures of construction machines]. *Vesnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2017; 6 (65): 233-238. (in Russian)

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

9. Berezina A.A. Nekotorye osobennosti ocenki strukturnoj i mekhanicheskoy neodnorodnosti svarnykh soedinenij metallicheskih konstrukcij stroitel'nyh mashin [Some features of evaluation of structural and mechanical heterogeneity of welded joints of metal structures of construction machines]. *Vesnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2015; 4 (51): 123-127. (in Russian)

10. Mylnikov V.V. Vliyanie chastoty nagruzheniya na ustalost' konstrukcionnykh materialov [Influence of loading frequency on fatigue of structural materials]. *Nauka i tekhnika – Science and Engineering*. 2019; 5: 52-55. (in Russian)

11. Prokhorov V.Yu., Bykov V.V. Puti povysheniya dolgovechnosti i iznosostojkosti podshipnika skol'zheniya navesnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya [Ways to increase the durability and wear resistance of the sliding bearing of mounted technological equipment]. *NiKa*. 2017; 1: 71-74. (in Russian)

12. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Trunova E.V. Vliyanie termociklicheskoj obrabotki na strukturnye izmeneniya plasticheski deformirovannykh svarnykh soedinenij metallicheskih konstrukcij stroitel'nykh mashin [Influence of thermocyclic processing on structural changes of plastically deformed welded joints of metal structures of construction machines]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2016; 2 (55): 174-180. (in Russian)

13. Bezlyudko G.Ya., Muzhitskiy V.F., Popov B.E. Magnitnyj kontrol' (po koercitivnoj sile) NDS i ostatochnogo resursa stal'nykh MK [Magnetic control (by coercive force) VAT and residual resource of steel MK]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Factory laboratory. Diagnostics of materials*. 1999; 9 (65): 53-57. (in Russian)

14. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Kuz'min O.V., Trunova E.V., Scherbakov A.P. Vliyanie termicheskoj i termociklicheskoj obrabotki na mekhanicheskie svoystva konstrukcionnykh staley [Influence of thermal and thermocyclic treatment on the mechanical properties of structural steels]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2018; 1 (66): 128-133. (in Russian)

15. Zajtsev A.I. *Perspektivnye napravleniya razvitiya metallurgii i materialovedeniya stali* [Promising areas of development of metallurgy and materials science of steel]. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informacii. – Journal of Iron and Steel. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2019; 75 (4): 417-426. (in Russian)

16. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Trunova E.V., Korneeva E.A., Shcherbakov 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]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2016; 6 (59): 194-199. (in Russian)

17. Morrison W. B. Superplasticity of low-alloy steels. *ASM Transactions Quarterly*. 1968; 61(3): 423-434.

18. Vedyakov I.I., Odesskiy P.D. *Sovremennye otechestvennye standarty i voprosy rasshireniya primeniya metallicheskih konstrukcij v stroitel'stve* [Modern domestic standards and issues of expanding the use of metal structures in construction]. *Vestnik NIC "Stroitel'stvo" – Bulletin of SIC "Construction"*. 2019; 3 (22): 42-53. (in Russian)

19. Gordienko V.E., Abrosimova A.A., Trunova E.V. Vliyanie termociklicheskoj obrabotki na strukturnye izmeneniya plasticheski deformirovannykh svarnykh soedinenij metallicheskih konstrukcij stroitel'nykh mashin [Influence of thermocyclic treatment on structural changes of plas-

tically deformed welded joints of metal structures of construction machines]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2016; 2 (55): 174-180. (in Russian)

20. Vedyakov I.I., Odesskiy P.D., Gurov S.V. Obespechenie prochnosti svarnykh soedinenij dlya unikal'nykh konstrukcij iz prokata bol'shix tolshchin povyshennoj i vysokoj prochnosti [Ensuring the strength of welded joints for unique structures made of rolled products of large thicknesses increased and high strength]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij – Construction mechanics and calculation of structures*. 2018; 2 (277): 68-75. (in Russian)

21. Gustov Yu.I., Orekhov A.A. Issledovanie konstrukcionno-tekhnologicheskikh i ekspluatacionnykh pokazatelej stroitel'noj tekhniki [Research of structural-technological and operational indicators of construction equipment]. *Izvestiya KazGASU – News of the University*. 2014; 4 (30): 19-24. (in Russian)

22. Mukhametshina R.M. Vlijanie klimaticheskikh faktorov na svoystva materialov i nadezhnost' dorozhno-stroitel'nykh 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. (in Russian)

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

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

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Щербakov Александр Павлович (г. Санкт-Петербург) – аспирант, ORCID.org/0000-0002-2454-7751, Scopus Author ID 57212375284, Researcher ID AAP-8095-2020, ассистент кафедры судебных экспертиз ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, тел. +79675912967, e-mail: shurbakov.aleksandr@yandex.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

УДК 625.08

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-676-688>

ЗАТРАТЫ ЭНЕРГИИ НА РЕЗАНИЕ ГРУНТА КОВШАМИ АГРЕГАТА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕГО СЛОЯ АВТОДОРОГИ

В.А. Николаев
ФГБОУ ВО «ЯТУ»,
г. Ярославль, Россия
nikolaev53@inbox.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Для решения проблемы ускорения строительства автодорог, повышения их качества целесообразно использовать агрегат непрерывного действия для формирования подстилающего слоя. В общем объёме затрат энергии на строительство дорог существенную долю занимают работы, направленные на резание и транспортирование грунта. Рабочие органы существующих технических средств осуществляют преимущественно энергозатратное резание грунта, которое теоретически можно уподобить резанию пуансоном. Затраты энергии на резание грунта можно существенно уменьшить путём применения резания лезвиями. В ковше агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог предусмотрено использование рабочих органов, осуществляющих резание грунта лезвиями ножей. Рассмотрен процесс заполнения ковша отрезанным грунтом, силы, приложенные к ковшу, и общие объёмные затраты энергии на резание грунта ковшами агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя.

Методика исследования. Приведена методика построений для выявления кинематики заполнения ковша отрезанным грунтом. Дана методика расчёта: пути грунта по днищу корпуса ковша при его заполнении; результирующих сил проекций сил в продольно-вертикальной, поперечно-вертикальной и горизонтальной плоскости, приложенных к ковшу; моментов, приложенных к ковшу в продольно-вертикальной и горизонтальной плоскости, когда ковш пустой и полный. Приведены формулы вычисления суммарной энергии на перемещение ковша при резании грунта без учёта затрат энергии на процесс резания и определения общих затрат энергии на резание грунта объёмом один кубический метр ковшами агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог.

Результаты. На основе разработанной методики рассчитан условный путь грунта по днищу корпуса ковша при его заполнении, выявлены результирующие силы проекций сил в продольно-вертикальной, поперечно-вертикальной и горизонтальной плоскости, приложенных к ковшу. Определены моменты, приложенные к ковшу в продольно-вертикальной и горизонтальной плоскости, когда ковш пустой и полный. Вычислена суммарная энергия на перемещение ковша при резании грунта без учёта затрат энергии на процесс резания. Определены общие затраты энергии на резание грунта объёмом один кубический метр ковшами агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог.

Заключение. В ходе заполнения ковша агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог отрезанным грунтом происходит скручивание и сдвиг отрезанного пласта, которые способствуют его разрушению на фрагменты. В поперечно-вертикальной плоскости ковш уравновешен. Момент, приложенный к ковшу в продольно-вертикальной плоскости, уравновешивается элементами конструкции агрегата. Суммарная энергия на перемещение ковша при резании грунта, без учёта затрат энергии на процесс резания, включает затраты энергии: на ускорение грунта ковшем, на преодоление трения нижней плоскости ковша о грунт, на дополнительное горизонтальное усилие для перемещения ковша, обусловленное трением в элементах конструкции. Она составляет $u_k \approx 13$ кДж/м³. Теоретически обоснованы общие затраты энергии на резание грунта объёмом один кубический метр ковшами агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог $u_{k-гр} \approx 109$ кДж/м³.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автомобильная дорога, агрегат непрерывного действия, грунт, проекции сил в продольно-вертикальной плоскости, проекции сил в поперечно-вертикальной плоскости, проекции сил в горизонтальной плоскости, затраты энергии.

Поступила 13.11.20, принята к публикации 25.12.2020.

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: В.А. Николаев. Затраты энергии на резание грунта ковшами агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодороги. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-676-688>

© Николаев В.А.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-676-688>

ENERGY EXPENDITURE ON GROUND CUTTING BY CONTINUOUS ACTION BUCKETS TO FORM THE UNDERLYING LAYER OF THE ROAD

Vladimir A. Nikolaev,
Yaroslavl Technical University,
Yaroslavl, Russia
nikolaev53@inbox.ru

ABSTRACT

Introduction. To solve the problem of accelerating the construction of roads, improving their quality, it is advisable to use a continuous action unit to form a underlying layer. In general, energy costs for the construction of roads are a significant share occupied by work aimed at cutting and transporting the ground. The working bodies of existing technical means carry out mainly energy-intensive cutting of the ground, which theoretically can be likened to cutting a punch. The energy costs of ground cutting can be significantly reduced by the use of blade cutting. In the bucket of the continuous action unit to form a underlying layer of roads provides the use of working bodies, cutting the ground with blades of knives. The process of filling the bucket with cut soil, the forces attached to the bucket, and the total amount of energy spent on cutting the ground with the buckets of the continuous action unit to form the underlying layer are considered.

The method of research. The method of constructions to detect the kinematics of filling the bucket with the cut ground is given. The method of calculation is given: the path of the ground on the bottom of the bucket case when it is filled; the resulting force of force projections in the longitudinal-vertical, cross-vertical and horizontal plane attached to the bucket; moments attached to the bucket in a longitudinal-vertical and horizontal plane, when the bucket is empty and full. The formulas for calculating the total energy on the movement of the bucket when cutting the ground without taking into account the energy costs of the cutting process and determining the total energy costs of cutting the ground by one cubic meter of continuous action buckets to form the underlying layer of roads are given.

Results. On the basis of the developed method, the conditional path of the ground along the bottom of the bucket case was calculated, the resulting forces of force projections in the longitudinal-vertical, cross-vertical and horizontal plane attached to the bucket were revealed. The moments attached to the bucket in the longitudinal-vertical and horizontal plane, when the bucket is empty and full, have been determined. The total energy for moving the bucket during ground cutting is calculated without taking into account the energy costs of the cutting process. The total energy costs of cutting the ground by one cubic meter of continuous action buckets to form the underlying layer of roads have been determined.

Conclusion. During the filling of the bucket of the unit of continuous action to form the underlying layer of roads cut off soil is twisted and shift of the cut-off layer, which contribute to its destruction into fragments. In a cross-vertical plane, the bucket is balanced. The moment attached to the bucket in the longitudinal-vertical plane is balanced by elements of the structure of the unit. The total energy on moving the bucket when cutting the ground, without taking into account the energy costs of the cutting process, includes energy costs: to accelerate the ground with a bucket, to overcome the friction of the bottom plane of the bucket on the ground, to the additional horizontal force to move the bucket, caused by friction in the elements of the structure. It is $u_k \approx 13$ kJ/m³. Theoretically reasonable total energy costs for ground cutting of one cubic meter by the buckets of the continuous action unit to form the underlying layer of roads $[u]$ (k-gr) ≈ 109 kJ/m³.

KEYWORDS: Road, continuous action unit, ground, projection of forces in longitudinal-vertical plane, projection of forces in cross-vertical plane, projection of forces in horizontal plane, energy expenditure.

Submitted 13.11.20, revised 25.12.2020.

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: Vladimir A. Nikolaev. Energy expenditure on ground cutting by continuous action buckets to form the underlying layer of the road. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-676-688>

© Nikolaev V.A.



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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1) рассмотрен процесс заполнения ковша отрезанным грунтом;

2) выявлены проекции сил в продольно-вертикальной, поперечно-вертикальной и горизонтальной плоскости, приложенных к ковшу;

3) определены общие затраты энергии на резание ковшами одного кубического метра грунта.

ВВЕДЕНИЕ

Основной целью совершенствования технических средств строительства дорог является увеличение производительности труда в сочетании с уменьшением относительных затрат энергии на выполнение заданных функций. Циклические технические средства, занятые в строительстве дорог, не обеспечат реализацию этой цели. Для её реализации необходимы агрегаты непрерывного действия. Агрегат непрерывного действия для формирования подстилающего слоя [1, 2, 3] предназначен для увеличения производительности труда при строительстве автомобильных дорог и других объектов, для строительства которых необходимо снятие верхнего слоя грунта.

В общем объёме затрат энергии на строительство дорог существенную долю занимают работы, направленные на резание и транспортирование грунта. Рабочие органы существующих технических средств осуществляют преимущественно энергозатратное резание грунта, которое теоретически можно уподобить резанию пуансоном. Теоретические основы такого резания грунта весьма подробно рассмотрены [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27]. Затраты энергии на резание грунта можно существенно уменьшить путём применения резания лезвиями. В ковше агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог предусмотрено использование рабочих органов, осуществляющих резание грунта лезвиями ножей [1, 2, 3]. Отрезанный грунт поступает в ковши. Рассмотрим процесс заполнения ковша отрезанным грунтом, силы, приложенные к ковшу, и общие объёмные затраты энергии на резание грунта ковшами.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Схема заполнения ковша грунтом показана на рисунке 1. Так как движение относительно, можно представить, что не ковш воздействует на грунт, а пласт грунта, подрезанный кон-

сольным ножом, шириной $\delta = 30$ мм, высотой $h_{сл} = 250$ мм [1, 2, 3] воздействует на ковш. Лезвие правого ножа отрезает пласт от точки *A* до точки *B* (рисунок 1, а, б). Сечение отрезаемого пласта *ABCD*. От воздействия фаски правого ножа грунт получит горизонтальную скорость в поперечном направлении $v_{конгор} = 0,556$ м/с [3]. На линии *BD* пласт подрезает правая (по ходу) сторона нижнего ножа. Пласт перелетит через нижний нож и с горизонтальной продольной скоростью $v_k = 1,686$ м/с [1] опустится на днище корпуса ковша, преодолев расстояние $s_d = 190$ мм. Отложив это расстояние от точки пересечения траектории частицы *C* с лезвием нижнего ножа (см. рисунок 1, б), получим точку *Q* касания краем пласта днища корпуса ковша. Проведя луч из точки *Q*, параллельный лезвию нижнего ножа, получим точки *P*, *N*, *M*, соответствующие касанию пластом днища корпуса ковша. Спроецировав их на вид спереди (см. рисунок 1, а), получим условное сечение *MNQP* пласта в момент касания днища корпуса ковша. Это сечение пласта грунта следует считать условным, так как он, как правило, распадётся на фрагменты. В момент касания днища корпуса ковша условный пласт будет иметь угол наклона к горизонтали $72,6^\circ$. В связи с этим пласт будет (по ходу ковша) скручиваться против часовой стрелки.

Спроецировав точки *N* и *Q* на вид слева (рисунок 1, в), получим угол наклона $86,8^\circ$ условного сечения к горизонтали в продольно-вертикальной плоскости, то есть произойдёт сдвиг пласта. Скручивание и сдвиг пласта в процессе заполнения ковша способствуют его разрушению на фрагменты. Так как пласт перелетит через нижний нож, а предельная глубина снятия слоя грунта $h_{сл} = 250$ мм [1, 2, 3], возникает необходимость увеличения высоты ковша до 300 мм, чтобы пласт в полёте не задевал верхнюю стенку корпуса ковша.

Теперь допустим, что грунт изначально неподвижен, а ковш перемещается. Определим энергию, необходимую для ускорения грунта ковшом. Допустим, ковш только начал резание грунта. Пласт грунта, перелетевший через нижний нож (см. рисунок 1, б), после касания днища корпуса ковша продолжит скользить по нему до упора в заднюю стенку корпуса ковша. Из рисунка путь пласта грунта до задней стенки корпуса ковша варьируется от 252 мм до 272 мм. Примем средний путь грунта до задней стенки корпуса ковша $s_{гп} = 262$ мм = 0,262 м. За счёт силы трения о днище корпуса ковша грунт будет ускоряться. Представим грунт, объёмом один кубический

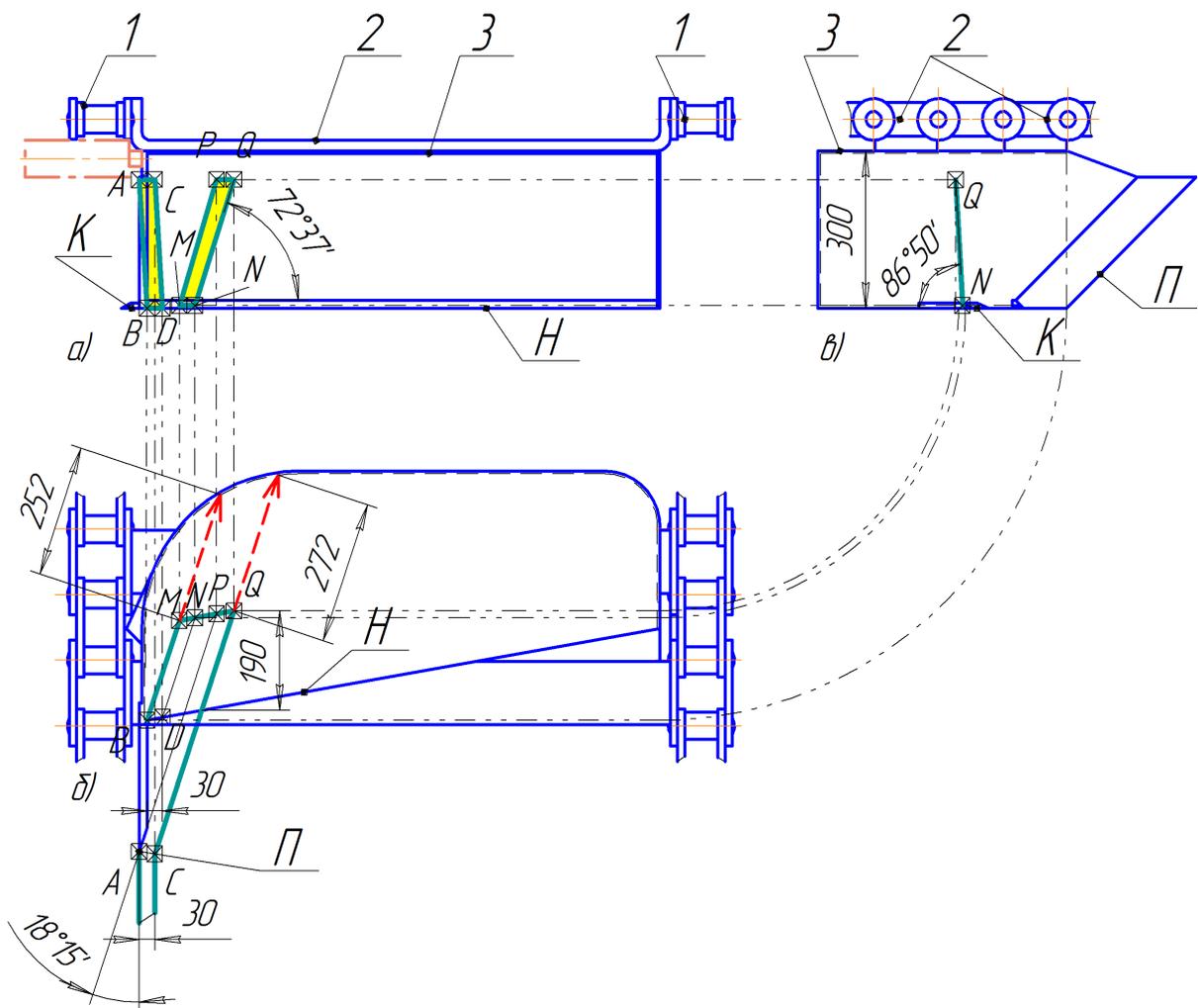


Рисунок 1 – Схема заполнения ковша грунтом: а – вид спереди; б – вид сверху; в – вид слева; 1 – цепь, 2 – скоба, 3 – корпус ковша

Figure 1 – The ladle-filling scheme with soil: a – front view; b – top view; c – view from the left; 1 – chain, 2 – staple, 3 – bucket case

метр, материальной точкой массой $m_{гр}$. Условная нормальная реакция дна ковша равна силе тяжести этого грунта

$$G_{гр} = gm_{гр}. \quad (1)$$

Условная суммарная сила трения грунта о днище ковша

$$F_{тр} = fG_{гр}. \quad (2)$$

Ускорение грунта днищем ковша

$$a_{гр-д} = \frac{F_{тр}}{m_{гр}}. \quad (3)$$

Допустим, начальная горизонтальная скорость грунта равна нулю. Конечная скорость грунта v_k . Если бы грунт ускорялся только за

счёт силы трения о днище ковша, то это ускорение произошло бы за время

$$\tau_{гр-д} = \frac{v_k}{a_{гр-д}}. \quad (4)$$

Условный путь грунта по днищу ковша за это время

$$S_{гр-д} = \frac{a_{гр-д}\tau_{гр-д}^2}{2}. \quad (5)$$

Текущая сила трения грунта о днище ковша при его стабильном поступлении в ковш обусловлена массой грунта в ковше. Условный объём грунта на стадии его ускорения в ковше равен произведению ширины и высоты пласта грунта, поступающего в ковш на условный путь грунта по днищу ковша

$$V_{гр-д} = \delta h_{сл} S_{гр-д}. \quad (6)$$

Сила тяжести этого грунта

$$G_{гр-д} = gm_{гр-д} = g\rho V_{гр-д}. \quad (7)$$

Сила трения грунта о днище корпуса ковша при стабильном поступлении грунта в ковш

$$F_{тр-д} = fG_{гр-д}. \quad (8)$$

Весь грунт ускоряется только за счёт силы трения о днище корпуса ковша. Затраты энергии на ускорение грунта ковшом при резании грунта объёмом один кубический метр

$$u_{угр-д} = \frac{m_{гр} v_k^2}{2}. \quad (9)$$

Энергия, необходимая для преодоления трения нижней плоскости ковша о грунт, зависит от силы тяжести ковша G_k . Кроме того, на пустой ковш по оси z действуют силы [1, 2, 3]: $F_{конcz}$, $F_{прz}$, $F_{нз}$. Общая сумма сил, действующих на пустой ковш по оси z ,

$$F_{kz} = G_k + F_{конcz} - F_{прz} + F_{нз}. \quad (10)$$

Общая сумма сил, действующих на ковш по оси z , должна быть направлена вниз для обеспечения устойчивости хода ковша по глубине. Ей равна нормальная реакция грунта на нижнюю плоскость пустого ковша. Тогда сила трения нижней плоскости пустого ковша о грунт

$$F_{тк} = fF_{kz}. \quad (11)$$

Сила, необходимая для преодоления трения нижней плоскости ковша о грунт, не являлась бы постоянной, а увеличивалась по мере наполнения ковша. Она создавала бы дополнительное сопротивление перемещению ковша, увеличивала бы затраты энергии на это перемещение. Расчётная сила тяжести грунта в ковше

$$G_{гр} = g\rho k_3 V_k, \quad (12)$$

где ρ – исходная плотность грунта; k_3 – коэффициент, учитывающий заполнение ковша; V_k – расчётный объём ковша.

Для уменьшения затрат энергии на перемещение ковшей, наполненных грунтом, внесём изменения в конструктивную схему. Присоединим дополнительно к правой стенке корпуса каждого ковша опорные катки, частич-

но воспринимающие избыточную вертикальную нагрузку, обусловленную силой тяжести ковшей и грунта в ковшах (на рисунке 1, а показано штрих-пунктирной линией). Кроме того, установим поддерживающие планки, управляемые гидроцилиндрами. Возможны и другие технические решения. Полости гидроцилиндров сообщаются с гидропневмоаккумуляторами. Примем, что гидропневмоаккумуляторы настроены на такое давление, чтобы общая сумма сил, действующих на ковш по оси z , была $F_{\Sigma kz}$. Тогда сила трения нижней плоскости ковша о грунт

$$F_{тк} = fF_{\Sigma kz}. \quad (13)$$

Затраты энергии на преодоление трения нижней плоскости ковша о грунт при резании грунта объёмом один кубический метр

$$u_{тк} = F_{тк} S_k. \quad (14)$$

Сила трения отрезанного грунта о днище корпуса ковша и сила трения нижней плоскости ковша о грунт направлены горизонтально. Горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения корпуса ковша,

$$F_{\Sigma kxx} = F_{тр-д} + F_{тк}. \quad (15)$$

Горизонтальная поперечная сила незначительна, поэтому ею можно пренебречь.

На рисунках 2, 3, 4 показаны схемы проекций сил в продольно-вертикальной, поперечно-вертикальной и горизонтальной плоскости, приложенных к ковшу. Минимальная нагрузка на опорные катки и поддерживающие планки

$$F_{kzmin} = F_{kz} - F_{\Sigma kz}. \quad (16)$$

Максимальная нагрузка на опорные катки и поддерживающие планки

$$F_{kzmax} = F_{kz} + G_{гр} - F_{\Sigma kz}. \quad (17)$$

Распределение вертикальной нагрузки (см. рисунок 2): на правые (по ходу ковша) опорные катки и поддерживающие планки $0,472F_{kzmin}$, на левые поддерживающие планки $0,528F_{kzmin}$. Для установки глубины снимаемого слоя путём перемещения правых опорных катков в правой стенке корпуса ковша имеются прорези Pr .

Если коэффициент трения качения между поддерживающими планками и цепями, опорными катками и грунтом, минимальное дополнительное горизонтальное усилие для перемещения ковша

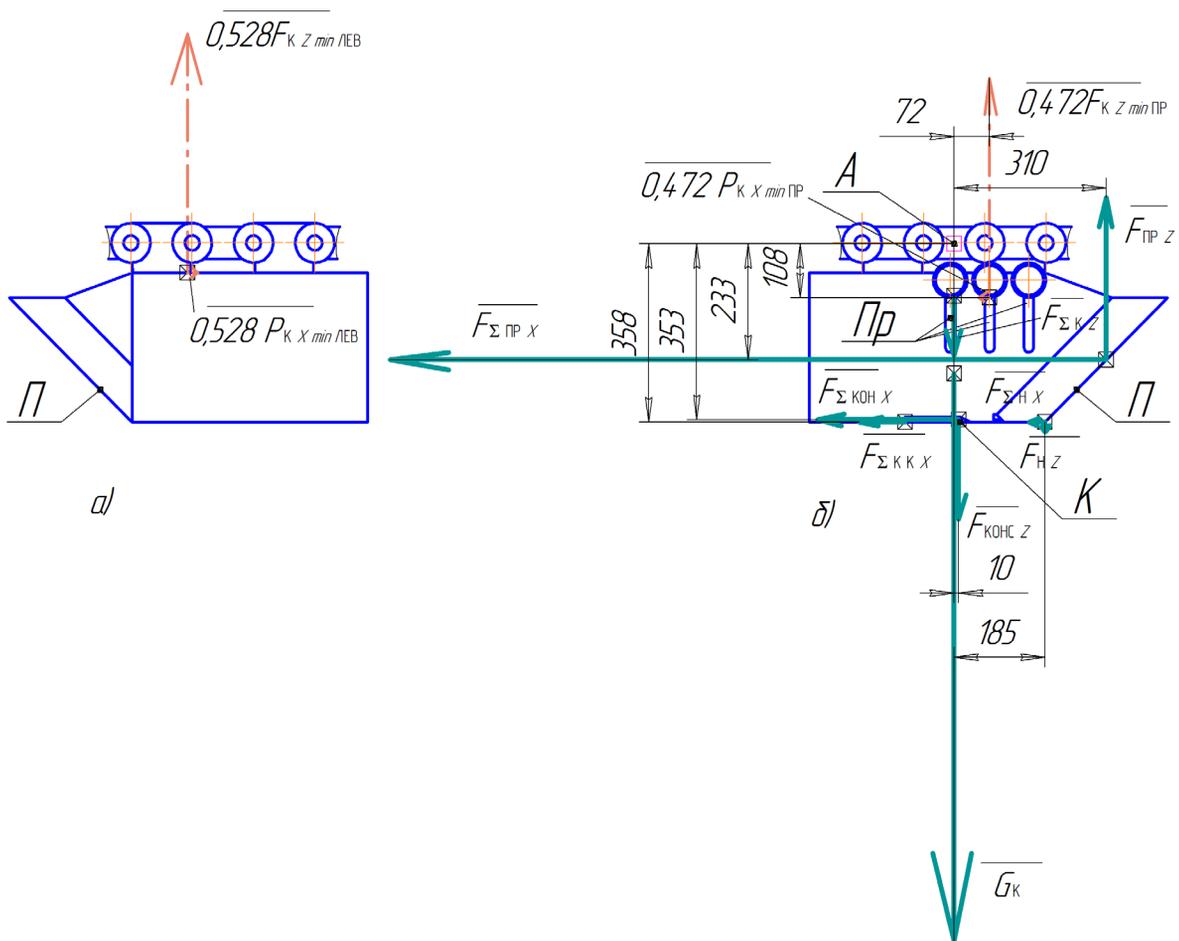


Рисунок 2 – Схема проекций сил в продольно-вертикальной плоскости, приложенных к ковшу:
а – вид с правой стороны; б – вид слева

Figure 2 – Force projection scheme in the longitudinal-vertical plane attached to the bucket:
a – view on the right side; b – View from the left

$$P_{кхmin} = f_k F_{кхmin} \quad (18)$$

Максимальное дополнительное горизонтальное усилие для перемещения ковша

$$P_{кхmax} = f_k F_{кхmax} \quad (19)$$

Среднее дополнительное горизонтальное усилие для перемещения ковша $P_{кхср}$. Допустим, что дополнительное горизонтальное усилие для перемещения ковша распределено на цепи пропорционально нагрузке $F_{кz}$:

$$P_{кхminпр} = 0,472 \cdot P_{кхmin} \quad (20)$$

$$P_{кхminлев} = 0,528 \cdot P_{кхmin} \quad (21)$$

$$P_{кхmaxпр} = 0,472 \cdot P_{кхmax} \quad (22)$$

$$P_{кхmaxлев} = 0,528 \cdot P_{кхmax} \quad (23)$$

Затраты энергии на дополнительное горизонтальное усилие для перемещения ковша при резании грунта объёмом один кубический метр

$$u_{доп} = P_{кхср} S_k \quad (24)$$

Суммарная горизонтальная поперечная сила, действующая на ковш и направленная по ходу ковша вправо,

$$F_{ку} = F_{пру} - F_{консу} \quad (25)$$

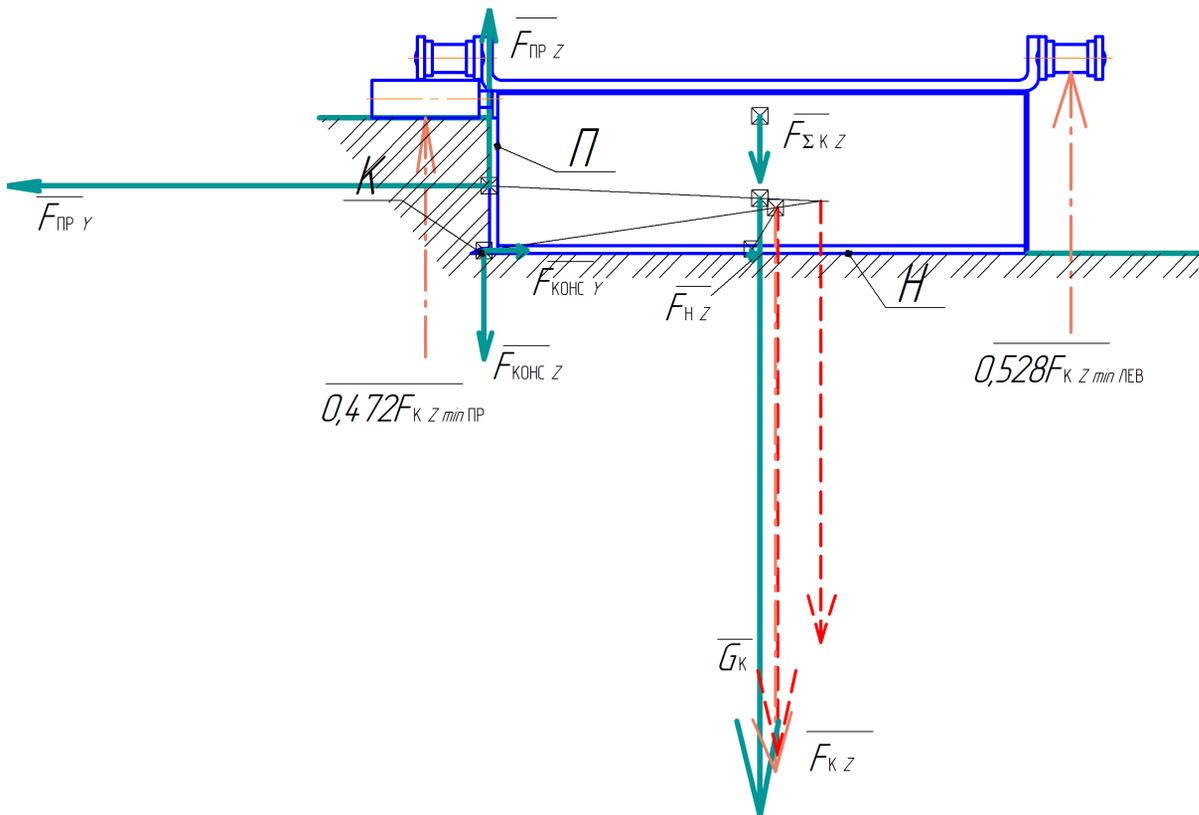


Рисунок 3 – Схема проекций сил в поперечно-вертикальной плоскости, приложенных к ковшу

Figure 3 – A scheme of projections of forces in a cross-vertical plane attached to the bucket

Суммарная минимальная горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения ковша,

$$F_{kx\min} = F_{\Sigma\text{конх}} + F_{\Sigma\text{прх}} + F_{\Sigma\text{нх}} + F_{\Sigma\text{ккх}} + P_{kx\min} \quad (26)$$

Суммарная максимальная горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения ковша,

$$F_{kx\max} = F_{\Sigma\text{конх}} + F_{\Sigma\text{прх}} + F_{\Sigma\text{нх}} + F_{\Sigma\text{ккх}} + P_{kx\max} \quad (27)$$

Суммарная средняя горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения ковша,

$$F_{kx\text{ср}} = F_{\Sigma\text{конх}} + F_{\Sigma\text{прх}} + F_{\Sigma\text{нх}} + F_{\Sigma\text{ккх}} + P_{kx\text{ср}} \quad (28)$$

Момент, приложенный к ковшу в горизонтальной плоскости, когда ковш пустой:

$$M_{\Gamma} = F_{\text{пру}} \cdot 0,377 + F_{\Sigma\text{прх}} \cdot 0,485 + F_{\Sigma\text{конх}} \cdot 0,495 - F_{\text{консу}} \cdot 0,109 - F_{\Sigma\text{ккх}} \cdot 0,005 - F_{\Sigma\text{нх}} \cdot 0,02 + P_{kx\min\text{пр}} \cdot 0,605 - P_{kx\text{лев}} \cdot 0,632. \quad (29)$$

Момент, приложенный к ковшу в горизонтальной плоскости, когда ковш полный, немного меньше. Этот момент уравнивают цепи, к которым присоединён ковш. Точка А (см. рисунок 2) является условным центром вращения ковша в проекции на продольно-вертикальную плоскость. Момент, приложенный к ковшу в продольно-вертикальной плоскости, когда ковш пустой:

$$M_{\text{вmin}} = F_{\Sigma\text{прх}} \cdot 0,223 + F_{\Sigma\text{конх}} \cdot 0,353 + F_{\Sigma\text{ккх}} \cdot 0,358 + F_{\Sigma\text{нх}} \cdot 0,353 + F_{\text{нз}} \cdot 0,185 + F_{\text{консз}} \cdot 0,01 - F_{\text{прз}} \cdot 0,31 - F_{kz\min} \cdot 0,072 + P_{kx\min\text{пр}} \cdot 0,108 + P_{kx\min\text{лев}} \cdot 0,358. \quad (30)$$

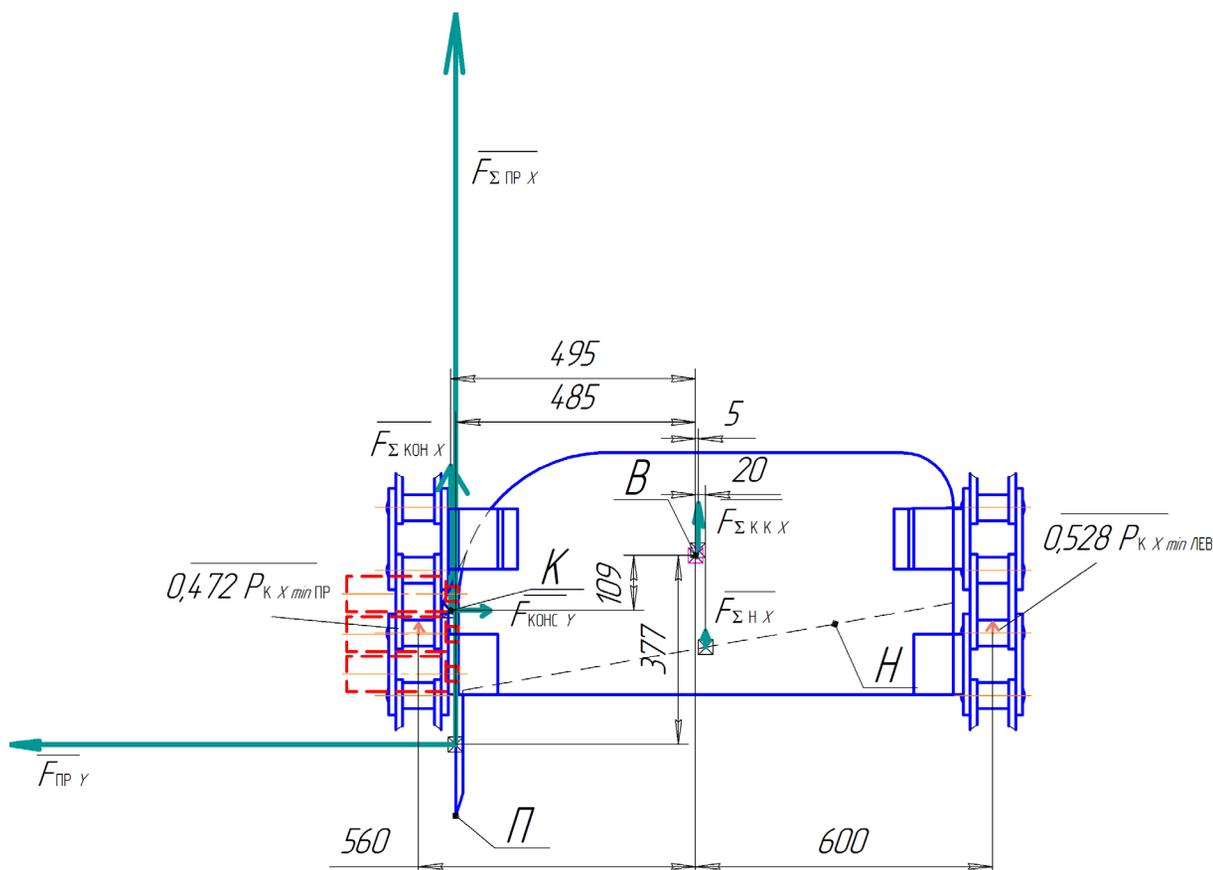


Рисунок 4 – Схема проекций сил в горизонтальной плоскости, приложенных к ковшу

Figure 4 – A diagram of force projections in the horizontal plane attached to the bucket

Момент, приложенный к ковшу в продольно-вертикальной плоскости, когда ковш полный:

$$\begin{aligned}
 M_{vmin} = & F_{\Sigma пр.х} \cdot 0,223 + F_{\Sigma кон.х} \cdot 0,353 + \\
 & + F_{\Sigma к.к.х} \cdot 0,358 + F_{\Sigma н.х} \cdot 0,353 + \\
 & + F_{\Sigma пр.у} \cdot 0,185 + F_{\Sigma кон.у} \cdot 0,01 - \\
 & - F_{\Sigma пр.у} \cdot 0,31 - F_{\Sigma к.к.у} \cdot 0,072 + \\
 & + P_{кх max пр} \cdot 0,108 + P_{кх max лев} \cdot 0,358.
 \end{aligned} \quad (31)$$

Суммарная энергия на перемещение ковша при резании грунта объемом один кубический метр

$$u_k = u_{угр-д} + u_{тк} + u_{доп}. \quad (32)$$

Общие затраты энергии на резание грунта объемом один кубический метр ковшами состоят из суммарной энергии, необходимой для резания грунта консольным ножом, суммарной

энергии, необходимой для резания грунта правым ножом, суммарной энергии, необходимой для резания грунта нижним ножом и суммарной энергии на перемещение ковша:

$$u_{к-гр} = u_{конс} + u_{пр} + u_{н} + u_k. \quad (33)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Допустим, масса грунта объемом один кубический метр $m_{гр} = 1600$ кг. Условная нормальная реакция дна корпуса ковша равна силе тяжести этого грунта (1).

$$G_{гр} = 9,8 \cdot 1600 = 15680 \text{ Н}.$$

Допустим, коэффициент трения грунта о сталь $f = 0,5$. Условная суммарная сила трения грунта о дно корпуса ковша (2):

$$F_{тгр} = 0,5 \cdot 15680 = 7840 \text{ Н}.$$

Ускорение грунта днищем корпуса ковша (3):

$$a_{\text{гр-д}} = \frac{7840}{1600} = 4,9 \text{ м/с}^2.$$

Допустим, начальная горизонтальная скорость грунта равна нулю. Конечная скорость грунта [1] $v_k = 1,686 \text{ м/с}$. Если бы грунт ускорился только за счёт силы трения о днище корпуса ковша, то это ускорение произошло бы за время (4):

$$\tau_{\text{гр-д}} = \frac{1,686}{4,9} = 0,344 \text{ с}.$$

Условный путь грунта по днищу корпуса ковша за это время (5):

$$s_{\text{гр-д}} = \frac{4,9 \cdot 0,344^2}{2} = 0,289 \text{ м}.$$

Так как условный путь грунта по днищу корпуса ковша превышает средний путь грунта до задней стенки корпуса ковша, то есть $s_{\text{гр-д}} > s_{\text{гр}}$, то грунт будет скользить по днищу корпуса ковша до упора в заднюю стенку корпуса ковша. Однако, поскольку разность этих величин незначительна, удара грунта о заднюю стенку корпуса ковша в период начала его заполнения не произойдёт. При дальнейшем перемещении ковша расположенный в нём грунт будет смягчать воздействие на ковш вновь поступающего грунта.

Условный объём грунта на стадии ускорения в ковше (6):

$$V_{\text{гр-д}} = 0,03 \cdot 0,25 \cdot 0,289 = 0,0021675 \text{ м}^3.$$

Сила тяжести этого грунта (7):

$$G_{\text{гр-д}} = 9,8 \cdot 1600 \cdot 0,0021675 \approx 34 \text{ Н}.$$

Сила трения грунта о днище корпуса ковша при стабильном поступлении грунта в ковш (8):

$$F_{\text{тр-д}} = 0,5 \cdot 34 = 17 \text{ Н}.$$

Затраты энергии на ускорение грунта ковшем при резании грунта объёмом один кубический метр (9):

$$u_{\text{гр-д}} = \frac{1600 \cdot 1,686^2}{2} = 2274 \text{ Дж/м}^3.$$

Масса корпуса ковша из конструктивной

компоновки 46 кг. Масса консольного ножа – 0,3 кг, масса правого ножа – 2 кг, масса нижнего ножа – 9,9 кг. Общая масса ковша $m_k = 58,2 \text{ кг}$. Сила тяжести ковша $G_k = 570 \text{ Н}$. Кроме того, на пустой ковш по оси z действуют силы [1, 2, 3]: $F_{\text{конс}z} = 99,5 \text{ Н}$, $F_{\text{пр}z} = 163 \text{ Н}$, $F_{\text{н}z} = 11,5 \text{ Н}$.

Общая сумма сил, действующих на пустой ковш по оси z , (10):

$$F_{\text{к}z} = 570 + 99,5 - 163 + 11,5 = 518 \text{ Н}.$$

Сила трения нижней плоскости пустого ковша о грунт (11):

$$F_{\text{тк}} = 0,5 \cdot 518 = 259 \approx 260 \text{ Н}.$$

Допустим, исходная плотность грунта $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$; примем коэффициент, учитывающий заполнение ковша, $k_3 = 0,8$; расчётный объём ковша, $V_k = 0,086 \text{ м}^3$ [1]. Расчётная сила тяжести грунта в ковше (12):

$$G_{\text{гр}} = 9,8 \cdot 1600 \cdot 0,8 \cdot 0,086 \approx 1080 \text{ Н}.$$

Допустим, что гидропневмоаккумуляторы настроены на такое давление, чтобы общая сумма сил, действующих на ковш по оси z , была $F_{\Sigma \text{к}z} = 60 \text{ Н}$. Тогда сила трения нижней плоскости ковша о грунт (13):

$$F_{\text{тк}} = 0,5 \cdot 60 = 30 \text{ Н}.$$

Затраты энергии на преодоление трения нижней плоскости ковша о грунт при резании грунта объёмом один кубический метр (14):

$$u_{\text{тк}} = 30 \cdot 133 = 3990 \text{ Дж/м}^3.$$

Сила трения грунта о днище корпуса ковша и сила трения нижней плоскости ковша о грунт направлены горизонтально. Горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения корпуса ковша по грунту, (15):

$$F_{\Sigma \text{кк}x} = 17 + 30 = 47 \text{ Н}.$$

Минимальная нагрузка на опорные катки и поддерживающие планки (16):

$$F_{\text{к}z \text{ min}} = 518 - 60 = 458 \text{ Н}.$$

Максимальная нагрузка на опорные катки и поддерживающие планки (17):

$$F_{\text{к}z \text{ max}} = 518 + 1080 - 60 = 1538 \text{ Н}.$$

Минимальная нагрузка на правые опорные катки и поддерживающие планки

$F_{kzminпр} = 216\text{Н}$, на левые поддерживающие планки $F_{kzminлев} = 242\text{Н}$. Максимальная нагрузка на правые опорные катки и поддерживающие планки $F_{kzmaxпр} = 726\text{Н}$, на левые поддерживающие планки $F_{kzmaxлев} = 812\text{Н}$. Примем коэффициент трения качения между поддерживающими планками и цепями, опорными катками и грунтом $f_k = 0,05$. Тогда минимальное дополнительное горизонтальное усилие для перемещения ковша (18):

$$P_{kxmin} = 0,05 \cdot 458 \approx 23\text{Н}.$$

Максимальное дополнительное горизонтальное усилие для перемещения ковша (19):

$$P_{kxmax} = 0,05 \cdot 1538 \approx 77\text{Н}.$$

Среднее дополнительное горизонтальное усилие для перемещения ковша $P_{kxср} = 50\text{Н}$. Допустим, что дополнительное горизонтальное усилие для перемещения ковша распределено на цепи пропорционально нагрузке F_{kz} (20–23):

$$P_{kxминпр} = 0,472 \cdot 23 \approx 11\text{Н}.$$

$$P_{kxминлев} = 0,528 \cdot 23 \approx 12\text{Н}.$$

$$P_{kxмахпр} = 0,472 \cdot 77 \approx 36\text{Н}.$$

$$P_{kxмахлев} = 0,528 \cdot 77 \approx 41\text{Н}.$$

Затраты энергии на дополнительное горизонтальное усилие для перемещения ковша при резании грунта объёмом один кубический метр (24):

$$u_{доп} = 50 \cdot 133 = 6650 \text{ Дж/м}^3.$$

Суммарная горизонтальная поперечная сила, действующая на ковш и направленная по ходу ковша вправо, (25):

$$F_{ку} = 454 - 40 = 414\text{Н}.$$

Она прижимает ковш к стенке неподрезанного грунта, придавая устойчивость ходу ковша. Суммарная минимальная горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения ковша, (26):

$$F_{kxmin} = 144 + 730 + 16 + 47 + 23 = 960\text{Н}.$$

Суммарная максимальная горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения ковша, (27):

$$F_{kxmax} = 144 + 730 + 16 + 47 + 77 = 1014\text{Н}.$$

Суммарная средняя горизонтальная продольная сила, необходимая для перемещения ковша, (28):

$$F_{kxср} = 144 + 730 + 16 + 47 + 50 = 987\text{Н}.$$

В поперечно-вертикальной плоскости ковш уравновешен (см. рисунок 3). Точка В является условным центром масс грунта в проекции на горизонтальную плоскость (см. рисунок 4). Момент, приложенный к ковшу в горизонтальной плоскости, когда ковш пустой (29):

$$\begin{aligned} M_{\Gamma} &= 454 \cdot 0,377 + 730 \cdot 0,485 + \\ &+ 144 \cdot 0,495 - 40 \cdot 0,109 - \\ &- 47 \cdot 0,005 - 16 \cdot 0,02 + 11 \cdot 0,560 - \\ &- 12 \cdot 0,600 = 591\text{Нм}. \end{aligned}$$

Момент, приложенный к ковшу в продольно-вертикальной плоскости, когда ковш пустой (30):

$$\begin{aligned} M_{Вmin} &= 730 \cdot 0,223 + 144 \cdot 0,353 + \\ &+ 47 \cdot 0,358 + 16 \cdot 0,353 + \\ &+ 11,5 \cdot 0,185 + 99,5 \cdot 0,01 - \\ &- 163 \cdot 0,31 - 458 \cdot 0,072 + \\ &+ 11 \cdot 0,108 + 12 \cdot 0,358 \approx 152\text{Нм}. \end{aligned}$$

Момент, приложенный к ковшу в продольно-вертикальной плоскости, когда ковш полный (31):

$$\begin{aligned} M_{Вmin} &= 730 \cdot 0,223 + 144 \cdot 0,353 + \\ &+ 47 \cdot 0,358 + 16 \cdot 0,353 + \\ &+ 11,5 \cdot 0,185 + 99,5 \cdot 0,01 - \\ &- 163 \cdot 0,31 - 1538 \cdot 0,072 + \\ &+ 36 \cdot 0,108 + 41 \cdot 0,358 \approx 67\text{Нм}. \end{aligned}$$

По мере наполнения ковша момент, приложенный к ковшу в продольно-вертикальной плоскости, уменьшается. Момент, приложенный к ковшу в продольно-вертикальной плоскости, уравновешивается преимущественно натяжением цепей, поддерживающими планками и частично опорными катками.

Суммарная энергия на перемещение ковша при резании грунта объёмом один кубический метр, без учёта затрат энергии на процесс резания, (32):

$$u_{к} = 2274 + 3990 + 6650 = 12917 \text{ Дж/м}^3.$$

Суммарная энергия, необходимая для резания грунта консольным ножом, правым но-

жом, нижним ножом была вычислена ранее [1, 2, 3]. Общие затраты энергии на резание грунта объёмом один кубический метр (33):

$$u_{к-гр} = 20000 + 71282 + 4740 + 12917 \approx 108840 \text{ Дж/м}^3.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе заполнения ковша агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог отрезанным грунтом происходит скручивание и сдвиг отрезанного пласта, которые способствуют его разрушению на фрагменты. В поперечно-вертикальной плоскости ковш уравновешен. Момент, приложенный к ковшу в продольно-вертикальной плоскости, уравновешивается элементами конструкции агрегата. Проекция сил в продольно-вертикальной плоскости, приложенных к ковшу, позволят определить суммарные силы тяги цепей.

Суммарная энергия на перемещение ковша, без учёта затрат энергии на процесс резания, включает затраты энергии: на ускорение грунта ковшом, на преодоление трения нижней плоскости ковша о грунт, на дополнительное горизонтальное усилие для перемещения ковша, обусловленное трением в элементах конструкции. Она составляет $u_k \approx 13 \text{ кДж/м}^3$. Теоретически обоснованные общие затраты энергии на резание грунта объёмом один кубический метр ковшами агрегата непрерывного действия для формирования подстилающего слоя автодорог $u_{к-гр} \approx 109 \text{ кДж/м}^3$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Николаев В.А. Анализ взаимодействия кромки лезвия консольного ножа с грунтом // Вестник СибАДИ, 2020. №2. С. 172-181.
3. Николаев В.А. Анализ взаимодействия правого ножа агрегата непрерывного действия с грунтом // Вестник СибАДИ, 2020. №4. С. 452-463.
4. Жук А.Ф. Теоретическое обоснование рациональной технологической схемы и параметров ротационного плуга. Сборник научных трудов «Теория и расчёт почвообрабатывающих машин». Т 120. Москва, Машиностроение, 1989. С. 14153.
5. Попов Г.Ф. Рабочие органы фрез. М.: Материалы НТС ВИСХОМ. ОНТИ ВИСХОМ, 1970. № 27. С. 490-497.
6. Карасёв Г.Н. Определение силы резания грунта с учётом упругих деформаций при разрушении // Строительные и дорожные машины. 2008. №4. С. 36-42.
7. Карнаухов А.И., Орловский С.Н. Определение затрат удельной энергии на процесс резания лесных почв торцевыми фрезами // Строительные и дорожные машины. 2010. №1. С. 20-2.
8. Кравец И.М. Определение критической глубины резания при комбинированном резании грунтов гидрофрезой // Строительные и дорожные машины. 2010. №5. С. 47-49.
9. Кириллов Ф.Ф. Детерминированная математическая модель временного распределения тягового усилия для многолезцовых рабочих органов землеройных машин // Строительные и дорожные машины. 2010. №11. С. 44-48.
10. Берестов Е.И. Влияние трения грунта по поверхности ножа на сопротивление резанию // Строительные и дорожные машины. 2010. №11. С. 34-38.
11. Вершинин А.В., Зубов В.С., Тюльнев А.М. Повышение эффективности дискофрезерных рабочих механизмов для разработки мерзлых грунтов // Строительные и дорожные машины. 2012. №8. С. 42-44.
12. Баловнев В.И., Нгуен З.Ш. Определение сопротивлений при разработке грунтов рыхлителем по интегральному показателю прочности // Строительные и дорожные машины. 2005. №3. С. 38-40.
13. Ryabets N., Kurzhner F. Weakening of frozen soils by means of ultra-high frequency energy. // Cold Regions Science and Technology. 2003. Vol. 36. P. 115-128.
14. Liu X., Liu P. Experimental research on the compressive fracture toughness of wing fracture of frozen soil. // Cold Regions Science and Technology. 2011. Vol. 65. P. 421-428.
15. Talalay P.G. Subglacial till and Bedrock drilling. // Cold Regions Science and Technology. 2013. Vol. 86. Pp. 142-166.
16. Sun X. АСТ-timely experimental study on meso-scopic damage development of frozen soil under triaxial shearing. // Rock and Soil Mechanics. 2005. №8. Pp. 150-163.
17. Li Q. Development of Frozen Soil Model. // Advances in Earth Science. 2006. №12. Pp. 96-103.
18. Atkinson J. The Mechanics of Soils and Foundations. CRC. Press. 2007. 448 p.
19. 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.
20. Нилов В.А., Фёдоров Е.В. Разработка грунта скрепером в условиях свободного резания // Строительные и дорожные машины. 2016. №2. С. 7-10.
21. Чмиль В.П. Насосно-аккумулятивный привод рыхлителя с автоматическим выбором угла резания // Строительные и дорожные машины. 2016. №11. С. 18-20.
22. Кабашев Р.А., Тургумбаев С.Д. Экспериментальные исследования процесса копания грунтов роторно-дисковыми рабочими органами под гидростатическим давлением // Вестник СибАДИ. 2016. №4. С. 23-28.

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

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

25. Сыромятников Ю.Н., Храмов И.С., Войнаш С.А. Гибкий элемент в составе рабочих органов роторной почвообрабатывающей рыхлительно-сепарирующей машины // Тракторы и сельхозмашины. 2018. №5. С. 32-39.

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

27. Драняев С.Б., Чаткин М.Н., Корявин С.М. Моделирование работы винтового Г-образного ножа почвообрабатывающей фрезы // Тракторы и сельхозмашины. 2017. №7. С. 13-19.

REFERENCES

1. Nikolayev V.A. Opredelenie skorosti sepej i razmerov plasta grunta, otrezaemogo kovshom agregata dlya udaleniya verhnego sloya grunta s podstilyushchego sloya avtodorogi [Determining the speed of chains and the size of the soil layer cut off by the bucket of the unit to remove the top layer of soil from the underlying layer of the road]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 1: 32-43. (in Russian)

2. Nikolayev V.A. Analiz vzaimodejstviya kromki lezviya konsol'nogo nozha s gruntom [Analysis of the interaction of the edge of the console knife blade with the soil]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 2: 172-181. (in Russian)

3. Nikolaev V.A. Analiz vzaimodejstviya pravogo nozha agregata nepreryvnogo dejstvija s gruntom [Analysis of the interaction of the right knife of the continuous action unit with the ground]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 1: 32-43.

4. Zhuk A.F. *Teoreticheskoe obosnovanie racional'noj tekhnologicheskoy skhemy i parametrov rotacionnogo pluga*. [Theoretical justification of the rational technological scheme and parameters of the rotary plough]. *Teoriya i raschyot pochvoobrabatyvayushchih mashin*. 1989; 120: 145-153. (in Russian)

5. Popov G.F. Rabochie organy frez [Working bodies of milling cutters]. *Materials VISHOM. ONTI VISHOM*. 1970; 27: 490-497. (in Russian)

6. Karasyev G.N. Opredelenie sily rezaniya grunta s uchytom uprugih deformatsij pri razrushenii [Determination of the ground cutting force taking into account elastic deformations during destruction]. *Construction and road machinery*. 2008; 4: 36-42. (in Russian)

7. Karnaukhov A.I., Orlovskiy S.N. Opredelenie zhatrat udel'noj energii na process rezaniya lesnyh pochv torcevyimi frezami [Determination of specific energy costs for the process of cutting forest soils with end mills]. *Construction and road machinery*. 2010; 1: 20-22. (in Russian)

8. Kravets I.M. Opredelenie kriticheskoj glubiny rezaniya pri kombinirovannom rezanii gruntov gidrofreznoj [Critical depth of the cut determination in the combined cutting soil by hydromiller]. *Construction and road machinery*. 2010; 5: 47-49. (in Russian)

9. Kirillov F.F. Determinirovannaya matematicheskaya model' vremennogo raspredeleniya tyagovogo usiliya dlya mnogorezcovykh rabochih organov zemlerojnyh mashin [Deterministic mathematical model of the traction force time distribution for multi-section working bodies of earth moving machines]. *Construction and road machinery*. 2010; 11: 44-48. (in Russian)

10. Berestov E.I. Vliyanie treniya grunta po povernosti nozha na soprotivlenie rezaniyu [Soil friction effect on the knife surface on cutting resistance]. *Construction and road machinery*. 2010; 11: 34-38. (in Russian)

11. Vershinin A.V., Subov V.S., Tyulnev A.M. Povyshenie effektivnosti diskofreznykh rabochih mekhanizmov dlya razrabotki myorzlykh gruntov [Improving the efficiency of disc milling working mechanisms for the development of frozen soils]. *Construction and road machinery*. 2012; 8: 42-44. (in Russian)

12. Balovnev V.I., Nguen Z.SH. Opredelenie soprotivlenij pri razrabotke gruntov ryhlitelem po integral'nomu pokazatelyu prochnosti [Determination of resistance in the soil development with a ripper according to the integral strength indicator]. *Construction and road machines*. 2005; 3: 38-40. (in Russian)

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

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

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

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

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

18. Atkinson J. The Mechanics of Soils and Foundations. *CRC. Press*. 2007; 448.

19. Balovnev V.I., Danilov R.G., Ulitich O.Yu. Issledovanie upravlyaemykh nozhevyyh sistem zemlerojno-transportnykh mashin [Research of controlled knife systems of earth moving and transport vehicles]. *Construction and road vehicles*. 2017; 2: 12-15. (in Russian)

20. Nilov V.A., Fyodorov E.V. Razrabotka grunta skreperom v usloviyah svobodnogo rezaniya [Soil development with a scraper in free cutting conditions]. *Construction and road machines*. 2016; 2: 7-10. (in Russian)

21. CHmil' V.P. Nasosno-akkumulyativnyj privod ryhlitel'ya s avtomaticheskim vyborom ugla rezaniya [Pump-accumulator ripper drive with an automatic choice of a cutting angle]. *Construction and road machines*. 2016; 11: 18-20. (in Russian)

22. Kabashev R.A., Turgumbaev S.D. Eksperimental'nye issledovaniya processa kopaniya gruntov rotorno-diskovymi rabochimi organami pod gidrostaticheskim davleniem [Experimental studies of the soil digging process with a rotary-disk working bodies under the hydrostatic pressure]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016; 4: 23-28. (in Russian)

23. Syomkin D.S. O vliyaniy skorosti rabocheho organa na silu soprotivleniya rezaniyu grunta [On the speed influence of the working body on the resistance strength to cutting soil]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017; 1: 37-43. (in Russian)

24. Konstantinov Yu.V. Metodika raschyota soprotivleniya i momenta soprotivleniya rezaniyu pochvy pryamym plastinchatym nozhom frezy [Method for calculating the resistance and a resistance moment to cutting soil with a straight plate cutter knife]. *Tractors and agricultural machines*. 2019; 5: 31-39. (in Russian)

25. Syromyatnikov Yu.N., Hramov I.S., Vojnash S.A. Gibkij element v sostave rabochih organov rotornoj pochvoobrabatyvayushchej ryhlitel'no-separiruyushchej mashiny [Flexible element in the working bodies of a rotary tillage and ripper separation machine]. *Tractors and agricultural machines*. 2018; 5: 32-39. (in Russian)

26. Parhomenko G.G., Parhomenko S.G. Silovoj analiz mekhanizmov peremeshcheniya rabochih organov pochvoobrabatyvayushchih mashin po zadanoj traektorii [Power analysis of mechanisms for moving working bodies of tillage machines along a given trajectory]. *Tractors and agricultural machines*. 2018; 1: 47-54. (in Russian)

27. Dranyaev S.B., CHatkin M.N., Koryavin S.M. Modelirovanie raboty vintovogo G-obraznogo nozha pochvoobrabatyvayushchej frezy [Modeling the operation of a screw l-shaped knife of a tillage mill]. *Tractors and agricultural machines*. 2017; 7: 13-19. (in Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Николаев Владимир Анатольевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные и дорожные машины» ФГОУ ВО «Ярославский технический университет». ORCID. 0000-0001-7503-6612 (г. Ярославль, Московский пр., 88, тел. 8 910 961 51 87, e-mail: nikolaev53@inbox.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir A. Nikolaev, Dr. of Sci., Professor of the Construction and Road Machines Department. ORCID. 0000-0001-7503-6612 (Yaroslavl Technical University, Yaroslavl, Moscow Avenue, 88. Phone: 8 910 961 51 87, e-mail: nikolaev53@inbox.ru).

РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ



PART II. TRANSPORT

РАЗРАБОТКА НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАРЬЕРНОГО ТРАНСПОРТА

А.Н. Новиков¹, И.А. Новиков², Н.А. Загородний^{2*}, А.С. Семькина²

¹Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева,
г. Орел, Россия;

²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия

*n.zagorodnij@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассматриваются инновационные и информационные технологии, система идентификации, целью применения которых является повышение эффективности эксплуатации карьерного транспорта. Разработан алгоритм работы автотранспорта в карьере в имитационной модели. Представлена методика расчета рационального количества карьерного транспорта по перевозке железорудного сырья с места добычи в карьере на временный пункт хранения.

Методы и материалы. Для управления процессом транспортирования на ГОКах требуется применение усовершенствованных методов и способов оптимизации транспортных потоков по снижению затрат в системе «карьер-склад/обогащительная фабрика-производство», учитывающие динамичность процессов. Для повышения эффективности эксплуатации карьерного транспорта требуется применение инновационных и информационных технологий, системы идентификации. В качестве научно-методического подхода используется предварительная регистрация карьерного транспорта и фиксация времени процессов погрузки-разгрузки, перемещения груза. Для организации работы процесса транспортирования необходима разработка алгоритма работы карьерного транспорта в имитационной модели, который позволит осуществить сбор информации о состоянии всех временных пунктов хранения, продолжительность операций процесса перевозки и др. Внедрение результатов использования методики расчета рационального количества автотранспортных средств позволяет достичь эффективного процесса транспортирования железорудного сырья из карьера на временный пункт хранения.

Результаты. Авторами разработаны научно-методические подходы для повышения эффективности эксплуатации карьерного транспорта.

Заключение. Проведены исследования организации работы процесса транспортирования железорудного сырья на горно-обогащительном комбинате. Сделан вывод о необходимости разработки научно-методических подходов для повышения эффективности эксплуатации карьерного транспорта. Разработан алгоритм работы карьерного транспорта в имитационной модели, который позволяет учитывать влияние системы управления и распределения самосвалов на количество экскаваторов и своевременную подачу самосвалов к пунктам хранения. Представлена методика расчета рационального количества карьерного транспорта по перевозке железорудного сырья.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: карьер, железорудное сырье, карьерный транспорт, процесс транспортирования, эксплуатация карьерного транспорта.

Поступила 23.07.20, принята к публикации 25.12.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: А.Н. Новиков, И.А. Новиков, Н.А. Загородний, А.С. Семькина. Разработка научно-методических подходов для повышения эффективности эксплуатации карьерного транспорта. *Вестник СибАДИ*. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-690-703>

© Новиков А.Н., Новиков И.А., Загородний Н.А., Семькина А.С.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-690-703>

DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL APPROACHES TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF QUARRY TRANSPORT OPERATION

Alexander N. Novikov¹, Ivan A. Novikov², Nikolay A. Zagorodnij^{2*}, Alla S. Semykina²

¹Orel State University named after I. S. Turgeneva

²Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhova

*n.zagorodnij@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The article discusses innovative and information technologies, an identification system, the purpose of which is to increase the efficiency of the operation of open pit transport. An algorithm for the operation of vehicles in a quarry in a simulation model has been developed. The method of calculating the rational amount of quarry transport for the transportation of iron ore from the place of extraction in the quarry to a temporary storage point is presented.

Methods and materials. To manage the transportation process at GOK, it is required to use improved methods and methods for optimizing transport flows to reduce costs in the system “quarry-warehouse / processing plant-production”, taking into account the dynamics of processes. To increase the efficiency of the operation of open-pit vehicles, the use of innovative and information technologies, an identification system is required. As a scientific and methodological approach, preliminary registration of open pit transport and fixing the time of loading and unloading processes, cargo movement are used. To organize the operation of the transportation process, it is necessary to develop an algorithm for the operation of open pit transport in a simulation model, which will allow collecting information about the state of all temporary storage points, the duration of the transportation process, etc. The implementation of the results of using the methodology for calculating a rational number of vehicles allows to achieve an effective raw materials from the quarry to a temporary storage point.

Results. The authors have developed scientific and methodological approaches to improve the efficiency of mining transport operation.

Conclusion. Research of the organization of work of the process of transportation of iron ore raw materials at the mining and processing plant has been carried out. It is concluded that it is necessary to develop scientific and methodological approaches to improve the operation of open pit transport. An algorithm for the operation of open pit transport in a simulation model has been developed, which allows taking into account the influence of the control and distribution system of dump trucks on the number of excavators and the timely delivery of dump trucks to storage points. The method of calculating the rational amount of quarry transport for the transportation of iron ore raw materials is presented.

KEYWORDS: quarry, iron ore, quarry transport, transportation process, operation of quarry transport.

Submitted 23.07.20, revised 25.12.2020.

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: A.N. Novikov, I.A. Novikov, N.A. Zagorodnij, A.S. Semykina. Development of scientific and methodological approaches to improve the efficiency of quarry transport operation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-690-703>

© Novikov A.N., Novikov I.A., Zagorodnij N.A., Semykina A.S.



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

ВВЕДЕНИЕ

Карьерный транспорт играет ключевую роль в производственных процессах добычи полезных ископаемых в карьерах горно-обогатительных комбинатов. Проблема перевозки полезных ископаемых, создание рациональных маршрутов остается наиболее значимой для горно-обогатительных комбинатов [1].

В процессе транспортирования железорудного сырья возникает ряд проблем, связанных с техническим состоянием транспорта, дорожным полотном, выбором маршрутизации движения, состоянием работников, информационным обеспечением и др. Реализация металлургической продукции зависит от сроков перевозки, ассортимента, сезонности, эластичности спроса, а также от ограничений, налагаемых заказчиком. Для наиболее эффективного управления транспортно-логистическими процессами по перевозке железной руды из карьера на промежуточный или усредненный склад, обогатительную фабрику необходимо применять усовершенствованные методы и способы оптимизации транспортных потоков по снижению затрат в системе «карьер-склад/ обогатительная фабрика-производство», учитывающие динамичность процессов [2].

Технологический процесс добычи железорудного сырья может сопровождаться различными сбоями и нарушениями в работе, а также остановкой всего процесса добычи, связанными с возникновением неточностей и ошибками в процессе транспортирования карьерным транспортом. Для решения возникающих проблем, связанных с повышением эффективности эксплуатации карьерного транспорта, требуется разработка научно-методических подходов и их применение в организации процесса перевозки железорудного сырья карьерным транспортом от места добычи до фабрики производства или склада [3].

Карьерный транспорт является связующим элементом в технологическом процессе производства добычи железорудного сырья, который обеспечивает движение сырья на всех этапах производства вплоть до получения готовой продукции. Эксплуатация карьерного транспорта позволяет уменьшить временные затраты на добычу сырья и изготовление получаемых из него продуктов, а также снизить материальные затраты за счет изменения сроков доставки в пункт назначения карьерным транспортом [4].

Повышение эффективности эксплуатации карьерного транспорта, сохранность пере-

возимого груза, обеспечение бесперебойной работы цепочки «экскаватор-самосвал», обеспечение долговечности и работоспособности узлов и агрегатов транспорта являются целью технологического процесса транспортирования любого горно-обогатительного предприятия [5].

Добыча железорудного сырья осуществляется на постоянной основе, регулярно. В момент добычи залежей горнорудных пород задействовано большое количество автотранспортных средств, каждое из которых выполняет свои функции в выполнении производственного процесса. В связи с этим непосредственно в месте добычи и на временных пунктах хранения могут возникать застои транспорта. Для этого требуется координация режимов работы транспорта и определение промежуточного интервала работы между экскаватором и самосвалом. Длительность ожидания погрузки-разгрузки может быть различной и зависит от разных факторов [6].

Увеличение длительности простоя может привести к негативным последствиям и нарушениям процесса транспортирования железорудного сырья и всего процесса добычи в целом. Ухудшение экологической обстановки, снижение пропускной способности, появление отказов и неисправностей автотранспортных средств, появление аварийных ситуаций, возникновение скопления нескольких самосвалов в одной точке с целью ожидания погрузки-разгрузки – все это можно отнести к наиболее распространенным нарушениям работы процесса транспортирования. При появлении подобных сбоев горно-обогатительные комбинаты применяют различные способы для устранения ошибок в работе, что может предотвратить появление убытков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Устранение всех негативных последствий и нарушений в работе процесса транспортирования может быть достигнуто разработкой и применением научно-методических подходов для повышения эффективности эксплуатации карьерного транспорта.

К основной проблеме простоев транспорта можно отнести единовременное прибытие самосвалов к пункту хранения, возникновение очередей в зонах разгрузки.

Для минимизации времени ожидания самосвалом требуется определение времени, выделяемого на все операции, связанные с погрузкой-разгрузкой, длительностью перевозки, оформлением документации. Определение

временных интервалов позволит снизить время ожидания. Необходимо учитывать зависимость максимального времени ожидания автотранспортом и количество этого автотранспорта. С учетом полученного времени можно рассчитать оптимальное количество самосвалов, приходящихся на один экскаватор, и время подачи самосвала к экскаватору, временному пункту хранения (складу) или напрямую к обогатительной фабрике [7].

Время ожидания самосвалов зависит от количества экскаваторов, количества пунктов хранения, зон погрузки-разгрузки. Повышение эффективности эксплуатации карьерного транспорта требует анализа уже существующих методик и разработку научно-методических подходов с целью ускорения погрузочно-разгрузочных работ и предотвращения возникновения сбоев в процессе транспортирования.

Для снижения времени ожидания требуется организация быстрого приема железорудного сырья в пунктах хранения с применением технологического оборудования и весового контроля.

Основные направления сокращения времени простоя автотранспорта:

1. Наличие зон стоянок для самосвалов, ожидающих погрузку-разгрузку.
2. Наличие требуемого количества складов.
3. Наличие необходимого количества самосвалов.

Повышение качества работы процесса транспортирования происходит путем применения интенсивных методов (рисунок 1). Требуется оптимизация всех операций процесса транспортирования и автоматизация технологических процессов производства. Повышение эффективности эксплуатации карьерного транспорта может быть достигнуто путем применения инновационных технологий различной направленности.

К информационным системам, повышающим эффективность эксплуатации карьерного транспорта, можно отнести:

1. Электронный документооборот. Позволяет своевременно оформить необходимые документы по транспортировке железорудного сырья начиная со склада и до обогатительной фабрики.
2. Обмен данными в режиме онлайн. Позволяет передать информацию заранее и в кратчайшие сроки о транспортировке железорудного сырья.
3. Электронная система планирования и управления операциями процесса транспорти-

рования. К ним относят движение самосвалов, работу экскаваторов, планирование загрузки самосвалов, функционирование временных пунктов хранения, управление человеческими и материальными ресурсами в оперативном режиме.

4. Интеллектуальные системы управления процесса транспортирования с возможностью контроля движения каждой единицы транспорта [8].

Погрузка-разгрузка должна осуществляться настолько быстро и отлажено, чтобы свести к минимуму время пребывания самосвала в месте добычи сырья и пункте его хранения.

К уже существующим информационным системам можно отнести CITOS (система планирования операций), CIMOS (система управления и планирования движения автотранспорта); TradeNet (система оформления транспортных документов) и др. [9, 10].

Технологии интенсификации производства включают в себя:

1. Автоматизированное управление автотранспортом.
2. Роботизация технологических процессов погрузки-разгрузки, движение автотранспорта.
3. Автоматическое распознавание автотранспорта.
4. Оптимизация работы складов.

Интенсификация производства подразумевает контроль перемещения железорудного сырья по территории карьера и за его пределами с помощью беспилотных устройств, управляемых компьютерной системой [11].

Технологии по обеспечению безопасности включают в себя такие инновационные решения как:

1. Система автоматической идентификации автотранспорта и управление ими с помощью интеллектуальных устройств.
2. Интегрированная система контроля доступа на территорию ГОК карьерного автотранспорта и сотрудников.
3. Применение системы идентификации для контроля за движением автотранспорта.
4. Использование фото и видеオフィксации.

Управленческие технологии включают в себя:

1. Постоянный контроль за сотрудниками.
2. Управление качеством деятельности сотрудников путем применения мотивации персонала.
3. Стимулирование деятельности персонала.

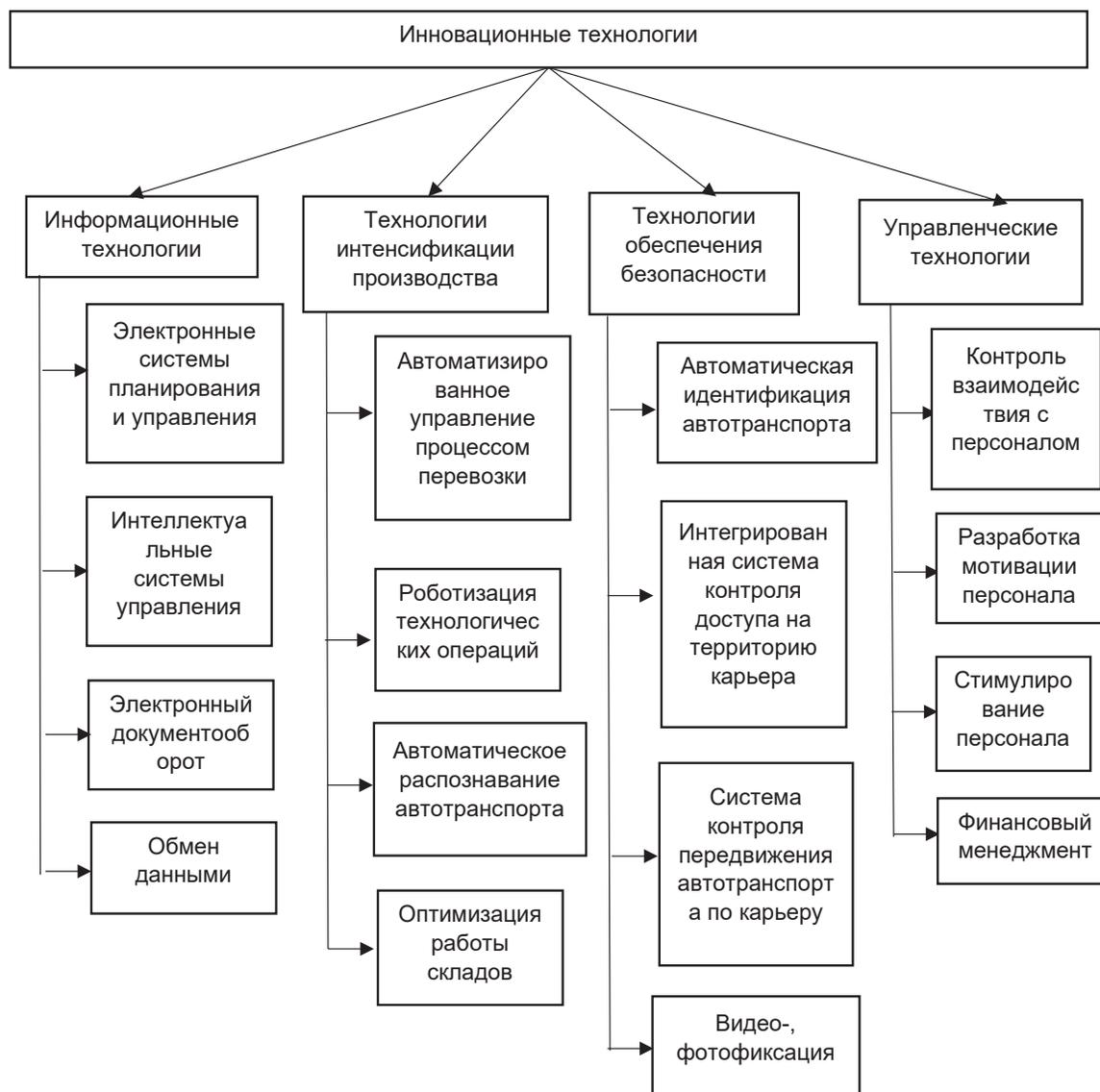


Рисунок 1 – Иновационные технологии

Figure 1 – Innovative technology

4. Финансовый менеджмент и создание особых экономических зон на территории ГОК. К информационным технологиям, применяемым для повышения эффективности карьерного транспорта, относятся (рисунок 2):

1. Геоинформационные системы. Для планирования маршрутов, навигации и расчета транспортных расходов используются геоинформационные системы (ГИС). С помощью ГИС можно составлять маршруты, оценивать время их прохождения с учетом ограничений, определять транспортные издержки.

2. Электронные системы. Автоматизация оформления документов, электронный доку-

ментооборот, удаленный доступ к документам, оперативный обмен информацией между сотрудниками, управленческий учет [12,13].

3. Телематические системы связи. К ним можно отнести средства навигации мониторинга и позиционирования. Данные системы позволяют выполнять функции диспетчерского управления и контролировать операции процесса транспортирования железорудного сырья до временного пункта хранения или обогатительной фабрики [14]. К основным функциям телематических систем связи относятся:

- прием заказов на выполнение перевозки;



Рисунок 2 – Информационные технологии

Figure 2 – Information technology

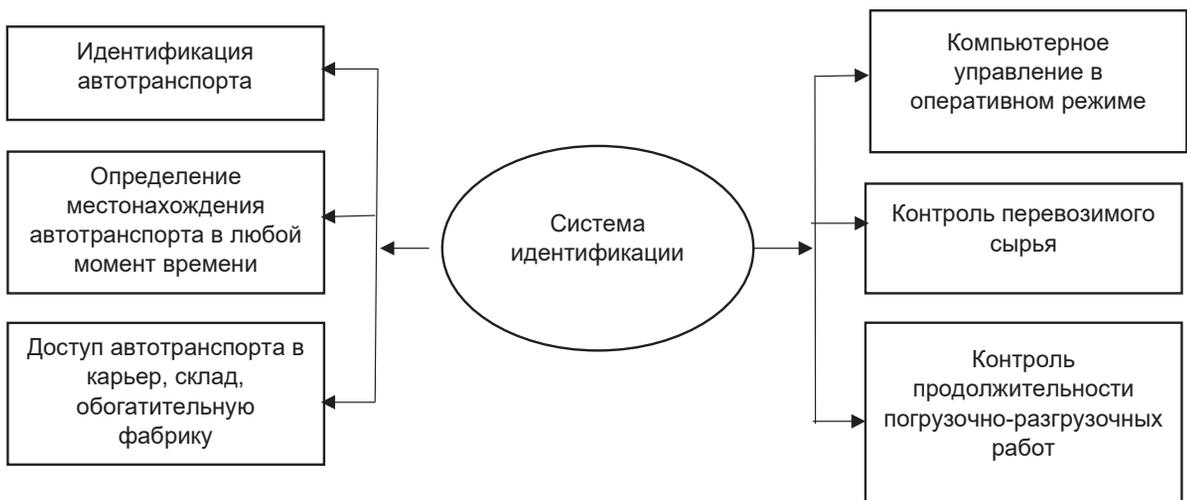


Рисунок 3 – Система идентификации

Figure 3 – Identification system

- своевременное прибытие к зонам погрузки-разгрузки;
- регулирование работы склада;
- контроль ГСМ на протяжении всего маршрута перевозки.

В качестве научно-методического подхода по повышению эффективности эксплуатации автомобильного карьерного транспорта рассмотрим систему идентификации (рисунок 3). Область применения данной системы позволяет:

1. Передвижение карьерного автотранспорта по территории ГОК.
2. Идентификация самосвалов, позволяющая определить количество перевозимого сырья данным самосвалом и зоны погрузки-разгрузки железной руды.
3. Идентификация сырья. Определение количества сырья, находящегося в кузове самосвала, уровень загруженности и временный пункт хранения.
4. Компьютерное управление в оперативном режиме. Выбор пункта разгрузки, очередность разгрузки самосвала, считывание состояния и количества сырья и т.д.
5. Определение местонахождения конкретных единиц техники. Благодаря системе идентификации существует возможность удаленного контроля над автомобилями и погрузочно-разгрузочной работой [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ

К разработке научно-методических подходов по повышению эффективности эксплуатации карьерного автотранспорта можно отнести создание системы предварительной регистрации. Такая система позволяет по образцу электронной очереди контролировать время прибытия самосвалов в пункты разгрузки, исключая время ожидания. Это позволит оптимизировать процесс разгрузки железорудного сырья, структурировать движение самосвалов по карьере и иметь необходимую актуальную информацию о состоянии процесса транспортирования.

Применение инновационных технологий при эксплуатации карьерного транспорта требует значительных затрат, но при этом позволяет в дальнейшем снизить материальные и временные ресурсы.

Для повышения эффективности эксплуатации карьерного автотранспорта требуется также применение информационных технологий, которые позволяют обеспечить быстрый обмен информацией, высокую скорость реакции на спрос металлизированной продукции, равномерность и ритмичность поставок гото-

вой продукции, сокращение затрат на изготовление продукции, повышение интенсивности выполнения заказов и др. [16].

С целью улучшения работы транспортного комплекса ГОК требуется организация стоянок самосвалов возле пунктов хранения и обогатительной фабрики, что позволит исключить ограничение доступности подъезжающего для разгрузки транспорта [17].

Организация работы процесса транспортирования сопровождается простоями автотранспорта у одних пунктов хранения, в том время как на другом пункте может быть свободно. Для решения данной проблемы требуется сбор информации о состоянии всех временных пунктов хранения, продолжительность операций процесса перевозки и др.

ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде чем внедрить научно-методические подходы, необходимо определить алгоритм работы самосвалов в карьере, представленный на рисунке 4, и произвести расчеты рационального количества автотранспортных средств для перевозки железорудного сырья в карьере. Изначально самосвал прибывает к месту добычи, работы экскаватора. В это время необходимые сведения передаются в диспетчерский пункт. В дальнейшем производится загрузка самосвала сырьем и его перемещение к месту разгрузки [18]. Если требуется доставка железорудного сырья непосредственно на обогатительную фабрику, то самосвал отправляется на фабрику или же к ближайшему складу в зависимости от удаленности места добычи в карьере. По прибытию в пункт назначения производится разгрузка самосвала. Далее он отправляется либо на стоянку в зону ожидания, либо повторно для загрузки в карьер. В это время вся информация о проводимых операциях передается в диспетчерский пункт. Затем проводится проверка сырья, взвешивание и завершение погрузочно-разгрузочных работ самосвалом.

Алгоритм работы самосвалов в имитационной модели включает в себя:

1. Определение времени прибытия самосвала.
2. Определение состояния и количества сырья.
3. Контроль всех проводимых операций процесса перевозки.
4. Погрузочно-разгрузочные работы самосвала.
5. Передача информации в диспетчерский пункт.

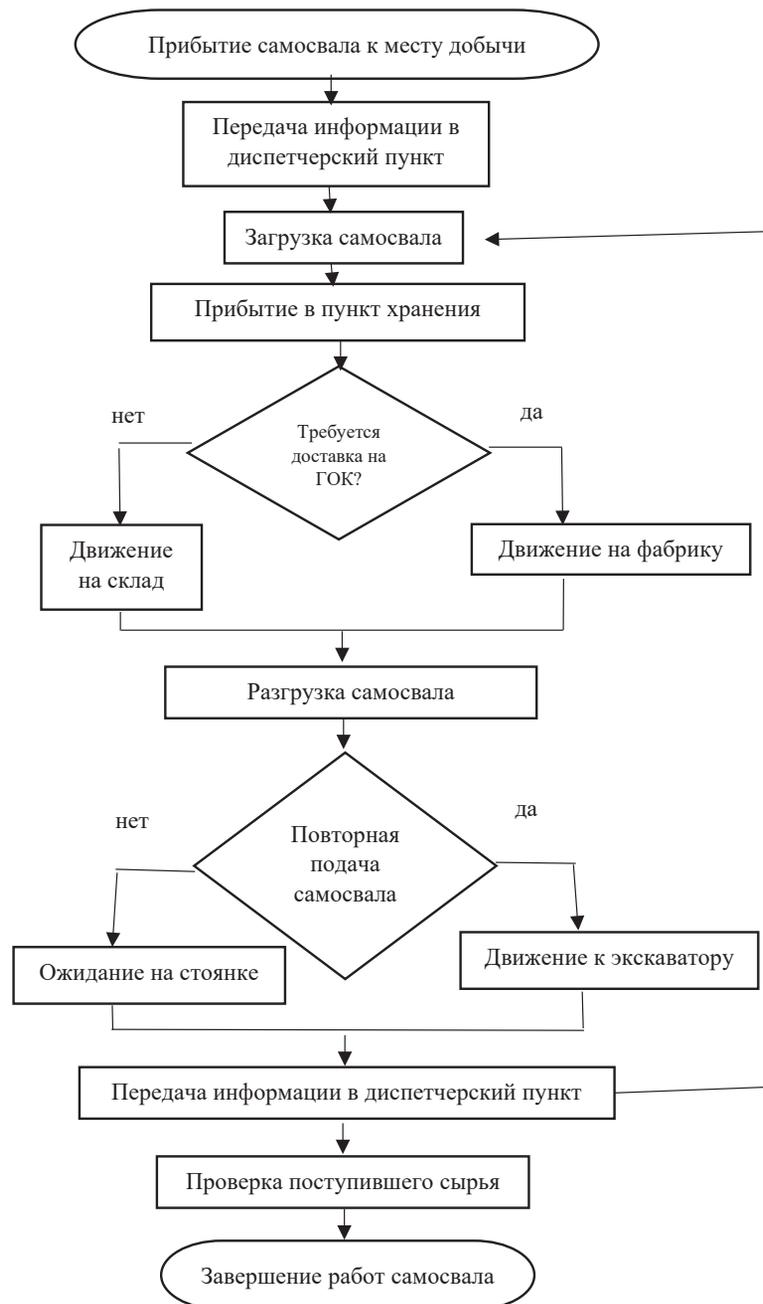


Рисунок 4 – Алгоритм работы самосвалов

Figure 4 – Algorithm of dump trucks

6. Определение времени окончания работ самосвалом [19].

На примере методики расчета рационального количества автотранспортных средств, автором которой является К.С. Есин, рассмотрим транспортирование железорудного сырья из карьера на временный пункт хранения. Решение оптимальных планов перевозки сырья и распределения транспортных потоков

среди временных пунктов хранения или складов требует минимизации суммы расходов на перевозку. Целочисленная производственно-транспортная модель определяет объемы транспортировки железорудного сырья от экскаваторов на временный пункт хранения, рассматривает операции по добыче и перевозке сырья как единый и неделимый процесс, позволяет за счет рационального распределе-

ния транспортных потоков добываемого сырья снизить затраты на перевозку. На основе рассмотренной им модели постановка задачи для расчета рационального количества автотранспортных средств для перевозки железорудного сырья в карьере формулируется так: необходимо найти требуемое количество автотранспортных средств, которые работают в составе звена «самосвал-экскаватор», доставляющих сырье от экскаватора на временный пункт хранения, при этом необходимо учитывать технические характеристики экскаватора и грузоподъемность каждой марки самосвала. Модель обеспечивает максимальную приспособленность к реальным условиям процесса добычи и перевозки сырья в зависимости от объема кузова автосамосвалов и характеризуется производительностью экскаваторов. Данные величины применяются в расчетах для определения рационального количества автотранспортных средств [20].

Факторы для разработки модели:

- модель работы транспортирования железорудного сырья ориентирована применительно только к перевозке полезных ископаемых;
- прибытие автотранспорта на временный пункт хранения равномерное по часам смены и не должно превышать его часовую пропускную способность;
- автотранспортные средства работают с максимально возможной производительностью;
- работа автосамосвалов не оценивается (это отдельная задача) [20].

Снижение себестоимости перевозок железорудного сырья с участка на временный пункт хранения ставится как задача минимизации требуемого количества автотранспорта (A_{isj}):

$$\sum_{i=1}^m \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^n A_{isj} q_s \quad (1)$$

где S – количество марок автотранспортных средств;

A_{isj} – количество автотранспортных средств;

S – ой марки, которое необходимо для перевозки железорудного сырья с i -участка на j - временный пункт хранения;

q_s – грузоподъемность автотранспортных средств S -й марки [20].

1. Масса сырья, которая ежедневно транспортируется с i -го участка на j -й временный пункт хранения

$$\sum_{s=1}^S A_{isj} q_s z_{izj} = x_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

где z_{izj} – число рейсов, которое совершает автотранспортное средство s -ой марки;

x_{ij} – масса сырья, которая ежедневно доставляется с i -го участка на j -й временный пункт хранения [20].

2. Суммарное количество автотранспортных средств s -й марки, требуемое для перевозки железорудного сырья с участков карьера на временные пункты хранения

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_{isj} = A_s, \quad S = 1, 2, \dots, S. \quad (3)$$

где A_s – количество автотранспортных средств s -й марки, необходимое для перевозки железорудного сырья с участков карьера на все временные пункты хранения [20].

3. Естественной неотрицательности и целочисленности автотранспортных средств

$$\begin{aligned} A_{isj} &\geq 0, \quad i = \overline{1, m}, \\ j &= \overline{1, n}, \\ S &= \overline{1, S} \end{aligned} \quad (4)$$

В расчетах требуемого количества автотранспортных средств для транспортировки сырья с участков необходимо учитывать производительность экскаватора, поэтому сначала производим расчет чистого времени цикла для экскаватора

$$t_{3K}^{-ч} = t_3^6 + t_p^b, \quad ч \quad (5)$$

где $t_{3R}^{-ч}$ – чистое время цикла экскаватора, ч;

t_3^6 – время захватывания сырья ковшем экскаватора, ч;

t_p^b – время выгрузки сырья из ковша экскаватора в автосамосвал, ч.

$$t_3^6 = \frac{\gamma V_6 \eta_b}{3,6 b k_b} (1 + d), \quad ч \quad (6)$$

где γ – плотность сырья, т/м³;

V_6 – объем ковша экскаватора, м³;

η_b – корректировочный коэффициент использования ковша экскаватора, 0,95–1,1;

b – производительность экскаватора, кг/с;

k_b – коэффициент использования производительности экскаватора, 0,8–1,0;

d – отношение массы окатышей к массе сырья.

$$t_p^b = \frac{\gamma V_b \eta_b}{W_{ш}}, \text{ ч} \quad (7)$$

где $W_{ш}$ – производительность разгрузочного устройства экскаватора, кг/с [20].

Оборотное время, которое потребуется автотранспортным средствам, чтобы загрузить кузов автосамосвала железорудным сырьем, перевезти его на временный пункт хранения и вернуться обратно, согласно формуле

$$t_a^u = t_p^b + t_n + t_r + t_d + t_p + t_x, \text{ ч} \quad (8)$$

где t_n – время переездов автотранспортного средства по участку, ч;

t_r – время движения с участка на временный пункт хранения с грузом, ч;

t_d – время, затрачиваемое на проверку сырья, оформление документов, ч;

t_p – время разгрузки автотранспортного средства (технологические переезды, ожидание разгрузки), ч;

t_x – время в движении без груза, ч [20].

Объем кузова автотранспортного средства определяется

$$V_n^a = \frac{q_n^a}{\gamma} M^3 \quad (9)$$

где q_n^a – грузоподъемность соответствующего автотранспортного средства, т;

γ – плотность сырья [20].

Объем сырья, за время оборотного рейса автотранспортного средства, определяется по формуле

$$V_n = \frac{t_a^u 3,6 f_n k_b}{\gamma \eta_b (1+d)} M^3 \quad (10)$$

где f_n – пропускная способность экскаватора, кг/с [20].

На горно-добывающих комбинатах при планировании процесса транспортирования требуемое количество автотранспорта определяется в зависимости от суточного объема добычи с учетом возможности применения существующих способов перевозки, что очень часто приводит к неточному определению (завышению или занижению) требуемого количества автотранспортных средств, на работу которых выделяются неоправданно завышенные материальные и трудовые ресурсы, в последующем такие ГОКи показывают невысокие показатели работы системы в целом [20].

Предполагаемое количество автотранспортных средств при перевозке железорудно-

го сырья от экскаватора в процессе перевозки рассчитывается на основе равенства суммарной добычи сырья экскаваторами и эксплуатационными возможностями автосамосвалов. При этом учитывается разномарочный состав автотранспортных средств и экскаваторов с их различными техническими характеристиками [20].

Описанная зависимость представлена по формулам:

$$q_1 x_1 + q_2 x_2 + \dots + q_n x_n = m_k \quad (11)$$

где x_1, x_2, x_n – количество автотранспортных средств каждой модели, шт;

q_1, q_2, q_n – грузоподъемность автотранспортного средства соответствующей марки, т;

m_k – масса сырья, добытая экскаватором, работающим на участке, т [20].

$$\sum_{i=1}^n x_i \rightarrow \min \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n q_i x_i = \sum_{j=1}^k q_j$$

Количество автотранспортных средств находим по формуле

$$x_i = \frac{q_i m_k}{q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_n^2} \quad (13)$$

Величины с индексами определяются исходя из грузоподъемности транспортных средств и массы добытого сырья экскаватором.

Номинальная грузоподъемность автотранспорта определяется исходя из максимально возможной нагрузки, возникающей при работе автомобиля в различных дорожных условиях. При транспортировке сырья большое значение имеет грузоподъемность автотранспортного средства, измеряемая внутренними габаритами кузова, массой груза и ограничиваемая грузоподъемностью. Поэтому значение увеличения объема кузова, а следовательно, и грузоподъемности подвижного состава на перевозках железорудного сырья возрастает [20].

Определение рационального количества автотранспортных средств для перевозки от экскаваторов на временный пункт хранения, склад или обогатительную фабрику учитывает грузоподъемность каждой модели автотранспортного средства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения эффективности эксплуатации карьерного транспорта требуется применение информационных технологий, способствующих автоматизации работы автомобильного транспорта в карьере, сокращение времени простоя автотранспорта, использование методики управления перевозкой сырья и уменьшение количества использования автотранспорта за счет увеличения грузоподъемности и сокращения времени, затрачиваемого на перевозку [21].

В качестве научно-методического подхода рассмотрена методика управления перевозкой сырья на протяжении всей цепи движения самосвалов по следующей схеме:

1. Организация предварительной регистрации заявок на обслуживание в online-режиме.
2. Организация предварительной стоянки для карьерного автотранспорта.
3. Использование системы идентификации карьерного автотранспорта.
4. Разработка системы управления передвижением автотранспорта по карьере с помощью инновационных систем [22].

Возможности имитационной модели подтверждают обоснованность выбора такого инструмента, как имитационное моделирование для повышения эффективности эксплуатации карьерного транспорта [23].

Адаптивная имитационная модель эксплуатации карьерного автотранспорта позволяет учитывать влияние системы управления и алгоритма распределения самосвалов на количество экскаваторов и своевременную подачу самосвалов к пунктам хранения, учитывающую время ожидания, а также разработать адекватные рекомендации по организации эксплуатации карьерного автотранспорта в оперативном режиме [24, 25].

Количество автотранспортных средств, отвозящих железорудное сырье от экскаваторов, прямо пропорционально времени оборотного рейса, поэтому можно сделать вывод, чем быстрее автотранспорт выполняет доставку сырья с участка на временный пункт хранения и возвращается на исходный участок, тем меньшее количество автотранспортных средств требуется для обслуживания экскаваторов [20].

При расчете снижения себестоимости, целью которого является уменьшить количество транспортных средств, необходимо учитывать, что минимизация суммарной себестоимости

перевозок не всегда может привести к уменьшению количества транспортных средств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новиков А.Н., Иващук О.А., Васильева В.В. Экологический мониторинг воздействия автотранспорта на акустическую среду города // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2006. № 6. С. 33-34.
2. Семькина А.С., Загородний Н.А., Фоменко Ю.В., Конев А.А. Анализ видов железорудного сырья и процесса их перевозки // Научно-технические аспекты инновационного развития транспортного комплекса: сборник научных трудов по материалам III Международной научно-практической конференции 25 мая 2017 года, Донецк: ДАТ, 2017. С. 27-31.
3. Семькина А.С., Загородний Н.А. Выявление проблем транспортного комплекса горно-обогатительных предприятий // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности, Могилев: Беларус. Рос. ун-т, 2017.
4. Агафонов Д.В., Якушев А.С., Ляцев В.С. Технологический автотранспорт Лебединского ГОКа // Горный журнал. 2017. №5. С. 38-41.
5. Нестеренко А.В., Разгулов С.А., Берестнев Е.Ю., Никулин А.А. Ремонтная служба комбината // Горный журнал. 2017. №5. С. 42-45.
6. Семькина А.С., Загородний Н.А. Повышение эффективности работы автомобильного карьерного транспорта // Студенческий научный форум. 2018. URL: <http://www.scienceforum.ru> (дата обращения: 23.01.2018).
7. Новиков А.Н., Бодров А.С., Ломакин Д.О. Выбор факторов, определяющих качество автосервисных услуг программно-целевым методом // Бюллетень транспортной информации. 2009. № 8 (170). С. 36-40.
8. Современные программные системы компании Modular Mining для управления горным оборудованием на карьерах // Горная промышленность. 1996. №4. С. 46. URL: <https://mining-media.ru> (дата обращения: 23.01.2018).
9. Аброськин А.С. Применение современных систем автоматизации на открытых горных работах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. №12. С. 112-130.
10. Trapeznikova M. A., Furmanov I. R., Churbanova N. G., Lipp R. Simulating multilane traffic flows based on cellular automata theory // Mathematical Models and Computer Simulations. 2012. 53 61 p.
11. Chun-xiu Wu, Song T, Zhang P., Wong S.C. Phase-plane analysis of conserved higher-order traffic flow model // Applied Mathematics and Mechanics. 2012. Pp. 1505-1512.
12. Новиков А.Н., Кулев М.В. Оптимизация численности диагностических линий технического осмотра транспортных средств на примере Орловской области // Бюллетень транспортной информации. 2010. № 5 (179). С. 31-33.
13. Шаволь Г., Новиков А.Н. Новая услуга фирмы DBT в России: предоставление в аренду горно-

шахтного оборудования // Горная промышленность. 2007. № 4 (74). С. 36-37.

14. Таха, Хемди А. Введение в исследование операций. Москва, Издательский дом «Вильямс». 2005. № 7. 912 с.

15. Lepetyukha S.V., Yakushev A.S. State and prospects of development of technological motortransport at Lebedinsky GOK. *Gornyi Zhurnal*. 2007. No. 7. Pp. 25-27.

16. Тариков Д.Ш., Корнилов С.Н. Анализ производственной деятельности горнодобывающего предприятия и разработка методики оптимизации транспортно-грузового комплекса // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2012. Т. 1. С.96-99.

17. Гавришев С.Е. Организационно-технологические методы повышения надежности и эффективности работы карьеров. Магнитогорск, МГТУ, 2002. 231 с.

18. Paley L.M. Managerial and engineering support of open pit mine production phase I at v. grib mining and progressing combine // *Eurasian mining*. 2014. № 2. Pp. 20-22.

19. Блам Ю.Ш., Машкина Л.В. Модели и методы прикладного анализа (производственные системы). Новосибирск, НГУ. 2008. URL: <http://econom.nsc.ru/efnsu/Mimpra2.htm> (дата обращения: 25.04.18).

20. Есин К.С. Повышение эффективности использования автотранспортных средств при перевозке зерна в регионе (на примере Орловской области) Орел, 2016. 136 с.

21. Бачинский В.И., Кузминская Е.И. Использование элементов экономико-математического моделирования в управлении производственными затратами горно-обогатительных предприятий // Экономика и управление: анализ тенденций и перспектив развития. 2013. № 6. С. 197-201.

22. Копылова О.А. Кластеризация региональных транспортно-логистических систем // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2013. № 4 (4). С. 73-81.

23. Макуха П.А., Корнилов С.Н. К вопросу о структуре логистической системы снабжения потребителей ископаемым сырьём // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2013. № 2 (3). С. 94-99.

24. Vueykova O.N., Larin O.N. Voprosy povysheniya effektivnosti raboty karyernogo avtotransporta [Issues of increase in efficiency of open pit transport] // *Vestnik OGU*. 2011. No. 10 (129). P. 20-25.

25. Олизаренко В.В., Красавин А.В., Абдрахманов Р.И., Гольцов В.В. Анализ логистической схемы горно-обогатительного предприятия при комбинированной разработке медно-колчеданных месторождений // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2013. № 4 (4). С. 88-94.

REFERENCES

1. Novikov A.N., Ivashchuk O.A., Vasileva V.V. Je-kologicheskij monitoring vozdeystviya avtotransporta na akusticheskiju sredu goroda [Environmental mon-

itoring of the impact of vehicles on the acoustic environment of the city]. *Repair. Recovery. Modernization*. 2006; 6: 33-34. (in Russian)

2. Semykina A.S., Zagorodny N.A., Fomenko Yu.V., Konev A.A. Analiz vidov zhelezorudnogo syr'ja i processa ih perevozki [Analysis of types of iron ore raw materials and the process of their transportation]. *Scientific and technical aspects of innovative development of the transport complex: collection of scientific papers on the materials of the III International scientific and practical conference*. Donetsk, DAT, 2017. 27-31. (in Russian)

3. Semykina A.S., Zagorodny N.A. Vyjavlenie problem transportnogo kompleksa gorno-obogatitel'nyh predpriyatij [Identification of problems of the transport complex of mining and processing enterprises]. *New materials, equipment and technologies in industry: materials of international cooperation. scientific-technical Conf. young. scientists*. Mogilev, Byelorussia, 2017. (in Russian)

4. Agafonov D.V., Yakushev A.S., Lyashev V.S. Tehnologicheskij avtotransport Lebedinskogo GOKa [Technological motor transport of the Lebedinsky GOK]. *Gornyi Zhurnal*. 2017; №5: 38-41. (in Russian)

5. Nesterenko A.V., Razgulov S.A., Berestnev E.Yu., Nikulin A.A. Remontnaja sluzhba kombinata [Repair service of the combine]. *Mining journal*. 2017; №5: 42-45. (in Russian)

6. Semykina A.S., Zagorodny N.A. Povysenie jef-fektivnosti raboty avtomobil'nogo kar'ernogo transpor-ta [Improving the efficiency of automobile career transport]. *Student scientific forum*. 2018. URL: <http://www.scienceforum.ru>. (in Russian)

7. Novikov A.N., Bodrov A.S., Lomakin D.O. Vybor faktorov, opredelajushhij kachestvo avtoservisnyh uslug programmno-celevym metodom [Selection of factors that determine the quality of car service services by a program-targeted method]. *Bulletin of transport information*. 2009; 8 (170): 36-40. (in Russian)

8. Sovremennye programmnye sistemy kompanii Modular Mining dlja upravlenija gornym oborudovaniem na kar'erah [Modern software systems of the Modular Mining company for managing mining equipment at quarries]. *Mining industry*. 1996; №4: 46. URL: <https://mining-media.ru> (accessed: 23.01.2018). (in Russian)

9. Abroskin A.S. Primenenie sovremennyh sistem avtomatizacii na otkrytyh gornyh rabotah [Application of modern automation systems in open-pit mining]. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesources engineering*. 2015; 326 (12): 112-130. (in Russian)

10. Trapeznikova M.A., Furmanov I.R., Churbanova N.G., Lipp R. Simulating multilane traffic flows based on cellular automata theory. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2012. 53-61.

11. Chun-xiu Wu, Song T., Zhang P., Wong S.C. Phase-plane analysis of preserved higher-order traffic flow model. *Applied Mathematics and Mechanics*. 2012. 1505-1512.

12. Novikov A.N., Kulev M.V. Optimizacija chis-lennosti diagnosticheskijh linij tehničeskogo osmotra

transportnyh sredstv na primere Orlovskoj oblasti [Optimization of the number of diagnostic lines for technical inspection of vehicles on the example of the Oryol region]. *Bulletin of transport information*. 2010; 5 (179): 31-33. (in Russian)

13. Shavol G., Novikov A.N. Novaja ushuga firmy DBT v Rossii: predostavlenie v arendu gornoshahtnogo oborudovaniya [New service of DBT company in Russia: provision of mining equipment for rent]. *Mining industry*. 2007; 4 (74). 36-37. (in Russian)

14. Taha, Hemdi A. Vvedenie v issledovanie operacij [Introduction to the study of operations]. Moscow, Publishing house "Williams", 2005; 7: 912. (in Russian)

15. Lepetyukha S.V., Yakushev A.S. State and prospects of development of technological motortransport at Lebedinsky GOK. *Gornyi Zhurnal*. 2007; 7:25-27.

16. Tarikov D.Sh., Kornilov S.N. Analiz proizvodstvennoj dejatel'nosti gornodobyvajushhego predpriyatija i razrabotka metodiki optimizacii transportno-gruzovogo kompleksa [Analysis of production activities of a mining enterprise and development of methods for optimizing the transport and cargo complex]. *Actual problems of modern science, technology and education-Magnitogorsk: Magnitogorsk state technical University*. 2012; 1: 96-99. (in Russian)

17. Gavrishchev S.E. Organizacionno-tehnologicheskie metody povysheniya nadezhnosti i jeffektivnosti raboty kar'erov [Organizational and technological methods for improving the reliability and efficiency of quarries: monograph]. Magnitogorsk, MSTU, 2002. 231 p. (in Russian)

18. Paley L.M. Managerial and engineering support of open pit mine production phase I at V. grib mining and progressing combine. *Eurasian mining*. 2014; 2: 20-22.

19. Blam Yu. Sh., Mashkina L. V. Modeli i metody prikladnogo analiza [Models and methods of applied analysis (production systems)]. Novosibirsk, NSU, 2008. URL: <http://econom.nsc.ru/efnsu/Mimpa2.htm> (accessed: 25.04.18). (in Russian)

20. Esin K.S. Improving the efficiency of using motor vehicles for transporting grain in the region (on the example of the Oryol region) Orel, 2016. 136 p. (in Russian)

21. Bachinsky V.I., Kuzminskaya E.I. Ispol'zovanie jelementov jekonomiko-matematicheskogo modelirovaniya v upravlenii proizvodstvennymi zatratami gorno-obogatitel'nyh predpriyatij [Use of elements of economic and mathematical modeling in the management of production costs of mining and processing enterprises]. *Economics and management: analysis of trends and prospects for development*. 2013; 6: 197-201. (in Russian)

22. Kopylova O.A. Klasterizacija regional'nyh transportno-logisticheskikh sistem [Clusterization of regional transport and logistics systems]. *Modern problems of the transport complex in Russia*. 2013; 4 (4): 73-81. (in Russian)

23. Makukha P.A., Kornilov S.N. K voprosu o strukture logisticheskoy sistemy snabzheniya potrebitelej iskopaemym syr'jom [On the issue of the structure of the logistics system for supplying consumers with fossil

raw materials]. *Modern problems of the transport complex in Russia*. 2013; 2 (3): 94-99. (in Russian)

24. Vueykova O.N., Larin O.N. Voprosy povysheniya jeffektivnosti raboty karyernogo avtotransporta (Issues of increase in efficiency of open pit transport). *Vestnik OGU*. 2011; 10 (129): 20-25.

25. Olizarenko V.V., Krasavin A.V., Abdrakhmanov R.I., Goltsov V.V. Analiz logisticheskoy shemy gorno-obogatitel'nogo predpriyatija pri kombinirovannoj razrabotke medno-kolchedannyh mestorozhdenij [Analysis of the logistics scheme of a mining and processing enterprise in the combined development of copper-pyrites deposits]. *Modern problems of the transport complex in Russia*. 2013; 4 (4): 88-94. (in Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Новиков А.Н. Выполнение аналитических исследований, постановка цели и задачи исследований, анализ и ознакомление с зарубежным и отечественным опытом.

Новиков И.А. Выбор и обоснование научно-методических подходов для повышения эксплуатации карьерного транспорта.

Загородный Н.А. Разработка научно-методических подходов для повышения эффективности процесса транспортирования и получение алгоритма работы самосвалов в имитационной модели. Анализ применения методики расчета рационального количества автотранспортных средств.

Семькина А.С. Анализ результатов полученных данных, обоснование выводов. Выявление актуальных вопросов и рекомендаций для дальнейшей проработки темы.

AUTHORS CONTRIBUTION

Novikov A.N. Performing analytical research, setting the goal and objectives of research, analysis and familiarization with foreign and domestic experience.

Novikov I.A. Selection and substantiation of scientific and methodological approaches to improve the operation of open pit transport.

Zagorodnij N.A. Development of scientific and methodological approaches to improve the efficiency of the transportation process and obtaining an algorithm for the operation of dump trucks in a simulation model. Analysis of the application of the methodology for calculating the rational number of vehicles.

Semykina A.S. Analysis of the results of the data obtained, substantiation of the conclusions. Identification of topical issues and recommendations for further development of the topic.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Новиков Александр Николаевич (г. Орел) – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Сервис и ремонт машин» Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева, ORCID ID 0000-0001-5496-4997 (302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95), e-mail: novikovan@ostu.ru.

Новиков Иван Алексеевич (г. Белгород) – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Эксплуатация и организация движения автотранспорта» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, ORCID ID 0000-0001-5322-9640 (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, БГТУ им. В. Г. Шухова), e-mail: ooows@mail.ru.

Загородний Николай Александрович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Эксплуатация и организация движения автотранспорта» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, ORCID ID 0000-0001-8973-9271 (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, БГТУ им. В. Г. Шухова), e-mail: n.zagorodnij@yandex.ru.

Семыкина Алла Сергеевна – аспирант кафедры «Механическое оборудование» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, ORCID ID 0000-0003-4045-4237 (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, БГТУ им. В. Г. Шухова), e-mail: fantarock@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Novikov Alexander Nikolaevich (Orel, Russia) – doctor of Technical Sciences sciences, prof., head of

the department “Service and repair of machines”, Oryol State University named after I.S. Turgenev, ORCID ID 0000-0001-5496-4997 (302026, Orel, Komsomolskaya st., 95), e-mail: novikovan@ostu.ru.

Novikov Ivan Alekseevich (Belgorod, Russia) – cand. tech. in Economics, Assoc. Professor, Head of the Department of Operation and Organization of Vehicle Traffic, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, ORCID ID 0000-0001-5322-9640 (308012, Belgorod, Kostyukov st., 46, BSTU named after V.G. Shukhov), e-mail: ooows@mail.ru.

Zagorodnij Nikolay Alexandrovich – cand. tech. Sciences, Assoc. of the Department of Operation and Organization of Vehicle Traffic, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, ORCID ID 0000-0001-8973-9271 (308012, Belgorod, Kostyukov st., 46, BSTU named after V.G. Shukhov), e-mail: n.zagorodnij@yandex.ru.

Semykina Alla Sergeevna – post-graduate student of the Department of Mechanical Equipment, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, ORCID ID 0000-0003-4045-4237 (308012, Belgorod, Kostyukova st., 46, BSTU named after V.G. Shukhov), e-mail: fantarock@mail.ru.

УДК 656.13

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-704-713>

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР И СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА АВАРИЙНОСТЬ НА АВТОМОБИЛЬНОМ ТРАНСПОРТЕ В ЛЕТНЕЕ ВРЕМЯ

И.Н. ЯкунинООО «Сервисный центр СБМ»,
г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В жаркое время года наблюдается положительная связь между количеством аварий, приходящихся на тысячу зарегистрированных транспортных средств, и температурой воздуха. В то же время увеличение температуры и интенсивности солнечной радиации способствует уменьшению тормозного пути автомобилей. Следовательно, вероятной причиной роста количества аварий служит снижение уровня навыков вождения.

Цель работы – определение наиболее весомых причин дорожно-транспортных происшествий в летний период, степени их влияния на аварийность в условиях высокой температуры и солнечной радиации, а также влияние работы климатических установок на увеличение аварийности.

Материалы и методы. С целью выявления причин роста аварий был использован экспертный метод, который заключался в опросе 28 профессиональных водителей со стажем не менее трёх лет.

Для оценки значимости факторов производили ранжирование причин роста аварийности по четырёх-балльной системе, где числу «1» соответствовала наименьшая значимость, а числу «4» – наибольшая. Также нужно было указать прирост неблагоприятного эффекта в процентах в тех или иных условиях по сравнению с комфортными условиями.

Результаты. Выявлено, что основными причинами увеличения количества совершаемых в летнее время года дорожно-транспортных происшествий являются: увеличение скорости движения, увеличение частоты маневрирования транспортных средств, увеличение количества неверно принимаемых решений и увеличение времени реакции водителей.

Непосредственное действие солнечной радиации наравне с действием высоких температур, выходящих за пределы области комфорта, является причиной аварий.

Использование климатических установок приводит к перераспределению значимости среди причин увеличения числа аварий – способствует росту числа дорожно-транспортных происшествий в результате увеличения скорости и частоты маневрирования, одновременно снижая аварийность, происходящую в результате неверно принятых решений и увеличения времени реакции водителей.

Практическое значение. Проведённые исследования дают основу для разработки мер по снижению аварийности на дороге в тёплое время.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автомобильный транспорт, окружающая среда, безопасность, температура, солнечная радиация.

Поступила 10.07.20, принята к публикации 25.12.2020.

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: Якунин И.Н. Влияние высоких температур и солнечной радиации на аварийность на автомобильном транспорте в летнее время. *Вестник СибАДИ*. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-704-713>

© Якунин И.Н.

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-704-713>

INFLUENCE OF HIGH TEMPERATURES AND SOLAR RADIATION ON ACCIDENTS ON ROAD TRANSPORT IN THE SUMMER

Ivan N. Yakunin
SBM Service center
Moscow, Russia

ABSTRACT

Introduction. During the hot season, there is a positive relationship between the number of accidents per thousand registered vehicles and the air temperature. At the same time, an increase in the temperature and intensity of solar radiation helps to reduce the braking distance of cars. Consequently, the likely reasons for the increase in the number of accidents is a decrease in the level of driving skills.

The purpose of the work is to determine the most significant causes of road accidents in the summer, the degree of their impact on accidents in conditions of high temperature and solar radiation, as well as the impact of climate installations on the increase in accidents.

Materials and methods. In order to identify the causes of the increase in accidents, an expert method was used, which consisted in a survey of 28 professional drivers with at least three years of experience.

To assess the significance of factors, the reasons for the increase in accidents were ranked according to a four-point system, where the number "1" corresponded to the lowest significance, and the number "4" – the highest. It was also necessary to indicate the increase in the adverse effect as a percentage in certain conditions, compared with comfortable conditions.

Results. It is revealed that the main reasons for the increase in the number of accidents committed in the summer are: an increase in traffic speed, an increase in the frequency of maneuvering vehicles, an increase in the number of incorrect decisions and an increase in the reaction time of drivers.

The direct effect of solar radiation, along with the effect of high temperatures that go beyond the comfort zone, is the cause of accidents.

The use of climate systems leads to redistribution of importance among the reasons for the increase in the number of accidents – increases the number of accidents by increasing the speed and frequency of maneuvering, while reducing the rate of road accidents occurring in bad judgement and increase reaction time of drivers.

Practical importance. The research provides a basis for developing measures to reduce accidents on the road in warm weather.

KEYWORDS: Road transport, environment, safety, temperature, solar radiation.

Submitted 10.07.20, revised 25.12.2020.

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: Ivan N. Yakunin. Influence of high temperatures and solar radiation on accidents on road transport in the summer. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-704-713>

© Yakunin I.N.



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

ВВЕДЕНИЕ

Согласно официальной статистике в летний период увеличивается интенсивность использования транспортных средств (ТС), с ростом температуры воздуха происходит увеличение количества дорожно-транспортных происшествий (ДТП), приходящихся на одну тысячу зарегистрированных ТС. Функция зависимости количества ДТП от температуры является монотонно возрастающей.

В работе [1] исследована зависимость количества ДТП, приходящихся на тысячу единиц ТС, от температуры окружающей среды в летний период в Оренбургской и Липецкой областях. Методика установления закономерностей предусматривала последовательное выполнение следующих этапов:

- определение субъектов РФ, удалённых от летних автомобильных туристских потоков, температура воздуха в которых в летние месяцы составляет не менее +15 °С;

- определение количества автомобилей, дорожно-транспортных происшествий, среднесуточной температуры воздуха в летние месяцы на их территории на протяжении с 2016 по 2018 гг.;

- установление зависимости числа ДТП, приходящихся на одну тысячу автомобилей, зарегистрированных в данных субъектах РФ, от среднесуточной температуры воздуха в летние месяцы на их территории (рисунок 1).

Данные о количестве ДТП и среднесуточной температуре взяты из открытых официальных источников. На приведённых графиках каждой точке соответствует количество ДТП, произошедших в течение одного месяца, на тысячу автомобилей и усреднённая по дням того же периода среднесуточная температура.

Авторы делают вывод о том, что температура окружающей среды оказывает влияние

на безопасность дорожного движения. С увеличением количества дней в летние месяцы с дневной температурой более +25 °С увеличивается количество ДТП, приходящихся на одну тысячу автомобилей, зарегистрированных в субъектах РФ.

Можно предположить, что рост числа ДТП с увеличением температуры в летний период может происходить как по техническим причинам, так и в результате негативного влияния условий окружающей среды на состояние водителя. Однако ранее проведённые опыты показывают, что как рост температуры, так и интенсивность солнечной радиации способствуют увеличению коэффициента сцепления колёс с дорогой, что уменьшает тормозной путь. Данный вывод косвенно согласуется с результатами других авторов [2, 3, 4, 5, 6, 7].

Следовательно, одной из причин увеличения количества ДТП является человеческий фактор. Авторам работы [8] удалось определить, что при температуре воздуха, равной 20 °С, наблюдается оптимальное функциональное состояние ведущих психофизиологических показателей водителей. Данная температура принимается за оптимальную для водителей при оценке условий движения.

В работе [9] показано, что для водителя температура в салоне +27 °С является критической – при превышении этого значения сильно усложняется его психическая деятельность, увеличивается время реакции и количество совершаемых ошибок. Причем, чем выше сложность задачи, которую решает водитель, тем больше ошибок он допускает. Авторы работы [10] приходят к выводу, что высокая температура и попадание прямых солнечных лучей являются основными факторами, вызывающими дискомфорт.

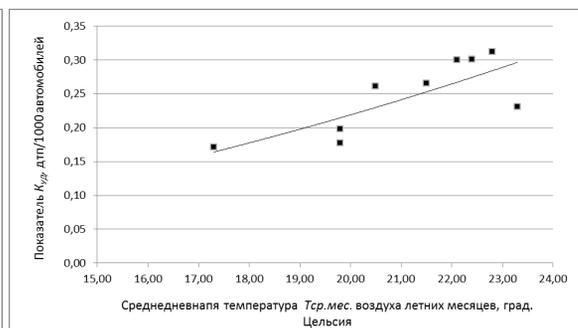
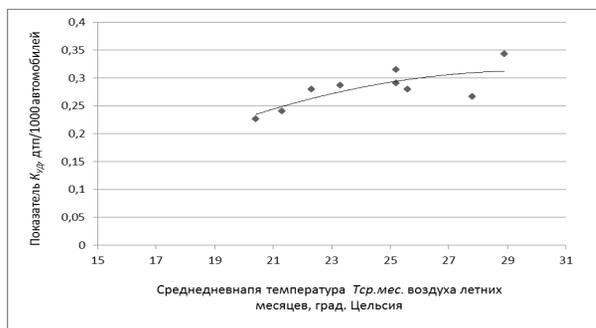


Рисунок 1 – Зависимости количества ДТП, приходящихся на одну тысячу автомобилей, зарегистрированных в субъектах РФ, от среднесуточной температуры воздуха летних месяцев: а – для Оренбургской области; б – для Липецкой области [1]

Figure 1 – Accident rate dependency per 1,000 vehicles registered in the constituent entities of the Russian Federation on the average daily temperature in summer: a – for Orendurg region; b – for Lipeturg region [1]

Теплопроводность, конвекция, теплопередача и солнечная радиация влияют на тепловой комфорт салона автомобиля, могут создавать мгновенный тепловой шок для водителя [11], что способствует созданию некомфортной обстановки [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

В работах [19-25] описаны опыты по изменению температуры в разных точках салона автомобиля в летнее время с использованием вентиляции и при её отсутствии. Экспериментально показано, что части тела, находящиеся под действием прямых солнечных лучей, могут нагреваться до 62 °С, голова и грудь водителя – до 43 °С, воздух в области стоп – до 32 °С.

Таким образом, на аварийность автомобиля в летний период может влиять множество факторов, таких как изменение погодных условий, температуры, влажности воздуха, увеличение времени реакции водителя вследствие изменения его состояния. В этой связи цель работы состоит в определении значимости причин аварийности на автомобильном транспорте в условиях высоких температур и солнечной радиации.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Определение наиболее значимых причин ДТП производилось экспертным методом. Он заключался в опросе профессиональных во-

дителей со стажем вождения не менее трёх лет. Число водителей соответствовало статистически значимой выборке, обеспечивало надёжность результатов не менее 90%. Основная задача анкетирования состояла в формировании списка возможных причин увеличения аварийности с последующим определением весомости влияния выявленных факторов на аварийность в летний период. Изначально при анкетировании определены комбинации следующих условий вождения автомобилей: высокая температура, солнечная радиация, наличие или отсутствие климатических установок (КУ), под которыми подразумевались, в том числе и кондиционеры в салоне автомобиля.

Для оценки значимости факторов производили ранжирование причин роста аварийности по четырёхбалльной системе, где числу «1» соответствовала наименьшая значимость, а числу «4» – наибольшая. Также нужно было указать прирост неблагоприятного эффекта в процентах в тех или иных условиях по сравнению с комфортными условиями.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 2 изображена диаграмма, показывающая степень влияния разных факторов на увеличение аварийности в летний период.



Рисунок 2 – Распределение значимости причин роста аварий на дорогах в летний период в процентах

Figure 2 – Distribution of the significance of the reasons for the increase in road accidents in the summer period as a percentage

Из представленной диаграммы следует, что увеличение количества неверно принятых решений является наиболее весомой причиной роста ДТП при увеличении температуры. Вторым по весомости фактором является увеличение времени реакции водителя, которое, вероятно, происходит из-за снижения видимости вследствие ослепления и ухудшения самочувствия водителя. Кроме того, увеличение аварийности происходит из-за более интенсивного маневрирования и увеличения скорости ТС. Данные четыре фактора суммарно обладают значимостью, равной 92,3%, и являются наиболее весомыми. В число других факторов вошли: увеличение количества ТС в летний период, более частое нарушение ПДД пешеходами, ухудшение качества дорожного покрытия вследствие появления ям, выбоин, колеиности и наплывов, увеличение случаев управления ТС в состоянии алкогольного или наркотического опьянения, более частое отвлечение водителя.

Из диаграммы, приведённой на рисунке 3, видно, что в условиях высоких температур непосредственными причинами ДТП чаще служат неверно принятые решения и увеличение времени реакции, нежели увеличение скорости и маневрирование, что объясняется негативным влиянием высокой температуры. Использование КУ возвращает температуру в салоне автомобиля в зону комфорта, что спо-

собствует снижению количества ошибочных решений и времени, требующемуся для принятия верных решений.

Благоприятные дорожные условия и удовлетворительное самочувствие водителя способствуют снижению числа аварий, происходящих по причине несвоевременности и неправильности принимаемых решений, а также увеличению аварий, происходящих за счёт увеличения скорости и интенсивности маневрирования. Таким образом, работа КУ приводит к эффекту «выравнивания», который снижает значимость наиболее весомых факторов, одновременно увеличивая весомость менее весомых факторов, приближая все значения к общему среднему. Данный факт можно объяснить улучшением самочувствия водителя и вместе с тем чрезмерно оптимистической оценкой дорожной ситуации в комфортных условиях.

Из рисунка 3,б видно, что в жаркое время наибольший прирост получают ошибки водителя, значительно замедляется реакция – происходит увеличение времени реакции более чем на 35%. Скорость и частота совершаемых маневров увеличиваются приблизительно на 15%. Использование КУ снижает уровень первых двух причин до уровня 15%. При этом средняя скорость и интенсивность маневров увеличиваются на 18–25%, что подтверждает ранее сделанные выводы.

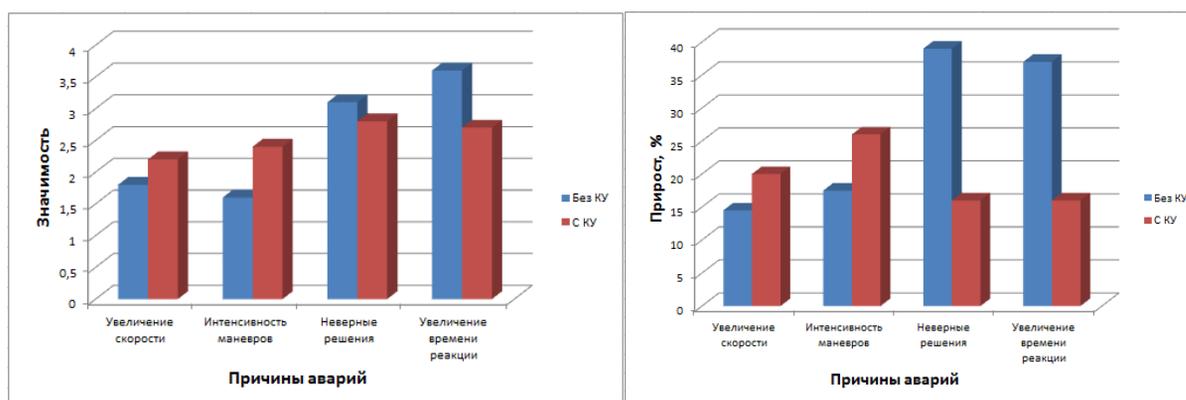


Рисунок 3 – Распределение причин роста аварийности в летнее время при высоких значениях температуры окружающего воздуха с использованием КУ и без использования КУ:
 а – влияние увеличения скорости, интенсивности маневрирования, частоты неверно принятых решений и увеличения времени реакции (по шкале от 1 до 4);
 б – увеличение скорости потока, частоты маневрирования, частоты неверно принятых решений и увеличение времени реакции водителя (в процентах)

Figure 3 – The distribution reasons for the increase of accidents in the summer, when high values of ambient air temperature using the air conditioning system and without use and the impact of increasing the speed:
 а – intensity maneuvering, the frequency of wrong decisions and increase the reaction time (on a scale from 1 to 4);
 б – increase of flow velocity, frequency of maneuver, the frequency of wrong decisions taken and increase the reaction time of the driver (in percent)

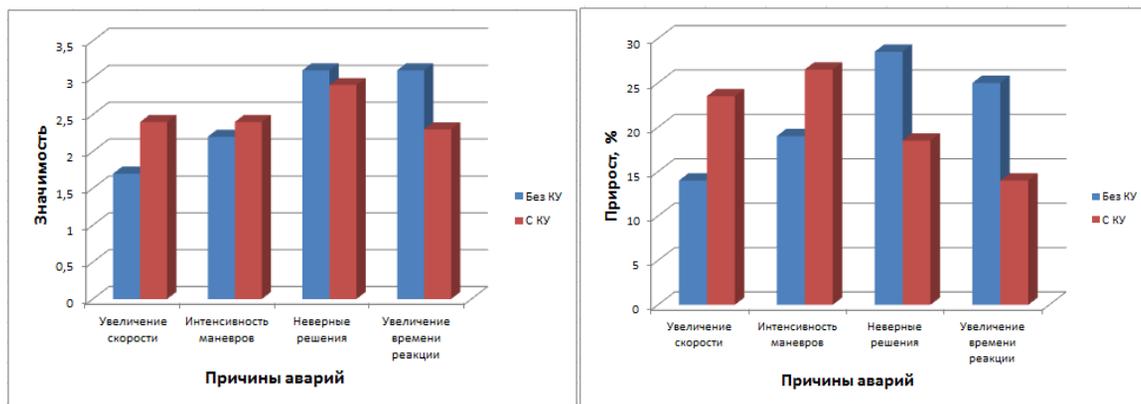


Рисунок 4 – Распределение причин роста аварийности в летнее время при высоких значениях солнечной радиации с использованием КУ и без использования КУ: а – влияние увеличения скорости, интенсивности маневрирования, частоты неверно принятых решений и увеличения времени реакции (по шкале от 1 до 4); б – увеличение скорости потока, частоты маневрирования, частоты неверно принятых решений и увеличение времени реакции водителя (в процентах)

Figure 4 – The distribution reasons for the increase of accidents in the summer, at high values of solar radiation with the use of the air conditioning system and without use and the impact of increasing the speed: а – intensity maneuvering, the frequency of wrong decisions and increase the reaction time (on a scale from 1 to 4); б – increase of flow velocity, frequency of maneuver, the frequency of wrong decisions taken and increase the reaction time of the driver (in percent)

Принято считать, что из списка внешних факторов на безопасность и комфорт водителя в первую очередь оказывает влияние температура в кабине автомобиля. Исследованию температуры в разных условиях уделяется наибольшее внимание. Однако немаловажным фактором является и солнечная радиация. Часто в летнее время года наблюдается погода с комфортными значениями температуры 15–25 °С, сопровождающаяся облучением прямыми солнечными лучами. Такие условия могут наблюдаться в ветреную погоду или в утренние часы. При этом происходит нагрев внутренних поверхностей салона автомобиля, что также приводит к росту температуры. В то же время может наступить эффект ослепления, проявляющийся, в том числе и из-за контраста освещённой и неосвещённой поверхности, создавая трудности восприятия окружающей обстановки. Эффект ослепления может проявляться и в другие времена года, но в меньшей степени, так как в летний период освещённость салона автомобиля может составлять величину порядка 10^5 Лм, в то время как в другие времена года это значение меньше в 2–5 раз.

Рисунок 4 демонстрирует распределение удельного веса причин роста аварийности при высоких значениях солнечной радиации.

Из сравнения рисунков 3 и 4 следует, что характер влияния солнечного излучения на непосредственные причины аварий схожи с

причинами в случае высоких температур с некоторыми различиями. При выключенной КУ, при заданных условиях вероятность ДТП в результате неверно принятых решений и увеличения времени реакции одинаково высока и имеет значение, равное трём по четырёхбалльной шкале, что несколько меньше данных параметров при высокой температуре. Однако вероятность аварии в результате увеличения скорости и интенсивности маневрирования при прямых солнечных лучах больше, чем при высокой температуре. При работе КУ также наблюдается эффект «выравнивания» – удельный вес наиболее значимых фактов становится меньше – наблюдается их снижение с 3 до 2,3–2,9, а удельный вес скоростного фактора и фактора маневрирования увеличивается до 2,4 по четырёхбалльной шкале. «Выравнивающий» эффект, вызванный работой КУ при высоких значениях солнечной радиации, аналогичен и сопоставим с выравнивающим эффектом при высоких температурах.

Из рисунка 4,б видно, что в условиях высокой солнечной радиации также происходит увеличение скорости потока ТС, увеличивается количество манёвров, растёт количество неверно принятых решений, увеличивается время реакции водителей. Сравнивая данные диаграмм на рисунках 3,б и 4,б, можно прийти к выводу, что при солнечной радиации увеличение средней скорости и интенсивности маневрирования даёт такой же эффект, что и при

высоких температурах. Рост количества неверно принятых решений и времени реакции при прямых солнечных лучах меньше, чем при высокой температуре – 28,5 и 25% против 39 и 37% соответственно.

Использование КУ при высоких значениях солнечного освещения, как и в случае высоких температур, приводит к увеличению скорости потока и количества маневров, одновременно снижая количество неверно принимаемых решений и времени реакции водителей. При использовании КУ прирост скорости, интенсивности маневров, неверно принимаемых решений и времени реакции водителей происходит на величины, близкие к таковым в случае высоких температур, что позволяет сделать вывод о том, что использование КУ оказывает на водителя схожее влияние как в условиях жаркой погоды, так и при высокой солнечной активности.

В целом непосредственное влияние солнечной радиации на аварийность имеет тот же уровень, что и влияние высоких температур. Возможной причиной этого эффекта может быть ухудшение видимости при ярком солнечном свете, опосредованное влияние на самочувствие водителя через другие параметры, такие как влажность и давление, неверная, чрезмерно оптимистичная оценка дорожной обстановки при благоприятных условиях и т. д.

Из сказанного выше следует, что эффект непосредственного негативного влияния сол-

нечной радиации на аварийность является самостоятельным явлением и должен рассматриваться в качестве одной из первопричин роста аварийности на дороге в летний период.

Очевидно, высокая температура и солнечная радиация приводят к росту аварийности независимо друг от друга. Однако в летний период часто эти два фактора действуют совместно.

На рисунке 5,а показаны диаграммы распределения удельного веса увеличения скорости, интенсивности маневрирования, частоты неверно принятых решений и увеличения времени реакции при высоких значениях температуры воздуха и солнечной радиации по четырёхбалльной шкале для автомобилей, оснащённых и не оснащённых КУ. На рисунке 5,б показано увеличение скорости потока, частоты маневрирования, частоты неверно принятых решений и увеличения времени реакции водителя в процентах, при высоких значениях температуры и солнечной радиации с использованием КУ и без КУ.

Характер распределения значимости причин роста ДТП в жаркое время при высоких значениях солнечной радиации повторяет характер подобного распределения для случаев влияния высокой температуры и солнечной радиации по отдельности. Однако распределение веса той или иной причины имеет свои особенности.

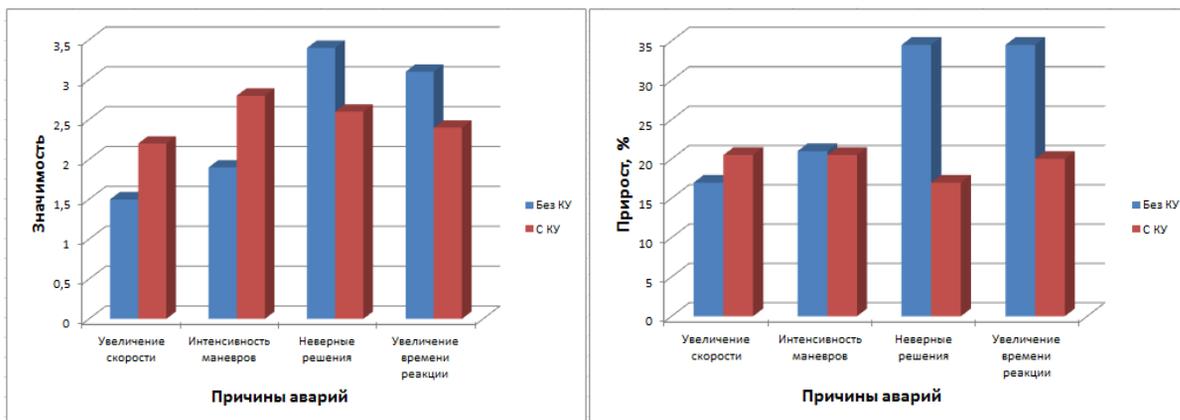


Рисунок 5 – Распределение причин роста аварийности в летнее время при высоких значениях температуры и солнечной радиации с использованием КУ и без использования КУ: а – влияние увеличения скорости, интенсивности маневрирования, частоты неверно принятых решений и увеличения времени реакции (по шкале от 1 до 4); б – увеличение скорости потока, частоты маневрирования, частоты неверно принятых решений и увеличение времени реакции водителя (в процентах)

Figure 4 – The distribution reasons for the increase of accidents in the summer when high temperatures and solar radiation using the air conditioning system and without use and the impact of increasing the speed: а – intensity maneuvering, the frequency of wrong decisions and increase the reaction time (on a scale from 1 to 4); б – increase of flow velocity, frequency of maneuver, the frequency of wrong decisions taken and increase the reaction time of the driver (in percent)

Как и в предыдущих случаях, для автомобилей, не оснащённых КУ, рост числа неверно принятых решений и увеличение времени реакции имеют большее влияние на аварийность.

Значимость увеличения скорости потока при совместном действии обоих факторов меньше, чем в каждом из них по отдельности – 1,5 против 1,8 и 1,7 для высоких температур и высокой освещённости соответственно. Значимость интенсивности маневрирования в жаркую погоду с прямыми солнечными лучами является средним арифметическим для случаев высокой температуры и солнечной радиации по отдельности – 1,9 против 1,6 и 2,2 соответственно.

При совместном действии высоких температур и солнечной радиации значимость неверно принятых решений превосходит таковые значения для каждого случая в отдельности – 3,4 против 3,1 в каждом случае. Влияние времени реакции на аварийность в жаркую солнечную погоду совпадает с аналогичным значением только для высоких значений солнечной радиации.

Для автомобилей, не оснащённых КУ, в жаркое время года при высокой освещённости увеличение скорости и рост интенсивности маневрирования больше, чем в жаркую пасмурную погоду и солнечную погоду с комфортной температурой.

Увеличение неверно принятых решений в жаркую солнечную погоду близко к среднему арифметическому от аналогичного прироста для жаркой и солнечной погоды в отдельности. Увеличение времени реакции водителей при высокой температуре и солнечной радиации (на 34,5%) также находится в промежутке между аналогичными значениями для жаркой пасмурной (37%) и прохладной солнечной (25%) погоды соответственно.

При использовании КУ в жаркую солнечную погоду происходит выравнивание прироста каждой из причин роста аварийности. Особенность движения в жаркую солнечную погоду заключается ещё и в том, что прирост интенсивности маневрирования не только приближается к приросту неверно принятых решений и увеличению времени реакции, но и превосходит их.

Из сравнения рисунков 3,б, 4,б и 5,б видно, что увеличение скорости и интенсивности маневров в жаркую солнечную погоду (по 20,5%) с работающей КУ меньше, чем аналогичный прирост в условиях, отличающихся только высокой температурой или только высоким зна-

чением солнечной радиации (от 23,5 до 26%). В аналогичных условиях увеличение неверно принятых решений близко к среднему арифметическому приросту неверных решений только в жаркую и только в солнечную погоду.

Увеличение времени реакции в условиях высокой температуры и солнечной радиации (на 20%) больше увеличения времени реакции в жаркую (на 16%) и солнечную (на 14%) погоду.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно изложенным результатам, причинами ДТП в летний период в основном являются: увеличение скорости и интенсивности маневрирования, неверно принимаемые решения и недостаточная скорость реакции водителя. Первые две причины зависят от оценки дорожной ситуации водителем, а две последние обусловлены в первую очередь самочувствием водителя в различных дорожных условиях.

Использование КУ позволяет снизить эффект увеличения аварийности в летний период, но не позволяет свести его к нулю. Это происходит по двум причинам: во-первых, при использовании КУ происходит ещё большее увеличение скорости ТС и количества маневров в единицу времени, вероятно, из-за чрезмерно оптимистичной оценки дорожной ситуации водителем; во-вторых, происходит рост количества неверно принимаемых решений и времени реакции водителей по сравнению с обстановкой, соответствующей более низкой солнечной радиации и комфортной температуре воздуха.

При включении КУ наблюдается «выравнивающий» эффект, который заключается в увеличении влияния более частого маневрирования и увеличения скорости потока, с одной стороны, и вместе с тем в снижении влияния увеличения времени реакции и неверно принимаемых решений на аварийность – с другой. В результате значимость всех четырёх факторов аварийности становится ближе к общему усреднённому значению. Данный эффект реализуется во всех трёх случаях – при высоких значениях температуры в пасмурную погоду, при высоких значениях солнечной радиации и комфортных значениях температуры, а также при совместном действии высоких температур и прямых солнечных лучей.

Исходя из полученных результатов, дальнейшую работу по исследованию причин и снижению рисков аварийности на дорогах в летнее время целесообразно вести в двух

направлениях. Первое направление подразумевает более детальное изучение влияния высоких температур и солнечной радиации на надёжность водителей. Здесь важно определить области благоприятных и неблагоприятных значений параметров окружающей обстановки.

Во-вторых, для снижения количества ДТП в жаркое время необходимо детально изучить причины увеличения скорости потока и частоты маневрирования в автомобилях с включенными КУ на фоне ТС, не использующих КУ.

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. Зотов Н.М., Балакина Е.В., Федин А.П. Определение коэффициента сцепления колеса с опорной поверхностью. Ч.1. // Автомобильная промышленность. 2006. №8. С.26-28.
3. Немчинов М.В. Сцепные качества дорожных покрытий и безопасность движения автомобилей. Москва, Транспорт, 1985. 231с.
4. Третьяков О.Б. Гудков В.А., Тарновский В.Н. Трение и износ шин. Москва, Химия, 1992. 176 с.
5. Carlos Canudas-de-Wit. Dynamic Friction Models for Road. Tire Longitudinal Interaction // Vehicle System Dynamics. 2002. Vol. 39 (3). Pp.189-226.
6. E.V. Balakina, N.M. Zotov, D.A. Maruhin, A.P. Fedin. The solution of theoretical and experimental work on the determination of coefficients of the elastic stiffness of the wheel linear and angular coordinates // Australian Journal of Scientific Research. 2014. №1 (5). V 4. Pp. 614-624.
7. Балакина Е.В., Кочетков А.В. Коэффициент сцепления шины с дорожным покрытием. Москва, Инновационное машиностроение, 2017. 292 с.
8. Скворцова Т.В. [и др.] Уравнения регрессии показателей эффективности и устойчивости торможения транспортных средств с учётом геометрии дороги // Северо-Кавказский регион: известия высших учебных заведений. Технические науки. 2006. № 5. С. 81-85.
9. Варламов В.А. Что надо знать водителю о себе. Москва, Транспорт, 1990. 192 с.
10. Верецагин, С. Б. Исследование климатических условий работы водителя. Москва, МАДИ (ГТУ), 2009. 253 с.
11. 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. 2020. Vol. 167.
12. Hunter, John. Reconstructing Collisions Involving Ice and Slippery Surfaces. SAE Paper №930896, // Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA. 1993.
13. A. Alahmera Ahmed Mayyasb Abed A. Mayyasb M.A. Omarb Dongri Shan. Vehicular thermal comfort models; a comprehensive review. Applied Thermal Engineering. 2011. Vol. 31, Iss. 6–7. Pp. 995-1002.
14. 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 p.
15. Fiala, D., Lomas, K.J., Stohrer, M. Computer prediction of human thermoregulatory responses to a wide range of environmental conditions. Int. J // Biometeorol. 2001. 45. Pp. 143-159.
16. SamrendraSingh, HesamAbbassi. 1D/3D transient HVAC thermal modeling of an off-highway machinery cabin using CFD-ANN hybrid method. Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 135. Pp. 406-417.
17. 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. 2010. 45. Pp. 380-388.
18. Yang L., Li X., Tu J. Thermal comfort analysis of a high-speed train cabin considering the solar radiation effects // Indoor and Built Environment.
19. Евтюков, С.А. Дорожно-транспортные происшествия: расследование, реконструкция, экспертиза: С.А. Евтюков, Я.В. Васильев. Санкт-Петербург, Изд-во ДНК, 2008. 536 с.
20. Буракова Л.Н. Экспериментальные исследования влияния факторов на изменения расхода топлива при работе климатической системы автомобиля // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии 2013. №6 (34). С. 7-11.
21. Eldegwy A., Khalil E.E. Passengers thermal comfort in private car cabin in hot climate // Joint Propulsion Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2018.DOI: 10.2514/6.2018-4613.
22. Szczurek A., Maciejewska M. Categorization for air quality assessment in car cabin. Transportation Research Part // J. Transport & Environment. 2016. 48. Pp. 161-170.
23. Moon J.H., Jin W.L., Chan H.J. Thermal comfort analysis in a passenger compartment considering the solar radiation effect. J. International journal of thermal sciences. 2016. 107. 77-88.
24. Zhao S., Zhu B., Wang R. Study of the influence on the comfort of vehicle cabin thermal environment and improve cabin thermal environment comfort // Fluid Machinery. 2016. 44 (7). Pp. 70-76.
25. Буракова А.Д., Буракова Л.Н. Тепловой баланс салона легкового автомобиля и анализ факторов, влияющих на холодопроизводительность установки «климат-контроль» // Проблемы функционирования систем транспорта: материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2016. Т.2. С. 54-56.

REFERENCES

1. Yakunin I.N., Men'shih O.M., Shungulov D.M. Issledovanie vlijaniya vysokoy temperatury okruzhajush-

hej srede na bezopasnost' avtotransportnogo processa [Study of the effect of high ambient temperature on the safety of the automotive process]. *Intellekt. Innovacii. Investicii*. 2019; 7: C.138-145. (in Russian)

2. Zotov N.M. Opredelenie koeficienta sčeplenija koleasa s opornoj poverhnost'ju [Determination of wheel adhesion coefficient to support surface]. *Avtomobil'naja promyshlennost'*. 2006; 8: 26-28. (in Russian)

3. Nemchinov M.V. Sčepnye kachestva dorozhnyh pokrytij i bezopasnost' dvizenija avtomobilej [Coupling qualities of road surfaces and car safety]. Moscow, Transport. 1985. 231p. (in Russian)

4. Tretyakov O.B. and others. Trenie i iznos shin [Friction and wear of tires]. Moscow. Himija, 1992. 176 p. (in Russian)

5. Carlos Canudas-de-Wit. Dynamic Friction Models for Road. Tire Longitudinal Interaction // *Vehicle System Dynamics*. 2002; 39 (3): 189-226.

6. E.V. Balakina, N.M. Zotov, D.A. Maruhin, A.P. Fedin. The solution of theoretical and experimental work on the determination of coefficients of the elastic stiffness of the wheel linear and angular coordinates. *Australian Journal of Scientific Research*. 2014;1 (5), 4: 614-624.

7. Balakina E.V. Koeficient sčeplenija shiny s dorozhnym pokrytiem [Coefficient of adhesion of the tire to the road surface]. Moscow, Innovacionnoe mashinostoenie, 2017. 292 p. (in Russian)

8. Skvorcova, T.V. Uravnenija regressii pokazatelej jeffektivnosti i ustojchivosti tormozhenija transportnyh sredstv s uchjotom geometrii dorogi [Regression equations of performance and braking stability indicators of vehicles taking into account the geometry of the road]. *Severo-Kavkazskij region: izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Tehniceskie nauki*. 2006; 5: 81-85. (in Russian)

9. Varlamov, V.A. Chto nado znat' voditelju o sebe [What the driver needs to know about himself]. Moscow. Transport, 1990. 192 p. (in Russian)

10. Vereshhagin S. B. Issledovanie klimaticheskikh uslovij raboty voditelja [Study of the climatic conditions of the driver]. Moscow, MADI (GTU), 2009. 253 p. (in Russian)

11. 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*. 2020; 167. 106456.

12. Hunter, John. Reconstructing Collisions Involving Ice and Slippery Surfaces. SAE Paper № 930896, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1993.

13. A. Alahmera Ahmed Mayyasb Abed A. MayyasbM .A. Omarb Dongri Shan. Vehicular thermal comfort models; a comprehensive review. *Applied Thermal Engineering*. 2011; 31 (6-7): 995-1002.

14. 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.

15. Fiala D., Lomas K.J., Stohrer M. Computer prediction of human thermoregulatory responses to a wide range of environmental conditions. *Int. J. Biometeorol*. 2001; 45: 143-159.

16. SamrendraSingh, HesamAbbassi. 1D/3D transient HVAC thermal modeling of an off-highway machinery cabin using CFD-ANN hybrid method. *Applied Thermal Engineering* 2018; 135: 406-417.

17. 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*. 2010; 45: 380-388.

18. Yang L., Li X., Tu J. Thermal comfort analysis of a high-speed train cabin considering the solar radiation effects. *Indoor and Built Environment*. 201920.

19. Evtyukov S.A., Vasiliev Ya.V. Dorozhno-transportnye proisshestvija: rassledovanie, rekonstrukcija, jekspertiza [Road accidents: investigation, reconstruction, expertise]. Saint Petersburg, DNA Publishing house, 2008. 536 p. (in Russian)

20. Burakova L. N. Experimental studies of the influence of factors on changes in fuel consumption during the operation of the car's climate system. *Bulletin of the Siberian state automobile and road Academy*. 2013; 6 (34): 7-11. (in Russian)

21. Eldegwy, A., Khalil, E.E. Passengers thermal comfort in private car cabin in hot climate. *Joint Propulsion Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics*. 2018. DOI: 10.2514/6.2018-4613.

22. A. Szczurek, M. Maciejewska. Categorization for air quality assessment in car cabin. *Transportation Research Part. J. Transport & Environment*. 2016; 48: 161-170.

23. Moon J.H., Jin W.L., Chan H.J. Thermal comfort analysis in a passenger compartment considering the solar radiation effect. *J. International journal of thermal sciences*. 2016; 107: 77-88.

24. Zhao S., Zhu B., Wang R. Study of the influence on the comfort of vehicle cabin thermal environment and improve cabin thermal environment comfort. *J. Fluid Machinery*. 2016; 44 (7): 70-76.

25. Burakova A.D., Burakova L. N. Teplovoj balans salona legkovogo avtomobilja i analiz faktorov, vlijajushhij na holodoproizvoditel'nost' ustanovki «klimat-kontrol'» [Thermal balance of passenger car interior and analysis of factors affecting the cooling capacity of the "climate control" installation]. *Problems of functioning of transport systems: materials of the international scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists*. 2016; 2: 54-56. (in Russian)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Якунин Иван Николаевич – ведущий инженер-технолог, ООО «Сервисный центр СБМ» (119634, г. Москва, Университетский пр., 12; тел. +79033931527, e-mail: Yakunin21@yandex.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ivan N. Yakunin – leading engineer-technologist of SBM Service Centre Limited Company (119634, Moscow, University Prospect, 12), tel. +79033931527, e-mail: Yakunin21@yandex.ru.

УДК 625

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-714-725>

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТА ИНТЕРВАЛОВ СЛЕДОВАНИЯ В ГЛАВНЫХ ПОТОКАХ ДЛЯ ПРЕОБЛАДАЮЩИХ ДОРОЖНЫХ УСЛОВИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

А.Ю. Михайлов, Е.Л. Попова

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В данной работе приведены результаты исследования методик расчета пропускной способности пересечений в одном уровне.

Целью написания данной исследовательской работы является определение оптимальной методики для расчета интервалов следования в главных потоках для преобладающих дорожных условий Российской Федерации, что в дальнейшем станет основанием для разработки новой методики для расчета пропускной способности, адаптированной для отечественных дорожных условий.

Материалы и методы. В последние десятилетия рыночных отношений в Российской Федерации можно отметить стремительное увеличение процесса автомобилизации в населенных пунктах. Предполагается, что в отечественных субъектах будет достигнута отметка в 550 автомобилей на 1000 чел к 2025 г., что значительно превосходит уровень, достигнутый на сегодняшний день в 80% европейской части Российской Федерации. Следует отметить, что при увеличении количества автомобилей и транспортных средств, уровень которых составляет более 80%, необходимо увеличение пропускной способности дорожных пересечений.

Результаты. В настоящее время методология расчета пропускной способности и длины очередей находятся на одном уровне. Следует отметить, что и существующие модели не получили должного описания в отечественной литературе, а сами расчеты выполнены с использованием моделей, разработанных в 60-70-х годах прошлого века.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: транспорт, пропускная способность, методика расчета, насыщенность транспортного потока, транспортная инфраструктура.

Поступила 30.07.20, принята к публикации 25.12.2020.

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: А.Ю. Михайлов, Е.Л. Попова. Анализ математических моделей расчета интервалов следования в главных потоках для преобладающих дорожных условий российской федерации. *Вестник СибАДИ*. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-714-725>

© Михайлов А.Ю., Попова Е.Л.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-714-725>

ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS FOR CALCULATING FOLLOWING INTERVALS IN MAIN FLOWS THE PREVAILING ROAD CONDITIONS IN THE RUSSIAN FEDERATION

Alexander Yu. Mikhailov, Ekaterina L. Popova

Irkutsk national research technical University Department of automobile transport, Irkutsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. This paper presents the results of a study on the methods for calculating the capacity of level crossings. The purpose of writing this research paper is determine the best methodology for calculating the intervals in the main flows for the prevailing road conditions in the Russian Federation, that a new methodology to calculate capacity adapted to domestic road conditions would be developed in the future.

Materials and methods. In recent decades of market relations in the Russian Federation, one can note a rapid increase in motorization in human settlements. The number in 550 vehicles per 1000 people in domestic entities is expected to have been increasde by 2025, which is significantly higher than the current level in European part of the Russian Federation. It is important to note that when the number of vehiclec is increasing, which level is about 80%, it is essential to increase road crossings capacity.

Results. At the moment the methodology for calculating capacity and queue length is the same. It should be noted that the current models are not properly described in the domestic studies, but the calculations were made using models developed in the 1960s and 1970s.

KEYWORDS: transport, capacity, calculation method, traffic flow density, transport infrastructure.

Submitted 30.07.20, revised 25.12.2020.

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: Alexander Yu. Mikhailov, Ekaterina L. Popova. Analysis of mathematical models for calculating following intervals in main flows the prevailing road conditions in the russian federation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-714-725>

© Mikhailov A.Y., Popova E.L.



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

ВВЕДЕНИЕ

В международной литературе опубликовано множество различных методов оценки критических интервалов на нерегулируемых пересечениях. В данной работе дается обзор некоторых из наиболее важных методов.

Оценка критических интервалов в наблюдаемых закономерностях движения транспортных средств является одной из наиболее сложных задач эмпирической транспортной науки.

Говоря о проблеме проектирования элементов дорожной сети (УДС), следует отметить, что перекрестки являются наиболее важным аспектом дорожной сети. Именно на них определяется максимальная суммарная интенсивность движения транспортных средств, и, следовательно, они оказывают решающее влияние на уровень обслуживания дорожного движения (LOS-уровень обслуживания) [1]. Пропускная способность улично-дорожной сети зависит от пропускной способности узких мест в дорожной сети, и это важно:

- сужение проезжей части;
- регулируемое пересечение (светофорный объект);
- нерегулируемое пересечение;
- какие-либо помехи, в результате возникновения которых образуются временные участки «узких мест» (например, остановочный пункт, место дорожно-транспортного происшествия и др.).

В отрасли изучения процессов движения транспортных средств на нерегулируемых пересечениях было выполнено достаточное количество разработок различными авторами, основоположниками которых следует считать таких ученых, как Grabe [2], Harders [3] и Siegloch [4]. Позднее были исследования, проведенные Brilon [5] и Grossman [6]. Современные ученые в своих работах могли бы сослаться на девять различных методов оценки, которые в более раннее время не охватывали всего спектра возможных процедур, которые можно было бы получить из международной литературы [2]. Сегодня было бы легко найти более 20-30 методов, опубликованных в мире для оценки критических интервалов. Все эти методы дают различные результаты. Поэтому важный вопрос заключается в том, какая из этих процедур, рекомендованных разными авторами, дает правильную оценку? А другой вопрос: как выяснить, является ли оценка правильной или нет?

В теории нерегулируемых пересечений

обычно предполагается, что водители являются одновременно последовательными. Предполагается, что последовательные водители будут вести себя одинаково каждый раз во всех схожих ситуациях. Это означает, что водитель с определенным значением t_c никогда не будет принимать разрыв меньше t_c , и он будет принимать каждый большой разрыв потока, превышающий t_c . Однако в группе из нескольких водителей, каждый из которых ведет себя последовательно, разные водители могут иметь свои собственные значения t_c . Эти значения t_c затем рассматриваются как случайная величина со специальной статистической функцией плотности $f_c(t)$ и кумулятивной функцией распределения $F_c(t)$. Группа водителей является однородной, если каждая подгруппа водителей вне группы имеет одни и те же функции $f_c(t)$ и $F_c(t)$ [7].

Для оценки критических интервалов из наблюдений был предложен большой ряд методов.

Harders на основе исследований, выполненных Grabe, разработал более развернутую процедуру измерения пропускной способности нерегулируемых пересечений, которая более точно отражала действительность ситуаций происходящих на пересечениях дорог. Ученый Siegloch подверг критике работу, которую выполнил Harders. Но несмотря на то, что он расширил и усовершенствовал процедуру определения пропускной способности (сделал ее более простой в использовании), он подтвердил теорию, которую выдвинул Harders. В пособии «*Verfahren zur Berechnung der Durchlassfähigkeit von nicht lichtsignalgesteuerten Straßenknoten*» представлено более детальное сравнение моделей, которые получили Siegloch и Harders [8].

Если обратиться к историческим сведениям, то можно заметить определенный нюанс, согласно которому улично-дорожная сеть (УДС) российских городов, сформировавшаяся в то время, когда уровень автомобилизации составлял 30-80 автомобилей на 1000 жителей, не соответствует современным требованиям. Перегрузка городских дорог в часы пик в крупных и крупнейших регионах России приводит к пробкам. Снижение пропускной способности, наблюдаемое в случае заторов, способствует снижению эффективности использования транспортных средств, чрезмерному расходу топлива, загрязнению воздуха и нерентабельному использованию времени. Все это способствует транспортным потерям пользователей городской дорожной сети [9].

Целью данного исследования является определение оптимальной методики расчета пропускной способности пересечений в одном уровне.

Также в данной работе рассмотрен опыт Германии (таблица 1) классификации уровней обслуживания на нерегулируемых пересечениях и представлены соответствующие значения средних задержек для каждого уровня [10].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе использованы эмпирические методы исследования. Изучены разнообразные источники информации, на основе полученной информации выполнен анализ.

В ходе проведенного исследования на нерегулируемых перекрестках отмечается, что его геометрия оказывает основное влияние на пропускную способность этого типа перекрестка. С учетом высоких транспортных потоков на пересечениях города обеспечение безопасности дорожного движения на перекрестках становится все более актуальным. В качестве критерия, характеризующего уровень обслуживания движения на нерегулируемых перекрестках, принимается средняя задержка на транспортное средство, которое испытывает транспортное средство при проезде через перекресток. В таблице 1 представлена классификация уровней обслуживания на нерегулируемых перекрестках и соответствующие средние задержки для каждого уровня, которые используются в Германии [11, 12].

Таблица 1
Пример шкалы оценки уровня обслуживания дорожного движения (LOS-Level of Service) на нерегулируемом перекрестке

Table 1
The example of a scale for assessing the level of road service (LOS-Level of Service) at an unregulated intersection

Уровень обслуживания движения (LOS)	Средняя задержка, с
A	≤ 10
B	≤ 20
C	≤ 30
D	≤ 45
E	> 45
F	- ¹⁾

Основой для оценки качества управления трафиком на нерегулируемых и круговых пе-

рекрестках является показатель уровня обслуживания трафика (LOS-Level of Service) [13, 14, 15]. Предполагаемые градации уровней обслуживания были разработаны в ряде стран. Например, в таблице 1 показаны границы уровней обслуживания, принятые в Германии (рекомендации HBS). Условия вождения транспортного средства, соответствующие каждому из уровней обслуживания управления HBS.

Примечание. Уровень F имеет место лишь при уровне загрузки более 1.

С учетом всех составляющих, включая оценку качества организации дорожного движения, в зарубежных руководствах процедура расчета состоит из нескольких этапов, представленных на рисунке 1 [16].

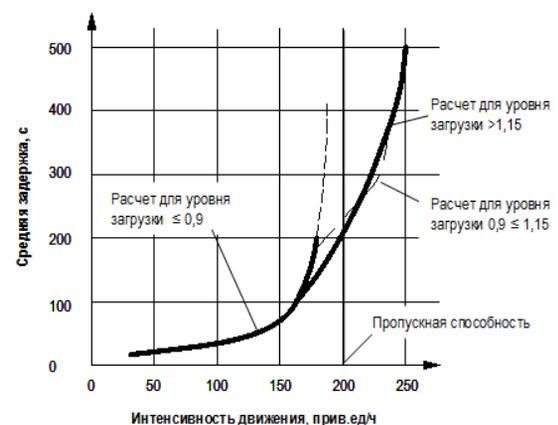


Рисунок 1 – Пример оценки транспортной задержки на нерегулируемом перекрестке

Figure 1 – The example of the transport delay estimation at an unregulated intersection

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сравниваемые отечественная ОДМ 218.2.020–2012 и немецкая методики расчета пропускной способности нерегулируемых пересечений.

Методика ОДМ 218.2.020–2012 учитывает интенсивность основного потока, состав потока, наличие продольных уклонов, наличие / отсутствие канального движения, состав потока вторичного направления, но имеет недостаток в том, что значения наиболее важных проектных параметров не обновляются (рисунок 2).

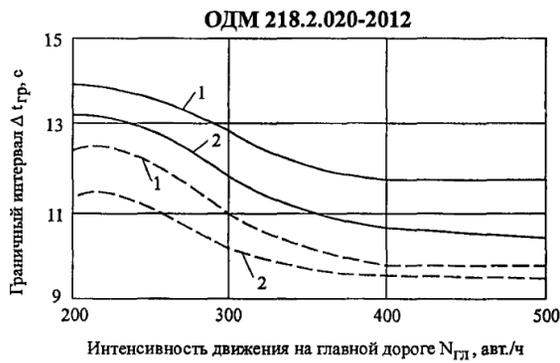


Рисунок 2 – Изменение граничного промежутка времени для левого поворота в зависимости от интенсивности движения по главной дороге

Figure 2 – Change in the boundary time interval for a left turn depending on the traffic intensity on the main road

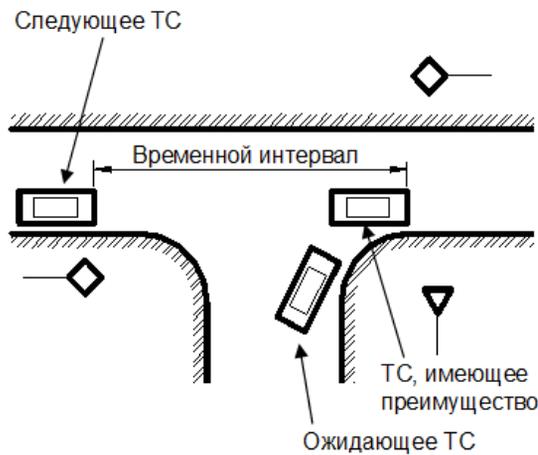


Рисунок 3 – Процесс въезда транспортного средства на перекресток из второстепенного потока (Германское руководство)

Figure 3 – The process of a vehicle entering at a crossroads from a secondary stream (German leadership)

Временной интервал, который необходим водителю для начала движения во вторичном направлении, называется граничным интервалом (рисунок 3). Классическое определение граничного интервала было сформулировано Greenshields и Raff [17, 18, 19]. Одним из первых методов оценки критических интервалов является метод Раффа, который ранее использовался во многих странах, например в работе (Retzko, 1961 г.), эта процедура была введена в Германии.

Harders' method. Хардерс (1968 г.) разработал метод оценки t_c , ставший довольно по-

пулярным в Германии. Вся практика бессигнальных пересечений в Германии до сих пор базируется на значениях t_c и $f_c(t)$, которые оценивались с помощью этой методики. Метод аналогичен методу запаздывания (метод Lag - задержка) – это время с момента прибытия второстепенного транспортного средства до прибытия следующего крупного транспортного средства. Данный метод предполагает следующие условия: последовательность водителей, независимость времени прибытия транспортного средства и транспортной ситуации на главном направлении [20, 21, 22].

Однако для процедуры Хардерса (1968 г.) «лаги» не должны использоваться в выборке. Шкала времени делится на интервалы постоянной длительности, например $\Delta t = 0.5$ с. Центр каждого интервала i обозначается t_i . Для каждого транспортного средства, стоящего в очереди на второстепенной улице, мы должны наблюдать все основные интервалы потока, которые представляются водителю, и, кроме того, принятый интервал.

Greenshields method. Greenshields определил граничный интервал t_g как интервал, который половина водителей приняли и половина отклонили. Его можно определить по медиане распределения, образованного следующим образом:

$$h^+ \frac{H^+}{H^+ + H^-}, \quad (1)$$

где $+$ – функция распределения принятых интервалов;

H^- – функция распределения отклоненных интервалов;

h^+ – функция распределения граничных интервалов.

Величина граничного интервала определяется по значению 0,5 распределения h^+ . Распределение показывает вероятность, с которой водителями может быть принят временной интервал меньше и равный соответствующему значению (рисунок 4, а). Raff определил граничный интервал как интервал, для которого число временных интервалов меньше граничного интервала, которые были отклонены водителями, равно числу принятых интервалов, больших, чем граничный интервал. При этом граничный интервал определяется точкой пересечения прямой (для принятых интервалов) и обратной (для отклоненных интервалов) кумулятивных кривых (рисунок 4, б) [23, 24].

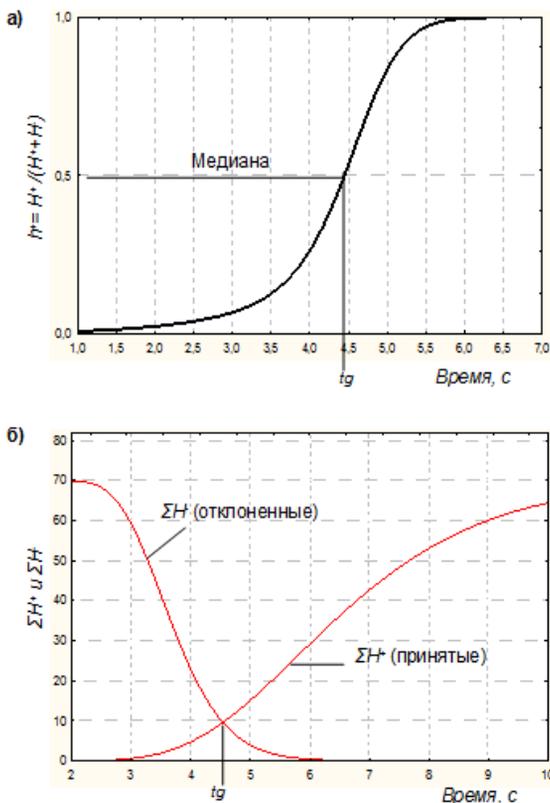


Рисунок 4 – Определение граничных интервалов по методикам, которые разработали Greenshields (а) и Raff (б)

Figure 4 – Determination of boundary intervals by the methods developed by Greenshields (a) and Raff (b)

Следует отметить, что при проведении обследований, направленных на определение основных параметров, которые описывают движение транспортных потоков на нерегулируемых перекрестках, следует помнить следующее:

1. При подходе с второстепенного направления всегда должна быть очередь не менее 5-6 транспортных средств в течение периода исследования.
2. При измерении временных интервалов между транспортными средствами, взятых во вторичном направлении между транспортными средствами в основном направлении, должны учитываться только реально принятые интервалы. Отклоненные интервалы в этом случае учитываться не должны (рисунок 5).
3. Количество обследований (измерений) должно быть достаточным для обеспечения статистической значимости ожидаемых результатов.

В сравнительном анализе российского ОДМ 218.2.020–2012 и немецкой методологии расчета пропускной способности нерегулируемых перекрестков также была выявлена одна важ-

ная проблема адаптации современных подходов к проектированию, а именно: в российском руководстве нет подробного описания потоков разных рангов [25, 26, 27].



Рисунок 5 – Номограмма для определения пропускной способности пересечения

Figure 5 – Nomogram for determining the throughput of the intersection

Немецкое руководство учитывает индивидуальные ранги, и для каждого выбирается желаемая комбинация потоков основного направления.

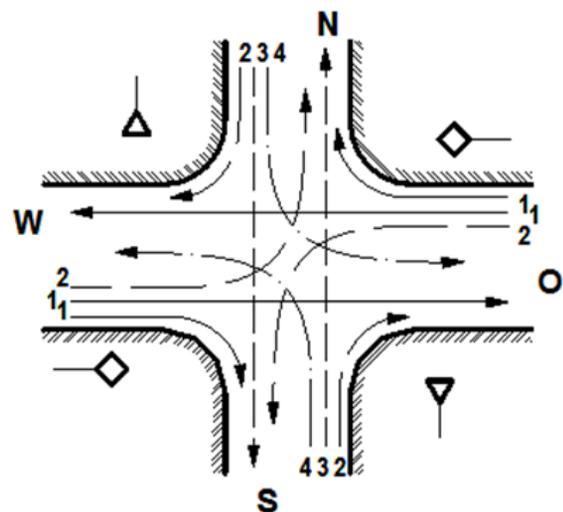


Рисунок 6 – Распределение рангов

Figure 6 – Rank distribution

Руководящие принципы HCM 2000 и HCM 2010 учитывают влияние импеданса – дополнительные помехи, создаваемые дополнительными точками конфликта после первой точки конфликта основного и вторичного потоков трафика, а также точками конфликта, созданными пешеходами (рисунок 6).

Таблица 2
Значения пропускной способности второстепенных направлений

Table 2
Secondary Directions Capacity Values

Интенсивность главного потока, авт/ч	Значения пропускной способности второстепенных направлений, авт/ч					
	Направление 2		Направление 3		Направление 4	
	НСМ 2000	ОДМ 218.020- 2012	НСМ 2000	ОДМ 218.020- 2012	НСМ 2000	ОДМ 218.020- 2012
100	1231	1428	731	1428	878	892
200	1095	1246	574	1246	792	846
300	973	1017	398	1017	714	804
400	865	907	230	907	644	758
500	768	835	67	835	579	693
600	682	794	исчерпана	794	521	641

Результаты сравнительного анализа приведены ниже. Сравнение сделано на примере Т-образного перекрестка при отсутствии пешеходного движения.

В соответствии с результатами относительного рассмотрения методология расчета пропускной способности вторичных направлений ОДМ 218.020–2012 дает завышенные значения пропускной способности для вторичных направлений движения, когда вторичный поток проходит через несколько конфликтующих точек (в этот случай, направление 3 представленное в таблице 2). Соответственно, возникают ошибки при оценке длины очереди, учитываемые при расчете геометрических параметров пересечения (длины участков накопления).

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Говоря о проектировании нерегулируемых пересечений необходимо отметить, что методология проектирования нерегулируемых перекрестков основана на использовании теории вероятностей. Уже много лет учеными и инженерами ведется работа по их усовершенствованию и обновлению. Последние руководства представляют методики расчетов, содержащие в себе много различных дорожных ситуаций. При этом стоит отметить значительный вклад немецких ученых в разработку исследования методов расчета пропускной способности для нерегулируемых пересечений. Следует отметить, что американскими учеными разработаны методики для нерегулируемых пересечений, которые основаны на разработках немецких ученых. Кроме того, американские ученые акцентируют внимание на недостаток такого же богатого опыта в об-

ласти изучения кольцевых пересечений, каким обладают немецкие эксперты.

Проанализируем более детально основу методики, которая используется американскими специалистами. На рисунке 7 изображена схема, показывающая последовательность операций при проектировании нерегулируемого пересечения.

Первоначальным шагом проектирования (оценки эффективности) является получение имеющейся информации о геометрии, имеющихся или ожидаемых интенсивностях движения пешеходных и транспортных потоков с учетом доли грузовых транспортных средств в потоке. Кроме того, берется информация о светофорных сигналах, расположенных рядом с изучаемыми нерегулируемыми перекрестками, оказывающими на него влияние. Здесь необходимо отметить, что процесс учета влияния светофоров на анализируемое пересечение используется лишь в американской методике. Германская методика не содержит в себе данной операции. Это может быть обосновано тем, что, по мнению германских ученых, светофоры оказывают небольшое воздействие на изучаемый нерегулируемый перекресток. Использование такого рода операции только усложняет вычисления.

Последующим шагом считается определение типов конфликтных потоков, для которых в будущем определяются базовые и фактические значения пропускной способности по надлежащим формулам.

Следующая стадия предполагает собой вычисление базовой пропускной способности для каждого направления. К примеру, в нынешней немецкой методике с целью установления ба-

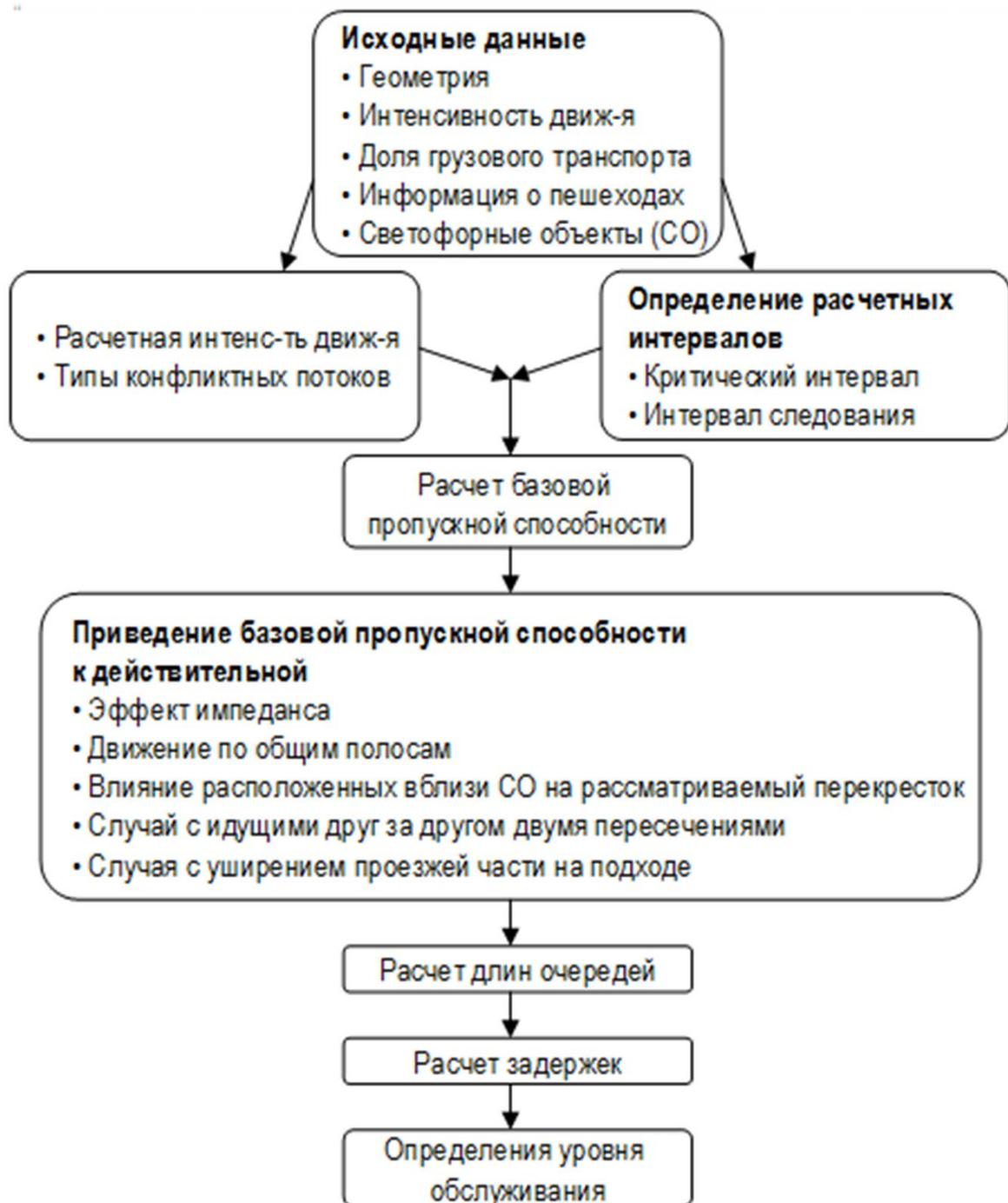


Рисунок 7 – Методология проектирования нерегулируемых пересечений

Figure 7 – Design methodology for unregulated intersections

звой пропускной способности используется формула

$$G_i = \frac{3600}{t_f} e^{-\frac{q_p}{3600} \left(t_g - \frac{t_f}{2} \right)}, \quad (2)$$

где G_i – базовая пропускная способность второстепенного потока i , прив.ед/ч;

q_p – расчетная интенсивность приоритетно направленного первого ранга, авт/ч;

t_g – средний граничный интервал, с;

t_f – средний интервал следования, с.

Уже после этого, как определена базовая пропускная способность, следует базовые условия привести к реальным. Здесь используются вспомогательные процедуры, которые учитывают тип второстепенного направления. Учитывается особенность движения двух направлений по одной смешанной полосе движения, влияния, расположенные вблизи [25]. Кроме того, берется во внимание воздействие на пропускную способность уширения проезжей части на подходе к перекрестку.

Заключительными стадиями, относящимися к оценке уровня обслуживания, считается вычисление временных задержек, длин очереди и определенных уровней обслуживания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведен сравнительный анализ методик расчета пропускной способности руководства ОДМ 218.2.020-2012-Раздел 6.1 «Пропускная способность пересечений в одном уровне», руководство HCM 2000, 2010, Capacity and Level of Service at Finnish Unsignalized Intersections. Следует отметить, что методы проектирования нерегулируемых перекрестков улучшаются и обновляются. Новейшие возможные методы расчета. Следует отметить серьезный вклад немецких исследователей в разработку методов нерегулируемых и, в частности, кольцевых пересечений. Например, американские методы расчета нерегулируемых перекрестков основаны на разработках немецких специалистов. Американские эксперты подчеркивают отсутствие такого же богатого опыта в области исследований кольцевых пересечений, которым владеют немецкие ученые [28].

Рассмотрено, что геометрия нерегулируемых перекрестков оказывает основное влияние на пропускную способность этого типа перекрестка. С учетом высоких транспортных потоков на перекрестках обеспечение безопасности дорожного движения на перекрест-

ках становится все более важным. В качестве критерия, характеризующего уровень обслуживания движения на нерегулируемых перекрестках, принимается средняя задержка на транспортное средство, которое испытывает транспортное средство при проезде через перекресток.

Наиболее значимым отличием методики, представленной в ОДМ 218.2.020–2012, является отсутствие в ней оценки качества организации дорожного движения на нерегулируемых и кольцевых пересечениях. Критерием оценки качества организации движения на нерегулируемых и кольцевых пересечениях является величина средней задержки транспортных средств второстепенных направлений движения, процедура расчета которой не рассмотрена в руководстве ОДМ 218.2.020–2012.

Современные зарубежные руководства детально рассматривают процесс движения на нерегулируемых и кольцевых пересечениях, но методика расчета является трудоемкой.

Рассмотрено классическое определение граничного интервала, выведенное Greenshields и Raff, данными авторами был определен временной интервал, который необходим водителю для начала движения во вторичном направлении.

Данная работа положит начало в разработке адаптированного для отечественных условий руководства для расчета пропускной способности пересечений улично-дорожной сети.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Grabe W. Performance determination of non-light signal controlled road traffic junctions // Research work from road traffic. 1954. No 11.
3. Harders J. border and follow-up time gaps as a basis for calculating the performance of rural roads // Road construction and Road Traffic Engineering. 1968. No 216.
4. Sieglöch W. Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalsteuerung // Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. 1973; 154.
5. Brilon, W. further development of the calculation methods for junctions without light signalling systems in the Federal Republic of Germany // International Workshop Knotenpunkte without light signal systems. Conference documents, Bochum March. 1988.
6. Grossmann M. methods for the calculation and assessment of performance and traffic quality at junctions without light signalling systems // Series of papers chair of traffic management Ruhr-Universität Bochum. 1991. No 9.

7. Жигадло А.П., Дубынина М.Г. Влияние психофизиологических особенностей личности водителя на надежность управления транспортным средством // Вестник Сибирского отделения Академии военных наук. 2018. № 49. С.119-130.

8. Корчагин В.А., Ляпин С.А., Клявин В.Э., Ситников В.В. Повышение безопасности движения автомобилей на основе анализа аварийности и моделирования ДТП // Фундаментальные исследования. 2015. №6. С. 251-256.

9. Evtuykov S., Karelina M., Terentyev A. A method for multicriteria evaluation of the complex safety characteristic of a road vehicle // Transportation Research Procedia. 2018. Vol. 36. Pp. 149-156. DOI: org/10.1016/j.trpro.2018.12.057.

10. Evtuykov S., Repin S. Renewal Methods of Construction Machinery According to Technical and Economic Indicators // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vols. 725-726. Pp. 990-995. URL: <https://www.scientific.net/AMM.725-726.990>.

11. Valeriy Kapitanov, Valentin Silyanov, Olga Monina, Aleksandr Chubukov. Methods for traffic management efficiency improvement in cities // Transportation Research Procedia. 2018. Vol. 36. Pp. 252-259. DOI: org/10.1016/j.trpro.2018.12.077.

12. Домке Э.Р., Жесткова С.А. Вероятностная модель торможения колесной машины // Мир транспорта и технологических машин. 2011. № 2 (33). С. 3-7.

13. Brannolte U., Pribyl P., Silyanov V. Simulation of Regional Mortality Rate in Road Accidents Transportation Research Procedia. 2017. Vol. 20, Pp. 112-124. DOI: org/10.1016/j.trpro.2017.01.032.

14. 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. С. 58-65. DOI: org/10.33979/2073-7432-2019-66-3-3-8.

15. Евтюков С.А. Васильев Я.В. Дорожно-транспортные происшествия: расследование, реконструкция, экспертиза. Санкт-Петербург, ДНК, 2012. 392 с.

16. Трофименко Ю.В. [и др.]. Велосипедный транспорт в городах. Москва, МАДИ, 2020. 154 с.

17. Kurakina E., Evtiukov S, Ginzburg G. Systemic indicators of road infrastructure at accident clusters // Architecture and Engineering. 2020Ю Т. 5, No 1. Pp. 51-58. DOI: org/10.23968/2500-0055-2020-5-1-51-58.

18. Куракина Е.В. Об эффективности проведения исследований мест концентрации ДТП // Вестник гражданских инженеров СПбГАСУ. 2018. №2 (67). С.231237. DOI: org/10.23968/1999-5571-2018-15-2-231-23.

19. Куракина Е.В., Евтюков С.С., Голов Е.В. Реконструкция дорожно-транспортных происшествий. Санкт-Петербург, Петрополис, 2017. 204 с.

20. Складорова А.А., Складоров Р.А., Хайров В.В. Совершенствование механизации производства работ технологии ГНБ // Актуальные проблемы современного строительства: материалы 72-й Всероссийской научно-практической конференции студентов,

аспирантов и молодых ученых в 2-х ч. 2019. Ч. 2. С. 129-135.

21. Складорова А.А., Складоров Р.А., Щербаков А.П. Комплексная система оценки эффективности НТТМ при бестраншейной разработке грунта // Магистратура – автотранспортной отрасли : материалы IV Всероссийской межвузовской конференции «Магистерские слушания». 2019. Ч. 1. С. 149-153.

22. Евтюков С.А., Лутов Д.А., Шиманова А.А. Управление жизненным циклом машины с целью повышения эффективности использования парка машин для зимнего содержания дорог // Вестник гражданских инженеров. 2017. №4 (63). С. 205-211.

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

24. Жанказиев, С.В., Власов В.М. Научные подходы к формированию государственной стратегии развития интеллектуальных транспортных систем // Научные аспекты развития транспортно-телематических систем. 2010. С. 46-68.

25. Плотников А.М. Управление безопасностью дорожного движения на одноуровневых перекрестках. Санкт-Петербург, ООО «Экспертные решения», 2014. 404 с.

26. Evtiukov S. A., Kurakina E. V., Evtiukov S. S. Smart Transport in road transport infrastructure // Materials Science and Engineering. 2020. № 832. DOI: org/10.1088/1757-899X/832/1/012094.

27. Мельников И.И., К.А. Демиденков, Емельянов И.А., Евсеенко И.А. Детектор движения на основе импульсных нейронных сетей // Информационные технологии. 2013. № 7. С. 57-60.

28. Амосов О.С., Иванов Ю.С. Модифицированный алгоритм локализации номерных знаков транспортных средств на основе метода Виолы-Джонса // Информатика и системы управления. 2014. Т. 39. № 1. С. 127-140.

REFERENCES

1. 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. No. 2 (75). S. 14-18. (in Russian)

2. Grabe W. performance determination of non-light signal controlled road traffic junctions // Research work from road traffic. 1954; 11.

3. Harders J. border and follow-up time gaps as a basis for calculating the performance of rural roads // Road construction and Road Traffic Engineering. 1968; 216.

4. Sieglöch W. Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalsteuerung // Strabenbau und Strabenverkehrstechnik. 1973; 154.

5. Brilon W. further development of the calculation methods for junctions without light signalling systems in the Federal Republic of Germany // International Workshop Knotenpunkte without light signal systems. Conference documents, Bochum March. 1988.

6. Grossmann M. methods for the calculation and assessment of performance and traffic quality at junctions without light signalling systems // Series of papers chair of traffic management Ruhr-Universität Bochum.1991. No 9.
7. Zhigadlo A.P., Dubynina M.G. Vliyanie psihofiziolozhicheskikh osobennostej lichnosti voditelja na nadezhnost' upravlenija transportnym sredstvom [Influence of psychophysiological characteristics of the driver's personality on the reliability of vehicle control]. *Bulletin of the Siberian Branch of the Academy of Military Sciences*. 2018.No. 49. C.119-130. (in Russian)
8. Korchagin V.A., Lyapin S.A., Klyavin V.E., Sitnikov V.V. Povyshenie bezopasnosti dvizhenija avtomobilej na osnove analiza avarijnosti i modelirovanija DTP [Increasing the safety of vehicles based on the analysis of accidents and accident modeling]. *Fundamental research*. 2015; 6: 251-256. (in Russian)
9. Evtyukov S., Karelina M., Terentyev A. A method for multicriteria evaluation of the complex safety characteristic of a road vehicle. *Transportation Research Procedia*. 2018; 36: 149-156. DOI: org/10.1016/j.trpro.2018.12.057.
10. Evtyukov S., Repin S. Renewal Methods of Construction Machinery According to Technical and Economic Indicators // Applied Mechanics and Materials. 2015; 725-726: 990-995. URL: <https://www.scientific.net/AMM.725-726.990>. DOI: org/10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.990. (in Russian)
11. Valeriy Kapitanov, Valentin Silyanov, Olga Monina, Aleksandr Chubukov. Methods for traffic management efficiency improvement in cities. *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36. Pp. 252-259. DOI: org/10.1016/j.trpro.2018.12.077.
12. Domke E.R., Zhestkova S.A. Veroyatnostnaja model' tormozhenija kolesnoj mashiny [Probabilistic model of braking of a wheeled vehicle]. *World of transport and technological machines*. 2011. No. 2 (33): 3-7. (in Russian)
13. Brannolte U., Pribyl P., Silyanov V. Simulation of Regional Mortality Rate in Road Accidents Transportation Research Procedia. 2017; 20: 112-124. DOI: org/10.1016/j.trpro.2017.01.032.
14. 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: 58-65. DOI: org/10.33979/2073-7432-2019-66-3-3-8. (in Russian)
15. Evtyukov S.A. Vasiliev Ya.V. Dorozhno-transportnye proisshestvija: rassledovanie, rekonstrukcija, jekspertiza [Road traffic accidents: investigation, re-construction, expertise]. St. Petersburg, DNA, 2012. 392 p. (in Russian)
16. Trofimenko Yu.V. [and etc.]. Velosipednyj transport v gorodah [Cycling transport in cities]. Moscow, MADI, 2020. 154 p. (in Russian)
17. Kurakina E., Evtiukov S, Ginzburg G. Systemic indicators of road infrastructure at accident clusters. *Architecture and Engineering*. 2020; 5(1): 51-58. DOI: org/10.23968/2500-0055-2020-5-1-51-58.
18. Kurakina E.V. Ob jeffektivnosti provedenija issledovanij mest koncentracii [On the effectiveness of research of the places of concentration of road accidents]. *Bulletin of civil engineers of SPbGASU*. 2018; 2 (67): 231-237. DOI: org/10.23968/1999-5571-2018-15-2-231-23. (in Russian)
19. Kurakina E.V., Evtyukov S.S., Golov E.V. Rekonstrukcija dorozhno-transportnyh proisshestvij [Reconstruction of road traffic accidents]. St. Petersburg, Petropolis, 2017. 204 p.
20. Sklyarova A.A., Sklyarov R.A., Khayrov V.V. Sovershenstvovanie mehanizacii proizvodstva rabot tehnologii GNB [Improvement of mechanization of production of HDD technology works]. *Actual problems of modern construction: materials of the 72nd All-Russian scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists in 2 hours*. 2019; 2: 129-135. (in Russian)
21. Sklyarova A.A., Sklyarov R.A., Shcherbakov A.P. Kompleksnaja sistema ocenki jeffektivnosti HTTM pri bestranshejnoj razrabotke grunta [Comprehensive system for assessing the effectiveness of HTTM in trenchless soil development]. *Magistracy – motor transport industry: materials of the IV All-Russian interuniversity conference "Master's hearings"*. 2019; 1: 149-153. (in Russian)
22. Evtyukov S.A., Lutov D.A., Shimanova A.A. Upravlenie zhiznennym ciklom mashiny s cel'ju povyshenija jeffektivnosti ispol'zovanija parka mashin dlja zimnego sodержanija dorog [Machine life cycle management with the aim of increasing the efficiency of using the fleet of cars for winter road maintenance]. *Bulletin of civil engineers*. 2017; 4 (63): 205-211. (in Russian)
23. Zhankaziev S.V., Vorobiev A.I., Morozov D.Yu. Tendencii razvitija avtonomnyh intellektual'nyh transportnyh sistem v Rossii [Trends in the development of autonomous intelligent transport systems in Russia]. *Transport RF*. 2016; 5 (66): 26-28. (in Russian)
24. Zhankaziev, S.B., Vlasov V.M. Nauchnye podhody k formirovaniju gosudarstvennoj strategii razvitija intellektual'nyh transportnyh sistem [Scientific approaches to the formation of a state strategy for the development of intelligent transport systems]. *Scientific aspects of the development of transport-telematic systems*. 2010. 46-68. (in Russian)
25. Plotnikov A.M. Upravlenie bezopasnost'ju dorozhnogo dvizhenija na odnourovnevnyh perekrestkah [Road safety management at single-level crossroads]. St. Petersburg, LLC "Expert solutions", 2014. 404 p.
26. Evtiukov S. A., Kurakina E. V., Evtiukov S. S. Smart Transport in road transport infrastructure. *Materials Science and Engineering*. 2020; 832. DOI: org/10.1088/1757-899X/832/1/012094. (in Russian)
27. Melnikov I.I., Demidenkov K.A., Emelyanov I.A., Evseenko I.A. Detektor dvizhenija na osnove impul'snyh nejronnyh setej [Motion detector based on impulse neural networks]. *Information technologies*. 2013; 7: 57-60. (in Russian)

28. Amosov O.S., Ivanov Yu.S. Kurakina E.V., Evtuykov S.S. Modificirovannyj algoritm lokalizacii normnyh znakov transportnyh sredstv na osnove metoda Violy-Dzhonsa [Road safety audit as an element of systemic management of activities to prevent road accidents]. *Materials of the IV International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Innovations in Transport (Oryol State University named after I.S. Turgenev)*, 2019. 126-132. (in Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Михайлов Александр Юрьевич. Предоставил теоретическую базу для исследования, выполнил корректировку проведенного анализа.

Попова Екатерина Леонидовна. Провела сравнительный анализ методик расчета пропускной способности.

AUTHORS CONTRIBUTION

Mikhailov Alexander. Provided a theoretical basis for the study, performed the adjustment of the analysis.

Popova Ekaterina. Conducted a comparative analysis of the methods for calculating the throughput.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Михайлов Александр Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры автомобильного транспорта Иркутского научного исследовательского технического университета г. Иркутск ул. Лермонтова 83, тел. 8(3952)40-51-36, e-mail: mikhaylov_ay@mail.ru.

Попова Екатерина Леонидовна – аспирант кафедры автомобильного транспорта Иркутского научного исследовательского технического университета г. Иркутск ул. Лермонтова 83, тел. 89149097495, e-mail: katerinapiskovec@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhailov Alexander Yurievich – doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automobile Transport of the Irkutsk Scientific Research Technical University, Irkutsk, Lermontova st. 83, tel. 8 (3952) 40-51-36, e-mail: mikhaylov_ay@mail.ru.

Popova Ekaterina Leonidovna – postgraduate student of the department of road transport, Irkutsk Scientific Research Technical University, Irkutsk, Lermontova st. 83, tel. 89149097495, e-mail: katerinapiskovec@mail.ru.

УДК 656.13

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-726-735>

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АДАПТАЦИИ МОДЕЛИ РЕГУЛИРУЕМОГО ПЕРЕСЕЧЕНИЯ

И.А. Новиков, А.Г. Шевцова, А.А. Кравченко, А.Г. Бурлуцкая*
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
г. Белгород, Россия
*shevcova-anastasiya@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена разработке алгоритма проверки оценки адекватной работы транспортной модели и применению данного алгоритма на практике. Проведены исследования на регулируемом пересечении в г. Белгороде, определены основные параметры, необходимые для создания транспортной модели. Создана транспортная модель исследуемого пересечения, выполнена оценка адекватной работы модели, предложены мероприятия, повышающие пропускную способность исследуемого участка улично-дорожной сети.

Методы и материалы. Основное внимание уделено использованию программного обеспечения, позволяющего моделировать транспортные процессы на начальных стадиях проведения мероприятий, связанных с организацией или реорганизацией дорожного движения. Моделирование является быстрым, удобным и экономически выгодным способом оценки эффективности организации дорожного движения. Процесс моделирования помогает выбрать наиболее оптимальное решение для транспортной инфраструктуры.

Результаты. Авторами разработан алгоритм проверки адаптации модели регулируемого перекрестка в программной среде Aimsun, предложен новый план координации для пересечения.

Заключение. Сделан вывод о необходимости использования программных продуктов, предназначенных для моделирования транспортных систем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: организация дорожного движения, имитационное моделирование, транспортное моделирование, оценка адекватности, ковариация, интенсивность.

Поступила 05.10.20, принята к публикации 25.12.2020.

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: И.А. Новиков, А.Г. Шевцова, А.А. Кравченко, А.Г. Бурлуцкая. Разработка методики адаптации модели регулируемого пересечения. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-726-735>

© Новиков И.А., Шевцова А.Г., Кравченко А.А., Бурлуцкая А.Г.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-726-735>

DEVELOPMENT OF A PROCEDURE FOR ADAPTING A MODEL OF ADJUSTABLE INTERSECTION

Ivan A. Novikov, Anastasia G. Shevtsova*, Andrey A. Kravchenko, Alina G. Burlutskaya
V.G. Shukhov Belgorod State Technological University
*shevcova-anastasiya@mail.ru
Belgorod, Russia

ABSTRACT

Introduction. The article is devoted to the development of an algorithm for checking the assessment of the adequate operation of the transport model and the application of this algorithm in practice. The research has been carried out at a regulated intersection in Belgorod, the main parameters necessary for creating a transport model have been determined. A transport model of the investigated intersection was created, an assessment of the adequate operation of the model was made, measures were proposed to increase the capacity of the investigated section of the road network.

Methods and materials. The main attention is paid to the use of the software that allows simulating transport processes at the initial stages of activities related to the organization or reorganization of road traffic. Simulation is a fast, convenient and cost-effective way to assess the effectiveness of traffic management. The modeling process helps to select the most optimal solution for the transport infrastructure.

Results. The authors have developed the algorithm for checking the adaptation of the controlled crossing model in the Aimsun software environment, and proposed a new coordination plan for crossing.

Conclusion. It is concluded that it is necessary to use the software products intended for modeling transport systems.

KEYWORDS: traffic management, simulation, traffic simulation, adequacy assessment, covariance, intensity.

Submitted 05.10.20, revised 25.12.2020.

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: Ivan A. Novikov, Anastasia G. Shevtsova*, Andrey A. Kravchenko, Alina G. Burlutskaya. Development of a procedure for adapting a model of adjustable intersection. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-726-735>

© Novikov I.A., Shevtsova A.G., Kravchenko A.A., Burlutskaya A.G.



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

ВВЕДЕНИЕ

Дорожное движение, в котором участвует практически все население государства и миллионы автомобилей, играет важную роль в жизни современного общества. Управление дорожным движением невозможно без технических средств организации дорожного движения и обустройства автомобильных дорог. С каждым годом автомобильный парк растет большими темпами, дороги и дорожные пересечения не всегда способны пропускать большое количество транспорта. В связи с этим перед человечеством возникают проблемы, связанные с предупреждением аварийных ситуаций и одновременным обеспечением высоких скоростей движения.

Нельзя проводить эффективные мероприятия по организации дорожного движения без их технико-экономического обоснования. Перед тем как приступить к проведению конкретных работ на улично-дорожной сети, создаются имитационные модели пересечений. Моделирование позволяет оценить и выбрать наиболее оптимальное мероприятие по организации дорожного движения. Создание имитационных моделей реального объекта облегчает труд проектировщиков, сокращает расходы и время на проектирование реальных транспортных объектов.

Главным условием при создании моделей является необходимость соответствия параметров модели и параметров реального объекта. Необходимо построить модель с такими параметрами дорог, автомобилей, средств ОДД, чтобы они соответствовали фактическим данным. Для этого существует такое понятие, как адекватность модели и оценка адекватности.

Для проведения исследований по оценке адекватности возникает вопрос о необходимости разработки методики адаптации транспортной модели перекрестка. Данная методика позволит определить, по каким параметрам лучше всего оценивать адекватную работу модели и при каком коэффициенте адекватности можно проводить работы по организации дорожного движения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Существует большое количество программных компонентов, предназначенных для моделирования (Aimsun, IndorCAD, VISSIM, CORSIM). Программы моделируют транспортные потоки на макро-, мезо- и микроуровнях, благодаря чему можно смоделировать транспортные потоки как целого города или отдель-

ных районов, так и конкретно взятого пересечения УДС.

При моделировании транспортных систем важным условием является адекватная работа модели. Адекватность характеризует точность получившейся модели. Для оценки адекватности существует три метода сравнения расчетных и экспериментальных данных. Для оценки адекватности используем первый метод: Коэффициент U – статистики Зейла (корреляционный анализ), который заключается в использовании второго критерия – коэффициента ковариации [1,7,8].

Для оценки адекватной работы модели необходимо определиться, по каким параметрам будет производиться сравнение модели и реального объекта. Для оценки адекватности смоделированного пересечения сравним такие параметры, как интенсивность, скорость, время задержки и длина очереди. Сравнив при помощи корреляционного метода параметры модели и реального пересечения, сделаем вывод о наличии адекватной работы моделируемого объекта.

Объектом данного исследования является процесс движения на участке улично-дорожной сети г. Белгорода пересечение ул. Николая Чумичова – Белгородский пр. (рисунок 1). Пересечение находится в центре города и имеет большое количество точек притяжения, высокую интенсивность и является одним из значимых участков УДС в городе [2,3].

После создания транспортной модели необходимо выполнить оценку адекватности. Адекватность показывает, насколько точно транспортная модель соответствует реальной дорожной ситуации. Моделируемый объект должен иметь такие параметры, в результате которых модель будет схожа с реальными условиями. На основании изученной литературы [10, 11, 12,13] были определены основные входные и выходные параметры: интенсивность, скорость транспортных средств, задержка, длина очереди. Возникает вопрос, по какому параметру лучше производить оценку моделируемого пересечения. Для определения данного параметра используем метод корреляционного анализа – Коэффициент U – статистики Зейла. Коэффициент доли ковариации оценивает остаточную ошибку:

$$U^c = \frac{2(1-r)*s * s^{obs}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n} \quad (1)$$

где r – корреляция между экспериментальными и расчетными данными (диапазон -1;+1).

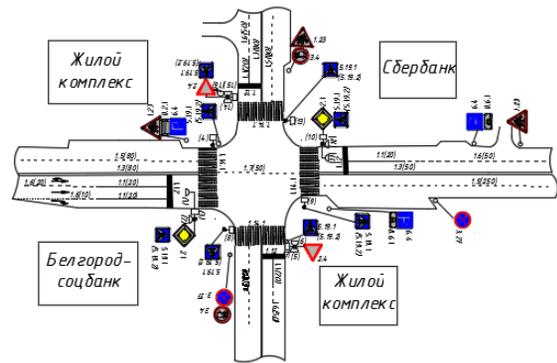


Рисунок 1 – Локализация исследуемого участка

Figure 1 – Localization of the researched area

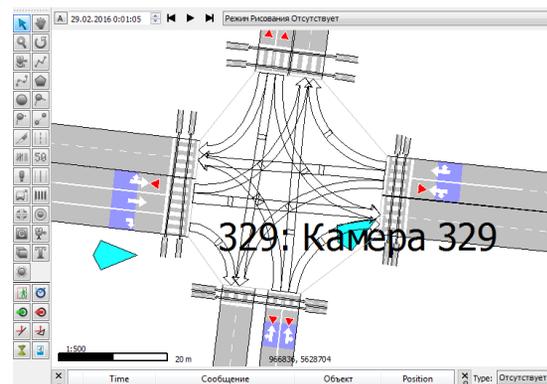
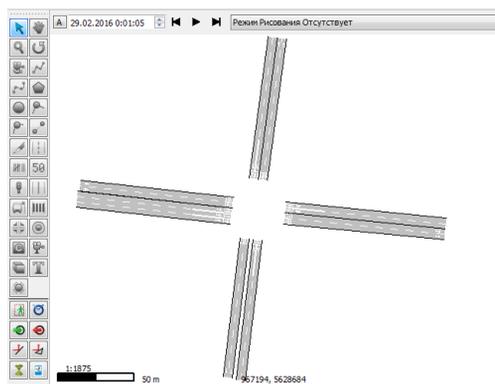


Рисунок 2 – Этапы создания транспортной модели в программном обеспечении Aimsun

Figure 2 – Stages of creating a transport model in Aimsun software

Коэффициент корреляции показывает статистическую зависимость между двумя числовыми переменными. Коэффициент корреляции – показатель, характеризующий отношение экспериментальных и расчетных данных. Коэффициент оценивает остаточную ошибку, а именно погрешность между параметрами модели и реального объекта [9]. Для определения данного коэффициента необходимо провести сравнительный анализ параметров исследуемого объекта: существующие и моделируемые параметры (рисунок 3).

Определив значения параметров исследуемого объекта, существующих и моделируемых, становится возможным выполнить расчет значений коэффициентов корреляции, оценивающих интенсивность, скорость, максимальную длину очереди, задержки транспортных средств [6]. Расчетные значения представлены в таблице 1.

Параметр интенсивности является наиболее подходящим параметром для оценки

адекватности транспортной модели, так как коэффициент корреляции параметра близок к единице. Оценим адекватную работу транспортной модели при помощи метода корреляционного анализа – Коэффициент U – статистики Зейла, это позволяет использовать ее для проведения работ по реорганизации дорожного движения на данном пересечении.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Определив оптимальные параметры для проверки оценки адекватности моделирования и выявив рациональный подход, в рамках данного исследования мы разработали алгоритм проверки адекватности, который позволяет проверить соответствие работы моделируемого объекта и существующего объекта УДС на основании комплексного подхода с учетом ряда характеристик транспортного потока (интенсивность, скорость, максимальная длина очереди и время задержки).

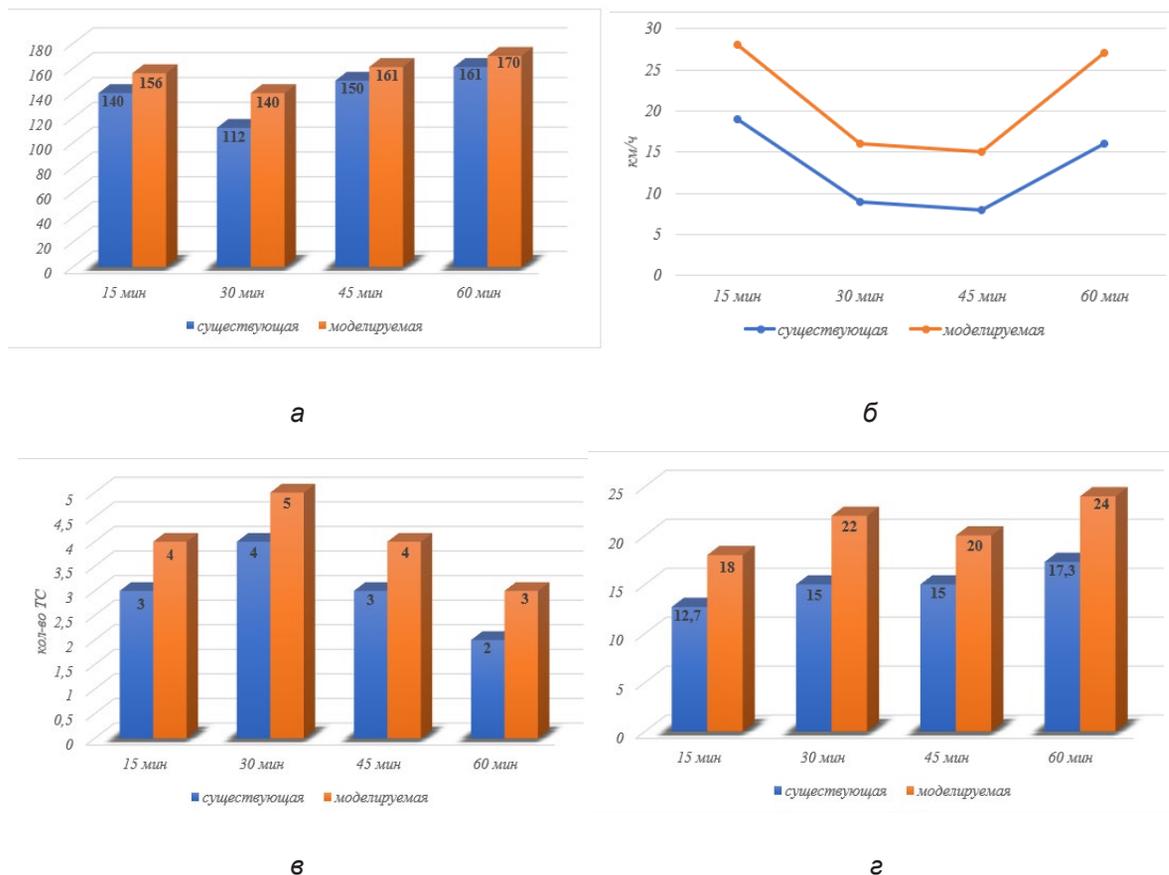


Рисунок 3 – Параметры существующие и моделируемые: а – интенсивность, б – скорость, в – длина очереди, г – задержки

Figure 3 – Parameters existing and simulated: a – intensity, b – speed, c – queue length, d – delays

Таблица 1
Параметры регулирования

Table 1
Control parameters

Параметр	15 мин	30 мин	45 мин	60 мин
Временной ряд				
Интенсивность (существующая)	140	112	150	161
Интенсивность модели	156	140	161	170
Коэффициент корреляции ρ	0,89	0,80	0,93	0,95
Скорость ТС (существующая)	19	9	8	16
Скорость ТС (модели)	28	16	15	27
Коэффициент корреляции ρ	0,67	0,56	0,53	0,63
Максимальная длина очереди (существующая)	3	4	4	2
Максимальная длина очереди (модели)	4	5	4	3
Коэффициент корреляции ρ	0,75	0,8	0,75	0,68
Задержки ТС (существующая)	12,7	15	15	17,3
Задержки ТС (модели)	18	22	20	24

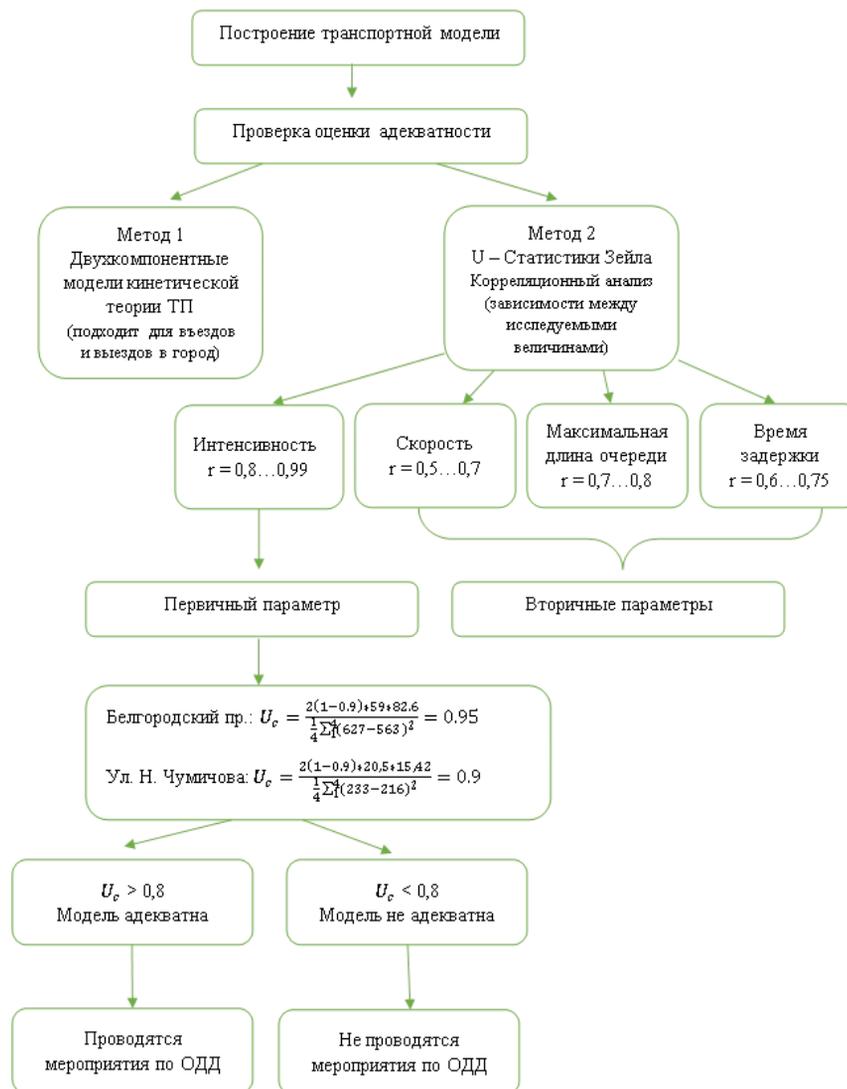


Рисунок 4 – Алгоритм проверки оценки адекватности транспортной модели

Figure 4 – Algorithm for checking the adequacy of the transport model

Ранее существующие методы оценки адекватности моделирования основывались на рассмотрении интенсивности, но разработанный алгоритм позволяет производить оценку по вторичным параметрам, что ранее не предусматривалось (рисунок 4).

Разработанный алгоритм проверки оценки адекватности транспортной модели включает несколько последовательно связанных этапов.

Построение модели в программном продукте, моделирующем транспортные потоки (в нашем случае использовался Aimsun).

Из двух предложенных методов выбрать наиболее подходящий и выполнить оценку адекватности. Метод 1 (Двухкомпонентные модели кинетической теории транспортных потоков) подходит для пересечений, находя-

щихся на въездах и выездах в город. Метод 2 (U – статистика Зейла (корреляционный анализ)), заключается в исследовании зависимостей между величинами. Так как пересечение Белгородский пр. – ул. Н. Чумичова находится в центре города, для оценки моделируемого пересечения нам подходит метод 2.

Для метода корреляционного анализа исследуем следующие величины: интенсивность ТП, скорость ТС, время задержки и максимальную длину очереди. Наибольшая корреляция наблюдается у параметра интенсивность $r = 0,8...0,99$, у остальных параметров $r = 0,5...0,8$. Следовательно, для дальнейших расчетов рационально использовать интенсивность как первичный параметр, а скорость ТС, время задержки и максимальную длину очереди как вторичные параметры.

Таблица 2
Улучшенный режимы работы светофорного объекта
на перекрестке Белгородский пр. – ул. Н. Чумичова

Table 2
Improved operating modes of a traffic light object
at Belgorodsky pr. – st. N. Chumichova crossroads

Дни недели	Время включения режима работы							
	00.00 – 5.00	5.00 – 8.00	8.00 – 12.00	12.00 – 14.00	14.00 – 16.00	16.00 – 18.00	18.00 – 22.00	22.00 – 00.00
Понедельник	ЛР	ПК1	ПК2	ПК3	ПК4	ПК3	ПК2	ПК1
Вторник	ЛР	ПК1	ПК2	ПК3	ПК4	ПК3	ПК2	ПК1
Среда	ЛР	ПК1	ПК2	ПК3	ПК4	ПК3	ПК2	ПК1
Четверг	ЛР	ПК1	ПК2	ПК3	ПК4	ПК3	ПК2	ПК1
Пятница	ЛР	ПК1	ПК2	ПК3	ПК4	ПК3	ПК2	ПК1
Суббота	ЛР	ПК1	ПК1	ПК1	ПК1	ПК1	ПК1	ПК1
Воскресенье	ЛР	ПК1	ПК1	ПК1	ПК1	ПК1	ПК1	ПК1

Определив первичный параметр, найдем коэффициент доли ковариации, который оценивает остаточную ошибку, по формуле (2):

для Белгородского пр.

$$U_c = \frac{2(1-0.9)*59*82.6}{\frac{1}{4}\sum_1^4(627-563)^2} = 0.95; \tag{2}$$

для ул. Н. Чумичова

$$U_c = \frac{2(1-0.9)*20,5*15,42}{\frac{1}{4}\sum_1^4(233-216)^2} = 0.9.$$

Модель считается адекватной, если $U_c > 0,8$. На данном пересечении по обоим направлениям $U_c > 0,8$, что соответствует условию.

Транспортная модель является адекватной в работе, следовательно, на ней можно проверять эффективность предлагаемых мероприятий по организации и реорганизации дорожного движения.

В случае получения коэффициента меньшего соответствующего адекватному состоянию, необходимо выполнение проверки по вторичным параметрам, таким как скорость, максимальная длина очереди и время задержки, а также по рассматриваемым направлениям, что позволяет выполнить более точную оценку.

ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве мероприятий по реорганизации движения изменим план координации пересечения Белгородский пр. – ул. Н. Чумичова.

Благодаря данному мероприятию уменьшатся задержки транспортных средств, что улучшит ситуацию на перекрестке.

В зависимости от дня недели и времени суток происходит смена режимов работы светофорного объекта (таблица 2).

ЛР (локальный режим) – режим «желтого мигания», который согласно п.6.2. ПДД РФ разрешает движение и информирует о наличии нерегулируемого перекрестка или пешеходного перехода; ПК 1 – программа координации, цикл составляет 78 с; ПК 2 – программа координации, цикл составляет 82 с; ПК 3 – программа координации, цикл составляет 80 с; ПК 4 – программа координации, цикл составляет 84 с [4,5].

На пересечении до начала работ по реорганизации дорожного объекта светофор работал в двух режимах программной координации. После проведения мероприятий на перекрестке работа светофора осуществляется при помощи четырех режимов программ координации. Увеличив количество программ координации, на пересечении уменьшилось число задержек [14,15]. Средняя существующая задержка на Белгородском пр. с 20 с уменьшилась до 16 с, на ул. Н. Чумичова средняя существующая задержка составляла 15 с, после реорганизации – 11 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование транспортных систем является одним из этапов при проведении мероприятий по организации дорожного движения [16,17,18,19,20, 21]. Организация дорожного

движения – мероприятия, связанные с проведением определенных работ на дорогах с целью улучшения транспортной ситуации [22, 23, 24,25].

В результате выполненного исследования был разработан алгоритм проверки адекватности моделирования транспортного процесса, который позволяет проверить соответствие работы моделируемого объекта и существующего объекта УДС на основании комплексного подхода с учетом ряда характеристик транспортного потока (интенсивность, скорость, максимальная длина очереди и время задержки).

Ранее существующие методы оценки адекватности моделирования основывались на рассмотрении интенсивности, но разработанный алгоритм позволяет производить оценку по вторичным параметрам, что ранее не предусматривалось. В результате произведенных расчетов авторским коллективом получены значения корреляционных коэффициентов для рассматриваемых величин в рамках анализируемого объекта исследования, которые при отклонении положительного ответа по первичному параметру (модель не адекватна по интенсивности движения) будут использованы в качестве анализируемых параметров, что позволит комплексно оценить процесс моделирования.

В дальнейшем реализация разработанного алгоритма позволит производить более точную комплексную оценку или же определять ряд первичных или вторичных параметров по результату полученного коэффициента корреляции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Zyryanov V.V., Keridi P.G., Mirotin LB, Golenitsky Yu.V. Modeling of traffic flows as a method of logistic management of transport processes in megalopolises and a method for rational planning of the road network in cities // *Transport Bulletin*. 2008. No. 1. Pp. 37-44.
- Vlasov V.M., Novikov A.N., Novikov I.A., Shevtsova A.G. Definition of perspective scheme of organization of traffic using methods of forecasting and modeling // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 11. Ser. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017 - Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment" 2018. Pp. 042116.
- Шевцова А.Г., Новиков И.А., Боровской А.Е. Современный подход к управлению светофорным объектом // Информационные технологии и инновации на транспорте: материалы 2-й Международной научно-практической конференции. 2016. С. 366-370.
- Novikov A., Novikov I., Katunin A., Shevtsova A. Adaptation capacity of the traffic lights control system (TSCS) as to changing parameters of traffic flows within intellectual transport systems (ITS) // *Transportation Research Procedia* 2017. Pp. 455-462.
- Боровской А.Е., Шевцова А.Г. Методика выбора рационального режима работы светофорного объекта на автомобильном транспорте // *Транспорт: наука, техника, управление*. 2012. № 6. С. 50-53.
- Бурлуцкая А. Г., Семикопенко Ю. В., Шевцова А. Г. Параметры для проверки адекватности моделирования // *Проблемы исследования систем и средств автомобильного транспорта: сборник статей*. Вып.1. Тула: Изд-во ТулГУ. 2017. С. 444.
- Швецов В.И. Математическое моделирование транспортных потоков // *Автоматика и Телемеханика*. 2003. № 11. С. 3-46.
- Gazis D.C., Herman R., Potts R. B. Car-Following Theory of Steady - State Traffic Flow // *Operations Research*. 1959. Vol. 7, № 4. Pp. 499-505.
- Lighthill M.J., Whitham F.R.S. On kinetic waves II. A theory of traffic flow on crowded roads // *Proc. of the Royal Society Ser. A*. 1955. Vol. 229. № 1178. Pp. 317-345.
- Зырянов В.В. Методы оценки адекватности результатов моделирования // *Инженерный вестник Дона*. 2013. № 2. 132 с.
- Буслаев А.П., Новиков А.В., Приходько В.М., Таташев А.Г., Яшина М.В. Вероятностные и имитационные подходы к оптимизации автодорожного движения. Москва, Мир. 2003. 368 с.
- Якимов М.Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов. Москва, Логос. 2013. С. 21-23.
- Боровской А.Е., Воля П.А., Новиков А.Н., Новиков И.А., Шевцова А.Г. Анализ работы и расчет регулируемых перекрестков. Белгород, 2017. 117 с.
- Novikov A., Novikov I., Shevtsova A. Study of the impact of type and condition of the road surface on parameters of signalized intersection //: *Transportation Research Procedia*. 2018. С. 548-555.
- Novikov A., Novikov I., Shevtsova A. Modeling of traffic-light signalization depending on the quality of traffic flow in the city / *Journal of Applied Engineering Science*. 2019. T. 17. № 2. С. 175-181.
- Хорошилова Е.С., Витвицкий Е.Е. Математическое моделирование автотранспортных систем перевозок грузов в городах // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2016. № 2. С. 375-380.
- Vitvitskiy E.E., Fedoseenkova E.S. Descriptive model of functioning in aggregate of auto transportation system dispatch of freight by vehicles in cities // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering, IPDME 2018. *Transportation of Mineral Resources*. 2018. Pp. 072013.
- Зырянов В.В. Моделирование при транспортном обслуживании мега-событий // *Инженерный вестник Дона*. 2011. № 4 (18). С. 548-551.
- Zyryanov V., Keridi P., Guseynov R. Traffic modelling of network level system for large event // 16th ITS World Congress. 16. 2009.

20. Зырянов В.В., Криволапова О.Ю. Моделирование и анализ спроса на объекты совершенствования транспортной сети // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4-1 (22). 117 с.

21. 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 // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2019. 632. Pp. 012052.

22. Зырянов В.В., Кочерга В.Г., Поздняков М.Н. Современные подходы к разработке комплексных схем организации дорожного движения // Транспорт Российской Федерации. 2011. № 1 (32). С. 54-59.

23. Шевцова А.Г., Кущенко Л.Е., Захаров В.М. Обзор различных видов организации дорожного движения на пересечении // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 6-1. С. 39-44.

24. Боровской А.Е., Шевцова А.Г. Адаптационный период при проведении мероприятий по организации дорожного движения // Наука в центральной России. 2013. № 10. С. 11-17.

25. Стельмашук Е.Е., Шевцова А.Г. Особенности разработки и применения КСОДД при решении проблем организации дорожного движения // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2017). 2017. С. 210-212.

REFERENCES

1. Zyryanov V.V., Keridi P.G., Mirotin LB, Golenitsky Yu.V. Modeling of traffic flows as a method of logistic management of transport processes in megapolises and a method for rational planning of the road network in cities // Transport Bulletin. 2008;1: 37-44.

2. Vlasov V.M., Novikov A.N., Novikov I.A., Shevtsova A.G. Definition of perspective scheme of organization of traffic using methods of forecasting and modeling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 11. Ser. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017 – Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment"* 2018. 042116.

3. Shevtsova A.G., Novikov I.A., Borovskaya A.E. Sovremennyj podhod k upravleniju svetofornym obektom [A modern approach to managing a traffic light object]. *In the collection: Information technologies and innovations in transport, materials of the 2nd International Scientific and Practical Conference.* 2016. 366-370. (in Russian)

4. Novikov A., Novikov I., Katunin A., Shevtsova A. Adaptation capacity of the traffic lights control system (TSCS) as to changing parameters of traffic flows with intellectual transport systems (ITS). *Transportation Research Procedia* 2017. 455-462.

5. Borovskaya A.E., Shevtsova A.G. Metodika vyzhira racional'nogo rezhima raboty svetofornogo ob#ekta na avtomobil'nom transporte [Methodology for choosing a rational mode of operation of a traffic light object in road transport]. *Transport: science, technology, management.* 2012; 6: 50-53. (in Russian)

6. Burlutskaya A.G., Semikopenko Yu.V., Shevtsova A.G. Parameters for checking the adequacy of modeling. *Problems of research of systems and means of motor transport: collection of articles.* 2017; 1: 444. (in Russian)

7. Shvetsov V.I. Matematicheskoe modelirovanie transportnyh potokov [Mathematical modeling of traffic flows]. *Automation and Telemekhanics.* 2003; 11: 3-46. (in Russian)

8. Gazis D.C., Herman R., Potts R.B. Car-Following Theory of Steady – State Traffic Flow. *Operations Research.* 1959; 7 (4): 499-505.

9. Lighthill M.J., Whitham F.R.S. On kinetic waves II. A theory of traffic flow on crowded roads. *Proc. of the Royal Society Ser. A.* 1995; 229 (1178): 317-345.

10. Zyryanov V.V. Metody ocenki adekvatnosti rezultatov modelirovaniya [Methods for assessing the adequacy of modeling results]. *Engineering Bulletin of the Don.* 2013; 2: 132. (in Russian)

11. Buslaev A.P., Novikov A.V., Prikhodko V.M., Tatashev A.G., Yashina M.V. Veroyatnostnye i imitacionnye podhody k optimizacii avtodorozhno go dvizhenija [Probabilistic and Simulation Approaches to Optimization of Road Traffic]. Moscow, Mir, 2003. 368 p. (in Russian)

12. Yakimov M.R. Transportnoe planirovanie: sozdanie transportnyh modelej gorodov [Transport planning: creating transport models of cities]. Moscow, Logos, 2013. 21-23. (in Russian)

13. Borovskaya A.E., Volya P.A., Novikov A.N., Novikov I.A., Shevtsova A.G. Analiz raboty i raschet reguliruemyh perekrestkov [Analysis of work and calculation of controlled intersections]. Belgorod, 2017. 117 p. (in Russian)

14. Novikov A., Novikov I., Shevtsova A. Study of the impact of type and condition of the road surface on parameters of signalized intersection. *In the collection: Transportation Research Procedia.* 2018. 548-555.

15. Novikov A., Novikov I., Shevtsova A. Modeling of traffic-light signalization depending on the quality of traffic flow in the city. *Journal of Applied Engineering Science.* 2019; 17 (2): 175-181.

16. Khoroshilova E.S., Vitvitskiy E.E. Matematicheskoe modelirovanie avtotransportnyh sistem perevozok gruzov v gorodah [Mathematical modeling of road transport systems for the transportation of goods in cities]. *Dynamics of systems, mechanisms and machines.* 2016; 2: 375-380. (in Russian)

17. Vitvitskiy E.E., Fedoseenkova E.S. Descriptive model of functioning in aggregate of auto transportation sys-tem dispatch of freight by vehicles in cities. *In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering, IPDME 2018. Transportation of Mineral Resources.* 2018. 072013.

18. Zyryanov V.V. Modelirovanie pri transportnom obsluzhivании mega-sobytij [Modeling in the transport service of mega-events]. *Engineering Bulletin of the Don.* 2011; 4 (18): 548-551. (in Russian)

19. Zyryanov V., Keridi P., Guseynov R. Traffic modeling of network level system for large event. *In the*

collection: 16th ITS World Congress. 16. 2009.

20. Zyryanov V.V., Krivolapova O.Yu. Modelirovanie i analiz sprosna na ob#ekty sovershenstvovaniya transportnoj seti [Modeling and analysis of demand for objects of improving the transport network]. *Engineering Bulletin of the Don*. 2012; 4-1 (22): 117. (in Russian)

21. 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. *IOP Conf. Ser, Mater. Sci. Eng.* 2019; 632: 012052.

22. Zyryanov V.V., Kocherga V.G., Pozdnyakov M.N. Sovremennye podhody k razrabotke kompleksnyh shem organizacii dorozhnogo dvizheniya [Modern approaches to the development of integrated schemes for the organization of road traffic]. *Transport of the Russian Federation*. 2011; 1 (32): 54-59. (in Russian)

23. Shevtsova A.G., Kushchenko L.E., Zakharov V.M. Obzor razlichnyh vidov organizacii dorozhnogo dvizheniya na peresechenii [Review of various types of traffic management at the intersection]. *Bulletin of the Tula State University. Technical science*. 2015; 6-1: 39-44. (in Russian)

24. Borovskaya A.E., Shevtsova A.G. Adaptatsionnyj period pri provedenii meroprijatij po organizacii dorozhnogo dvizheniya [The adaptation period when carrying out activities to organize traffic]. *Science in Central Russia*. 2013; 10S: 11-17. (in Russian)

25. Stelmashuk E.E., Shevtsova A.G. Osobennosti razrabotki i primeneniya KSODD pri reshenii problem organizacii dorozhnogo dvizheniya [Features of the development and application of KSODD in solving problems of traffic management]. *In the collection: Modern automotive materials and technologies (CA-MIT-2017). Collection of articles of the IX International Scientific and Technical Conference. Executive editor*. 2017. 210-212. (in Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Новиков И.А. Постановка цели и задач исследования.

Шевцова А.Г. Выполнение исследований на реальных объектах, разработка нового алгоритма проверки адаптации модели регулируемого перекрестка.

Кравченко А.А. Анализ параметров для создания транспортной модели.

Бурлуцкая А.Г. Анализ результатов полученных данных в ходе выполнения натурных исследований.

AUTHORS CONTRIBUTION

Ivan A. Novikov Goal and objectives of the study statement.

Anastasia G. Shevtsova Research on real objects, development of a new algorithm for checking the adaptation of the controlled intersection model.

Andrei A. Kravchenko Parameters to create a transport model analysis.

Alina G. Burlutskaia Results of the obtained data in the course of carrying out field studies analysis.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Новиков Иван Алексеевич – д-р. техн. наук, доц., директор транспортно-технологического института, заведующий кафедрой «Эксплуатация и организация движения автотранспорта» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, ORCID ID 0000-0001-5322-9640 (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, БГТУ им. В. Г. Шухова), e-mail: ooows@mail.ru.

Шевцова Анастасия Геннадьевна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Эксплуатация и организация движения автотранспорта» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, ORCID 0000-0001-8973-9271 (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, БГТУ им. В. Г. Шухова), e-mail: shevcova-anastasiya@mail.ru.

Кравченко Андрей Алексеевич – заместитель начальника УГИБДД УМВД России по Белгородской области, подполковник полиции, аспирант кафедры «Эксплуатация и организация движения автотранспорта» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, ORCID 0000-0002-0398-8734 (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, БГТУ им. В. Г. Шухова), e-mail: 31.gibdd.dn@mail.ru.

Бурлуцкая Алина Геннадьевна – аспирант кафедры «Механическое оборудование и технологии машиностроения» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, ORCID ID 0000-0002-9892-7183 (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, БГТУ им. В. Г. Шухова), e-mail: alinabur1995@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivan A. Novikov (Belgorod, Russia) – Dr. of Sci., Associate Professor, Director of the Transport and Technological Institute, Head of the Operation and Organization of Vehicle Traffic Department, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University, ORCID ID 0000-0001-5322-9640 (308012, Belgorod, Kostiuikova St., 46, V.G. Shukhov BSTU), e-mail: ooows@mail.ru.

Anastasia G. Shevtsova – Cand. of Sci., Associate Professor of the Traffic Operation and Organization Department, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University (308012, Belgorod, 46, Kostiuikova St., e-mail: shevcova-anastasiya@mail.ru).

Andrei A. Kravchenko – Deputy Head of the State Traffic Safety Inspectorate of the Russian MIA Administration for the Belgorod Region, Police Lieutenant Colonel, Postgraduate Student of the Operation and Organization of Motor Transport Traffic Department, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University, ORCID 0000-0002-0398-8734 (308012, Belgorod, Kostiuikova st., 46, V.G. Shukhov BSTU), e-mail: 31.gibdd.dn@mail.ru.

Alina G. Burlutskaia – Postgraduate of the Mechanical Equipment and Engineering Technology Department, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University (308012, Belgorod, 46, Kostiuikova St., e-mail: alinabur1995@mail.ru).

УДК 621.757

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-736-752>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХРОМИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

А.Н. Котомчин, Ю.В. Штефан, В.А. Зорин

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследования высокопроизводимых хромовых покрытий для восстановления деталей автомобилей требуют много затрат времени и энергии. Для сокращения количества проводимых опытов необходимо провести математическое моделирование эксперимента для сокращения количества проводимых опытов и сведения к определённому алгоритму для получения достоверных и точных данных, которые позволят получить хорошие результаты в исследованиях при получении хромовых покрытий с максимальной производительностью – высоким выходом по току.

Материалы и методы. Для проведения исследований использовалось необходимое оборудование для получения гальванических покрытий, разработан новый состав электролита для получения качественных высокопроизводительных хромовых осадков, а также программа Statistica 13.0, которая позволила сократить время на проведение расчётов и построение необходимых графиков и уравнений регрессии.

Результаты. Проведённый анализ методов и способов математического анализа полученных результатов с целью их обработки и построения модели показал, что с доверительным коэффициентом регрессии 0,95 наиболее предпочтительнее проводить исследования влияния состава электролита хромирования на выход по току в промежутке значений плотности тока от 125...250 А/дм², количества плавиковой кислоты 0,6...1,2 г/л и рабочей температуры электролита 16...27 °С.

Обсуждение и заключение. В результате полученной математической модели можно утверждать, что исследования влияния состава электролита на плотность тока позволят получить достоверные данные с наименьшим количеством проводимых опытов. При этом возможно получить ещё больший выход по току, если провести дополнительно исследования с изменением факторов в большую или меньшую сторону. Однако неизвестно, как будет меняться качество покрытия и сцепляемость с основой детали, которые являются важным фактором получения износостойких гальванических покрытий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гальванические покрытия, хромирование, математическая модель, планирование, адекватность, регрессия, доверительный интервал.

БЛАГОДАРНОСТИ. БЛАГОДАРНОСТЬ рецензентам статьи.

Поступила 23.11.20, принята к публикации 25.12.2020.

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: А.Н. Котомчин, Ю.В. Штефан, В.А. Зорин. Моделирование ограничений при оптимизации эффективности хромирования деталей машин. *Вестник СибАДИ*. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-736-752>

© Котомчин А.Н., Штефан Ю.В., Зорин В.А.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-736-752>

SIMULATION OF CURRENT OUTPUT DURING CHROME PLATING OF PARTS FOR HARDENING AND CAR PARTS RESTORATION

Aleksei N. Kotomchin, Yurii V. Shtefan, Vladimir A. Zorin
Moscow State Automobile and Highway Technical University (MADI),
Moscow, Russia

ABSTRACT

Introduction. Conducting an experiment when conducting research on electroplating coatings requires a lot of time and energy. To reduce the number of experiments performed, it is necessary to conduct mathematical modeling of the experiment to reduce the number of experiments performed and reduce it to a specific algorithm to obtain reliable and accurate data. The obtained reliable data will allow to get good results in studies of obtaining chrome coatings, with maximum performance, including current output.

Materials and methods. To conduct the research, the necessary equipment for obtaining electroplating coatings, developed a new electrolyte composition for obtaining high-quality high-performance chrome precipitation, as well as the Statistica 13.0 program, which allowed us to reduce the time for calculations and building the necessary graphs, was used.

Results. The analysis of methods and methods of mathematical analysis of the results obtained in order to process them and build a model showed that with a confidence regression coefficient of 0.95, it is most preferable to study the effect of the composition of the chromating electrolyte on the current output, in the range of current density values from 125 ... 250 A / dm², the amount of hydrofluoric acid 0.6...1.2 g / l and the operating temperature of the electrolyte 16 ... 27 °C.

Discussion and conclusion. As a result of the obtained mathematical model, it can be argued that studies of the influence of the electrolyte composition on the current density will allow to obtain reliable data with the least number of experiments. At the same time, it can also be argued that it is possible to obtain an even greater current output if additional research is carried out with a change in factors up or down. However, it is not known how the quality of the coating and the adhesion to the base of the part will change, which is an important factor in obtaining wear-resistant electroplating.

KEYWORDS: Electroplating, chrome plating, mathematical model, planning, adequacy, regression, confidence interval.

GRATITUDES. Thanks to the reviewers of the article.

Submitted 23.11.20, revised 25.12.2020.

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: Aleksei N. Kotomchin, Yurii V. Shtefan, Vladimir A. Zorin. Simulation of current output during chrome plating of parts for hardening and car parts restoration. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-736-752>

© Kotomchin A.N., Shtefan Y.V., Zorin V.A.



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

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации автомобилей и другой техники наступает момент, когда происходит потеря работоспособности автомобиля. Основной причиной потери работоспособности является отказ основных узлов и деталей, при котором происходит выход из строя детали, что приводит к отказу узла или агрегата в целом. Предприятию приходится тратить большие средства на поддержание в исправном состоянии техники во время её эксплуатации. Стоимость запасных частей автомобилей, особенно ресурсопределяющих, с каждым годом растёт, но качество из-за большого количества выпущенных деталей «по лицензии» снижается, из-за чего возрастает стоимость эксплуатации техники [1].

Одним из способов сокращения затрат предприятий на новые запасные части – восстановление их. При этом восстановленная деталь автомобиля может служить не меньше срока, который до этого проработала, а иногда и больше. Это условие использовано при восстановлении оригинальных деталей с предельным износом, не имеющим запас прочности для дальнейшей эксплуатации.

При проведении исследований применимости различных способов восстановления было выявлено, что большинство современных деталей имеют предельный износ, при котором происходит потеря работоспособности, в пределах 0,1...0,5 мм. Поэтому использование гальванических покрытий, в частности хромирования, при восстановлении деталей автомобилей оставляет их весьма перспективными и в настоящее время¹ [1].

Однако при анализе способов и составов электролитов хромирования были выявлены следующие преимущества хромирования [2, 3,4,5]:

1. Высокая износостойкость и твёрдость.
2. Высокая кроющая способность.
3. Отсутствие термического влияния на поверхность детали при осаждении.
4. Хорошее сцепление с основой детали и т.д.

В работах [4, 5, 6] проведён анализ известных высокопроизводительных электролитов, который показал большое разнообразие способов осаждения и составов электролитов хромирования. Однако многие составы элек-

тролитов в связи с технологической сложностью промышленного внедрения не нашли практического использования при восстановлении деталей автомобилей.

При обзоре существующих высокопроизводительных электролитов объектом исследования был выбран холодный саморегулирующийся электролит хромирования [6]. При осаждении данным составом хрома получались износостойкие осадки с выходом по току до 40%, с микротвёрдостью до 10500 МПа. Однако недостатком данного электролита был диапазон рабочих температур электролита, который составлял 18...23 °С. При повышении температуры выход по току резко падал, образовались дендриты на поверхности, увеличивалось количество сквозных трещин, что снижало коррозионную стойкость поверхности. Поэтому для поддержания рабочей температуры требовалось использовать мощные холодильные установки, что усложняло конструкцию ванны хромирования и увеличивало энергозатраты на работу холодильных установок [6].

Для снижения влияния температуры на выход по току и качество покрытий нами были проведены исследования, которые показали, что добавление неорганической добавки сульфата никеля и плавиковой кислоты увеличило диапазон рабочих температур электролита с 23 до 35 °С, при этом увеличился выход по току и скорость осаждения. Также качество покрытий не ухудшилось, а местами даже улучшилось – повышение микротвёрдости (до 12000 МПа) и отсутствие сквозных трещин, что улучшало коррозионную стойкость покрытия [6].

ТЕОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведённых исследований было установлено, что выход по току при получении качественных хромовых покрытий играет важную роль при выборе способа восстановления деталей автомобилей. Известно, что выход по току в основном зависит от режимов электролиза, состава электролита и условий нанесения покрытий, поэтому особый интерес представляют почти все параметры и условия электролиза, которые оказывают влияние на структурообразование при электроосаждении хрома [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14].

В результате анализа проведённых иссле-

¹ Штефан Ю.В., Зорин В.А. Методы выявления и оценки рисков в дорожном строительстве и машиностроении : монография. Москва, МАДИ, 2017. 136 с. URL: <http://lib.madi.ru/fel/fel1/fel17M587.pdf>.

дований получили, что выход по току хрома в основном зависит от следующих составляющих:

- катодной плотности тока (D_k) в пределах 50÷200 А/дм²;
- концентрации катализирующего компонента в электролите (в нашем случае плавиковой кислоты (K_{HF})) в пределах 0÷1,0 г/л;
- рабочей температуры электролита в пределах 18÷35 °С.

В общем виде зависимость выхода по току хрома от параметров электролиза имеет вид

$$\eta=f(D_k; K_{HF}; t_{эл}; t). \quad (1)$$

Задача сводится к тому, чтобы выделить доминирующие факторы при помощи различных методов на «шумовом фоне» остальных факторов. При исследовании многомерных функций от нескольких переменных (m) можно разложить на систему функций от одной или двух переменных, для чего следует зафиксировать все значения переменных (кроме искомого) и результаты усреднить. Именно так поступают при построении поверхностей откликов при визуализации результатов планирования эксперимента после его статистической обработки².

Если искомая многомерная функция представляет собой сумму функций для каждой из переменных, решение может быть найдено, когда будет встречаться один раз комбинация любого значения переменной с любым значением другой переменной. Обычные многофакторные математические модели оказываются неприемлемыми, так как число экспериментов и затраты вычислительного времени на обработку данных становятся большими. Особенно усложняется задача при исследовании влияния парных воздействий, а также при случайном поиске важных факторов возникают такие же трудности. Поэтому нами в работе использовались проверенные и надежные методы, которые при выполнении ряда предпосылок позволяют выявлять существенные факторы с помощью небольшого числа экспериментов с относительно небольшими затратами по времени. К ним относятся³:

1. Дисперсионный анализ. В его основе лежит предположение о том, что существенность некоторого (дискретного) фактора характеризуется его вкладом в дисперсию выходной величины. Он позволяет отсеивать незначимые факторы модели.

2. Насыщенные дробные факторные планы. Основываются на предположении о наличии лишь линейных эффектов и приводят к оценке существенности факторов по их вкладу в математическое ожидание выходной величины. Эти планы как наиболее простые мы использовали для предварительного анализа при выборе наиболее значимых факторов.

3. Насыщенные экспериментальные планы Плакетта-Бермана. Для них предполагается наличие только линейных эффектов⁴.

4. Метод случайного баланса. Применяется в предположении, что среди рассматриваемых факторов не все являются существенными. Благодаря этому можно применять сверхнасыщенное планирование, в котором число факторов больше числа экспериментов.

Для приводимых методов значение имеют понятия числа степеней свободы и степени насыщенности планов эксперимента. Под числом степеней свободы φ понимают разность числа экспериментов N и числа искомого параметра k модели

$$\varphi=N-k. \quad (2)$$

При этом если:

а) $\varphi > 0$, $N > k$, т. е. число проведенных экспериментов превышает число оцениваемых параметров, то планы называют ненасыщенными. В этом случае возможна проверка адекватности модели;

б) $\varphi = 0$, $N = k$, т.е. число экспериментов равно числу искомого параметров, такие планы называют насыщенными. Для проверки адекватности здесь уже не остается степеней свободы;

в) $\varphi < 0$, $N < k$, т. е. число оцениваемых параметров превышает число экспериментов, планы называют сверхнасыщенными.

При планировании эксперимента исследований высокопроизводительных саморегулируемых электролитов хромирования было

² Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2-е изд. Москва, Наука, 1976. 280 с.

³ Волков П.Н. Планирование эксперимента. Москва, МАДИ, 1972г.

⁴ Крупин, А. Е. Анализ способов выделения существенных факторов при планировании эксперимента // Современный взгляд на будущее науки. Уфа, РИО МЦИИ Омега Сайнс. 2014. С. 15-16.

использовано ненасыщенное планирование вида 3^p , где по формуле (2) $p=3$ с проверкой адекватности.

После предварительного изучения объекта исследования и выделения существенных факторов переходят к поиску и изучению области оптимума, т. е. такого сочетания выделенных факторов, влияющих на выходной параметр, при которых параметр достигает своего оптимального значения (максимум или минимум)⁵.

Для решения задачи нахождения оптимума выбранной целевой величины в соответствии с конкретными условиями и требованиями применимы два принципиально различных подхода:

1. Определение оптимальных условий с помощью математической модели объекта. Здесь предполагается, что имеется статистическая (экспериментальная) модель, т.е. полученное с помощью планирования эксперимента математическое описание его результатов.

2. Нахождение оптимальных условий без использования модели (вслепую) методом последовательного приближения к оптимуму.

Вторая модель менее надежна, ибо не позволяет вмешиваться в процесс эксперимента до тех пор, пока все эксперименты не будут завершены и статистически обработаны. Но и первая модель без «прикидочных» опытов не может с первого раза выбрать нужные интервальные границы факторов.

Статистическая обработка результатов опытов, как правило, сводится к проверке среднеквадратичной ошибки опыта для отсеивания выбросов, доверительных интервалов и ошибки эксперимента. Грубые ошибки при повторных экспериментах определяются с использованием критерия Стьюдента по формуле [15]:

$$\frac{y_{i+1} - \bar{y}}{S} \geq t_T, \quad (3)$$

где y_{i+1} – значение сомнительного результата измерений; \bar{y} – среднее арифметическое значение измерения, вычисленное без учета сомнительного результата; S – средняя ква-

дратичная ошибка, вычисленная без учета сомнительного результата; t_T – табличное значение критерия Стьюдента для доверительного уровня вероятности при определенном количестве экспериментов.

Если вычисленное значение критерия Стьюдента оказывается больше табличного, сомнительный результат подвергается дополнительной экспериментальной проверке или не принимается во внимание [15].

Другим способом проверки наличия выбросов в результатах экспериментов и проверки воспроизводимости опытов является сравнение дисперсий и проверка их по критерию Фишера через отношение большей дисперсии воспроизводимости к меньшей⁶:

$$F_{\text{расч}} = \frac{(D_R)/\nu_2}{D_E/\nu_1}, \quad (4)$$

где $D_R = \sum_{i=1}^N (\dots - \bar{y})^2$ – дисперсия большей по модулю выборки; $D_E = \sum_{i=1}^{N_0} (\dots - \bar{y})^2$ – дисперсия меньшей по модулю выборки; ν_1 и ν_2 – число степеней свободы⁷.

Если полученное значение $F_{\text{расч}}$ с учетом степеней свободы числителя и знаменателя превышает пороговое значение 0,05, то делается вывод о том, что выборочные дисперсии принадлежат одной генеральной совокупности и могут быть приравнены.

Рассчитанное таким образом значение F -критерия сравнивают также с табличным значением или можно использовать функцию, встроенную в MS Excel, имеющую синтаксис ДИСП.В(массив Y1), ДИСП.В (массив Y2), ДИСП.В (массив Y3). Найти табличное значение критерия Фишера можно также через функцию, имеющую синтаксис ФРАСПОБР ($p; \nu_1; \nu_2$). Чтобы проверить условие равенства дисперсий воспроизводимости повторных опытов в каждой точке плана можно также воспользоваться встроенной функцией, имеющей синтаксис ФРАСП (Fрасч; N-m-1; N-m-1)

Количество повторных экспериментов в каждой точке плана от 3 до 5.

⁵ J.A., Cornell. 1990. www.StatSoft.ru. How to Apply Response Surface Methodology, in Basic References in Quality Control: Statistical Techniques. 1990. Vol. 8 (дата обращения: 09.11.2020).

⁶ Как найти табличное значение критерия Фишера. Функция Фишер в Excel и примеры ее работы. 1990. URL: <https://maintorrent.ru/kak-naiti-tablichnoe-znachenie-kriteriya-fishera-funkciya-fisher-v-excel/> (дата обращения: 09.11.2020).

⁷ Соловьев Д.С., Литовка Ю. В. Математическое моделирование гальванической ванны с циклическим включением анодных секций // Проблемы управления и автоматизации технологических процессов и производств: сб. трудов Всероссийской научно-технической конференции. 2010. С. 142-143.



Рисунок 1 – Установка для исследований гальванических покрытий хрома [16]:
 1 – пульт управления установкой по контролю и поддержанию температуры электролита,
 2 – холодильник, 3 – бак с ванночкой для хромирования, 4 – ванночка для травления,
 5 – вытяжной шкаф

Figure 1 – Installation for research of chrome electroplating coatings [16]:
 1 – control panel of the installation for monitoring and maintaining the temperature of the electrolyte,
 2 – refrigerator, 3 – tank with a bath for chrome plating, 4 – etching bath, 5 – fume hood

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБОРУДОВАНИЕ

Лабораторные исследования с целью изыскания наиболее эффективных условий электролиза (с точки зрения скорости наращивания слоя хрома и качества покрытий) производились в стационарной ванне. Экспериментальная установка была изготовлена для работ, проводимых в НИЛ «Реновация машин и оборудования» БПФ ГОУ «ПГУ им. Т.Г. Шевченко» (Приднестровье) и оборудована необходимыми устройствами, приспособлениями и приборами [16]. Внешний вид щита управления и электролизера представлен на рисунках 1 и 2.

Комплект рабочего оборудования составлял:

1. Ванны хромирования емкостью 3 и 8 л.
2. Источники питания.
3. Холодильная установка для автоматического регулирования температуры электролита.
5. Пусковая, регулировочная и контрольно-измерительная аппаратура.

6. Ванна для электрохимического травления поверхностей образцов (деталей) перед хромированием.

Ванны – стеклянные химико- и теплостойкие и винипластовые. Внутри каждой из них вмонтирован змеевик-теплообменник, изготовленный из цельнотянутой стальной трубки; датчик электроконтактного термометра; контрольный ртутный термометр и нагревательный элемент. Снаружи ванн, на кронштейнах, укреплялись токопроводящие элементы (штанги). К каждой из 6 групп образцов соответственно были изготовлены специальные подвесные приспособления и свинцовые аноды (свинец с содержанием 6% сурьмы и 5% олова). Отношение площади катода к аноду было принято 1:2, а межэлектродные расстояния – 90...100 мм.

Для определения оптимального состава электролита в качестве базового был выбран холодный саморегулирующийся электролит хромирования с неорганическими добавками сульфата никеля и плавиковой кислоты.

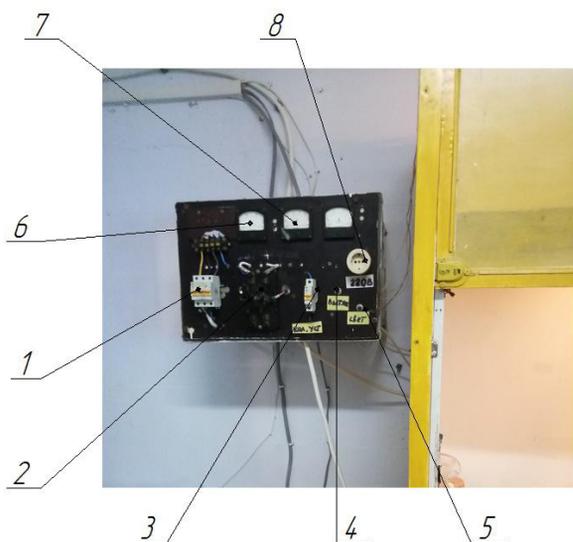


Рисунок 2 – Пульт управления установкой для хромирования:

1 – трёхфазный автомат, 2 – ключ управления электролизом, 3 – однофазный автомат установки по контролю и поддержанию температуры, 4 – тумблер включения вытяжки в шкафу, 5 – тумблер включения освещения в шкафу, 6 – вольтметр, 7 – амперметр, 8 – розетка на 220 В

Figure 2 – Remote control for chrome plating: 1 – three-phase machine, 2 – a key control electrolysis, 3 – phase machine installations to control and maintain the temperature, 4 – switch hoods in the closet, 5 – switch lighting in the closet, 6 – voltmeter, 7 – amperemeter, 8 – socket 220 V

Электролиты готовили путем растворения химических реактивов квалификации ХЧ (химически чистые) в дистиллированной воде по ГОСТ 6709–72.

Для проведения исследований концентрацию составляющих электролита изменяли, в г/л: CrO_3 – 250...450 г/л, через 50 г/л; CaCO_3 – 0...80 г/л, через 5 г/л; сульфат никеля семи водного ($\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) – 5...10 и $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 5...10 через каждые 2,5 г/л, а плавиковой кислоты (HF) – 0...2 через каждые 0,05 г/л [16].

Хромовые покрытия наносили на цилиндрические образцы из стали 45 диаметром 12 мм, с общей площадью покрываемой поверхности 0,075 дм² в стационарной ванне объёмом 3 л. Питание электролизёра осуществлялось от источника постоянного тока с двухполупериодной схемой выпрямления. Перед нанесением электролитических покрытий образцы подвергали обезжириванию в венской извести и анодному травлению в 30% водном растворе серной кислоты с добавкой соли сульфата железа в количестве 15 г/л при температуре электролита травления $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Все образцы после обезжиривания и травления тщательно

промывались в дистиллированной воде и просушивались [16,17,18].

При проведении исследований катодную плотность тока (D_k) изменяли от 50 до 200 А/дм² и температуру электролита ($T_{\text{эл.}}$) от 18 до 35°C , через каждые 2,5...5 $^\circ\text{C}$, с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Изменения и контроль температуры электролита осуществлялись с помощью разработанной установки для поддержания рабочей температуры электролита. Плотность тока рассчитывали как силу тока, приходящуюся на единицу площади электрода, А/дм²:

$$D_k = I/S, \quad (5)$$

где I – сила тока, А; S – площадь поверхности электрода, дм².

Хромовые покрытия наносились на образцы нескольких групп, которые изготавливались для определения количественного значения выхода хрома по току и скорости осаждения металла.

Для определения выхода металлического хрома по току использовали гравиметрический метод, с точностью до 10^{-5} г, с использованием аналитических весов АДВ-200М. Кроме того, выход по току определялся по толщине покрываемого слоя хрома, измеряемой с помощью микрометра МК-0-25 ГОСТ 6507–90 [19].

Выход тока гравиметрическим методом вычисляли по формуле, %:

$$\eta = \frac{m_{\phi}}{m_T} \cdot 100, \quad (6)$$

где m_{ϕ} – фактическое количество осаждённого хрома, г.

$$m_{\phi} = G_2 - G_1, \quad (7)$$

где G_1 – первоначальная масса образца перед покрытием хромом, г; G_2 – масса образца после покрытия хромом, г;

m_T – теоретически возможное количество выделенного на катоде хрома, г.

$$m_T = c \cdot I \cdot T \quad (8)$$

где c – электрохимический эквивалент хрома (0,324 г/А·ч); I – сила тока, А; T – время электролиза, ч.

После приготовления электролита для хромирования делалась необходимая обязательная его проработка с целью выделения в растворе трёхвалентного хрома в количестве от 2...10 г/л, чтобы производительность вышла на заданную величину.

Режим электролиза следующий: травление – $D_A=130...140$ А/дм², в течение 1,5–2 мин, электролит состоящий из 30% серной кислоты и 15 г/л сульфата железа. Декапирование в электролите хромирования – $D_A=50...200$ А/дм², в течение 30–60 с. Хромирование производилось в диапазоне плотностей тока – $D_k=50...200$ А/дм², с температурным режимом электролиза – $t_{эл}=18...35$ °С. Анодное травление в электролите хромирования после завершения электролиза – $D_A=50...200$ А/дм², в течение 1,5–2 мин – для снятия межэлектродных напряжений в хромовом покрытии [20, 21, 22].

После проведения осаждения хрома образцы тщательно промывались в тёплой и холодной дистиллированной воде, потом просушивались на воздухе в течение 1 часа и далее помещались в муфельную печь и просушивались при температуре 200 ± 15 °С, с целью вывода водорода из хромированной поверхности и улучшения физико-механических свойств покрытия. Процесс проводили в течение 1–1,2 ч [23, 24].

После сушки образцы взвешивались на весах 1-го класса точности АДВ-200 и определялся выход хрома по току. Микрометром МК 0-25 по ГОСТ 6507–90 измерялась толщина покрытия как косвенного показателя выхода по току.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проводилось планирование модели экстремального полнофакторного эксперимента для определения оптимальных условий электролиза при получении высокого выхода по току. Для квадратичной модели функции отклика можно искомое уравнение записать с коэффициентами регрессии $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i < j}^n \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_{ii}^2. \quad (9)$$

Проверка значимости коэффициентов проводится о t-критерию Стьюдента $t = |\beta_i| / S_{\beta_i}$, где $|\beta_i|$ – абсолютное значение i-го параметра коэффициента регрессии; S_{β_i} – квадратичная ошибка коэффициента регрессии; t – табличное значение критерия Стьюдента по формуле в Excel, имеющей синтаксис СТЬЮДРАС-ПОБР(α ;f) при уровне значимости $\alpha=0,05$ и числе степеней свободы

$$f = (n-1)N, \quad (10)$$

где N – число точек плана в матрице планирования; n – число параллельных экспериментов.

Поскольку известно, что уровень значимости численно равен сумме отсеченных хвостов кривой нормального распределения, то модель будет более точной, если величина отбрасываемых значений α минимальна⁸. Оценку адекватности модели проводили, используя критерий Фишера: (F-критерий). Модель считается адекватной, если выполнялось условие

$$F_p < F_{кр}, \quad (11)$$

где $F_{кр}$ – критическое значение; F-критерия для степеней свободы $f_{ад} = N - m$ и $f_e = N(n - 1)$ и уровне значимости $\alpha=0,05$. Критическое значение находили при помощи функции, имеющей синтаксис =FРАСПОБР (α ;p;n-p-1), где α – вероятность, связанная с данным распределением; p и n – числитель и знаменатель степеней свободы соответственно.

Расчетное значение F-критерия определяли по формуле

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S^2\{y\}}. \quad (12)$$

Дисперсия адекватности определяется из выражения

$$S_{ад} = \frac{n}{N-m} \sum_{j=1}^n (\bar{y}_j - \bar{y})^2, \quad (13)$$

где N – число точек плана в матрице планирования; n – число параллельных экспериментов; m – число членов аппроксимирующего полинома; \bar{y}_j – среднее значение параметра оптимизации в точке плана; \bar{y}_j – значение параметра оптимизации, вычисленное по аппроксимирующему полиному.

Дисперсия воспроизводимости определяется из выражения

$$S_{(y)}^2 = \frac{1}{N(n-1)} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n (y_{ji} - \bar{y}_j)^2, \quad (14)$$

где y_{ji} – значение i-го параметра оптимизации в j-й точке плана; \bar{y}_j – среднее значение параметра оптимизации в j-й точке плана; N – число точек плана в матрице планирования; n – число параллельных экспериментов.

На основании вышеизложенного для сокращения проведения объема экспериментальных исследований было использовано математическое планирование эксперимента.

⁸Крупин, А. Е. Анализ способов выделения существенных факторов при планировании эксперимента // Современный взгляд на будущее науки. 2014. С. 15-16.

За параметр оптимизации был принят выход по току. Для обеспечения высокой производительности электролитического процесса осаждения хрома, повышения коррозионной стойкости и износостойкости покрытия нами было предпринято комбинирование неорганическими добавками $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ в количестве от 5 до 10 г/л каждого компонента и добавление плавиковой кислоты (HF) в количестве 0...1,0 г/л. В связи с тем что влияние этих факторов носит нелинейный характер, было применено планирование экстремального полнофакторного эксперимента модели, матрица которого приведена в таблице 1. Как видно из правой части таблицы, случайные выбросы, не удовлетворяющие критерию по формуле (3), были все устранены.

Проведенные предварительные экспериментальные исследования позволили установить влияние плотности тока, концентрацию плавиковой кислоты, сульфата кобальта и никеля в растворе, рабочей температуры электролита на выход по току и выбрать наиболее влияющие факторы, а прочие отсеять как «шумы». Среди перечисленных факторов, наиболее влиявших на выход по току, выбрали три и установили их уровни варьирования (-1, 0,1) для матрицы планирования эксперимента (таблица 1).

Опыты проводились с 3-кратной повторностью в случайном порядке, что позволило снизить влияние систематических погрешностей.

В результате статистического анализа полученной математической модели было установлено следующее:

1. Среди незначимых коэффициентов модели оказались по критерию Стьюдента все парные взаимодействия, кроме $x_1 * x_2$, поскольку его значение коэффициента по модулю $\beta_{1,2} = 0,66 > t_{\text{табл}}(0,05;27(3-2)) \cdot s_{\text{bij}} = 0,244$.

Оставшиеся коэффициенты признаны малозначимыми, но оставлены в модели для повышения ее адекватности и точности расчетных значений отклика. Также малозначимым (на самой нижней границе) признан коэффициент $\beta_3^2 = 0,444 < t_{\text{табл}} s_{\text{bij}} = 0,489$.

2. Проверка условия (10) для полученной модели выполнена, поскольку условие соблюдается. Расчетное значение F-критерия $F_p = \frac{S_{\text{ад}}}{S^2\{y\}} = \frac{9,322}{4,385} = 2,126$, что меньше табличного значения критерия Фишера $F_{\text{РАСПО-БР}}(0,05;27;16) = 2,213$. Полученная при этом дисперсия адекватности по формуле (13) $S_{\text{ад}} = 9,322$, а дисперсия воспроизводимости по формуле (14) $S_y = 4,385$.

Поскольку полученная модель признана адекватной проведенным экспериментам по результатам статистического анализа, о чем

также свидетельствует полученный результат множественной регрессии в одноименном модуле ПМ Statistica 13.0 с полученным коэффициентом детерминации $R^2 = 0,806$ и нормально распределенным предсказанным остаткам, дальнейший анализ модели проводили в модуле «Планирование эксперимента» ПМ Statistica 13.0.

Было установлено, что все 27 точек плана в целом по модели всего факторного пространства распределены симметрично относительно нуля и закон их распределения близок к нормальному, следовательно, влияние систематических ошибок на результат сведено к минимуму. Уровень корреляции до $r = 0,91$ также свидетельствует о достаточно высокой способности математической модели предсказывать получаемые значения выхода по току без проведения дополнительных экспериментов в других точках внутри исследованного факторного пространства. И хотя, как известно из свойств нормального распределения, лучше всего модель предсказывает значения в середине факторного пространства, нас больше интересовала правая часть кривой нормального распределения, позволившая нам повысить выход по току путем поиска оптимальных сочетаний факторов. Это позволит в дальнейшем при проведении экспериментов идти по кратчайшему пути к экстремально высоким выходам по току методом крутого восхождения [25, 26, 27]. Так результаты анализа профиля желательности показали, что экстремальные или критические значения независимых факторов лежат за пределами проанализированного факторного пространства как по плотности тока $x_1^{\text{крит}} = 1,25$, так и по рабочей температуре электролита $x_3^{\text{крит}} = -1,86$. Второй фактор $x_2^{\text{крит}} = 0,84$ смещается в большую сторону, но остается внутри факторного пространства. Такому экстремальному сочетанию факторов модель предсказывает крайне высокий выход по току – до 52...55%. По видимому это объясняется тем, что процесс подчиняется закону Фарадея: чем больше затрачивается энергии, тем больше происходит осаждение металла на катоде, а также имеется влияние неорганической добавки на растворимость и активность неорганической добавки плавиковой кислоты при низких температурах в электролите хромирования.

Однако, как видно на рисунке 3, за границами факторного пространства желательность максимизировать выход по току стремительно падает, что свидетельствует о правильном исходном выборе границ регулирования факторного пространства.

Таблица 1
Исходные данные для планирования

Table 1
Initial data for planning

№ опыта	Уровни варьирования факторов						Значения отклика: выход по току, %		
	Кодированные			Натуральные			Среднее из трех повторных измерений		
	X ₁	X ₂	X ₃				Y1	Y2	Y3
1	-1	-1	-1	50	0	18	34	37	37
2	-1	-1	0	50	0	27	32	34	36
3	-1	-1	1	50	0	35	30	32	28
4	-1	0	-1	50	0,5	18	40	36	38
5	-1	0	0	50	0,5	27	43	43	40
6	-1	0	1	50	0,5	35	38	41	41
7	-1	1	-1	50	1,0	18	43	43	46
8	-1	1	0	50	1,0	27	45	46	41
9	-1	1	1	50	1,0	35	39	36	39
10	0	-1	-1	125	0	18	37	39	38
11	0	-1	0	125	0	27	39	34	35
12	0	-1	1	125	0	35	32	35	35
13	0	0	-1	125	0,5	18	46	45	47
14	0	0	0	125	0,5	27	43	45	44
15	0	0	1	125	0,5	35	41	38	41
16	0	1	-1	125	1,0	18	50	49	45
17	0	1	0	125	1,0	27	45	50	49
18	0	1	1	125	1,0	35	45	47	40
19	1	-1	-1	200	0	18	41	41	38
20	1	-1	0	200	0	27	37	34	37
21	1	-1	1	200	0	35	34	35	33
22	1	0	-1	200	0,5	18	47	50	47
23	1	0	0	200	0,5	27	46	47	45
24	1	0	1	200	0,5	35	45	40	47
25	1	1	-1	200	1,0	18	51	48	51
26	1	1	0	200	1,0	27	44	48	43
27	1	1	1	200	1,0	35	43	40	43

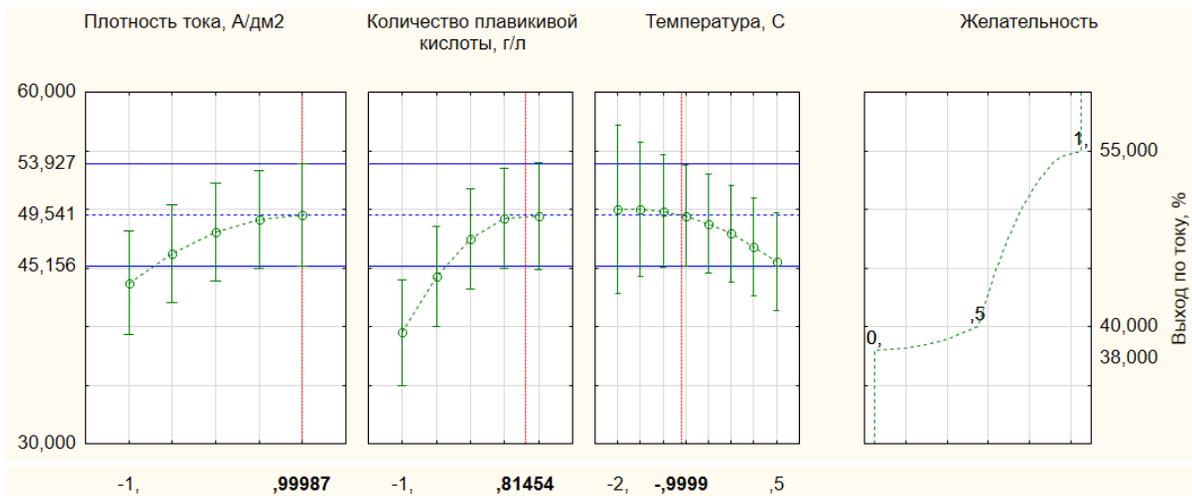


Рисунок 3 – Разбросы предсказываемых значений максимального выхода по току на границе исследованного факторного пространства

Figure 3 – Spread of predicted values of the maximum current output at the boundary of the studied factor space

Полученные математические зависимости удобно анализировать по графическому ма-

териалу, полученному с помощью программы Statistika 13.0 и представленному на рисунке 4.

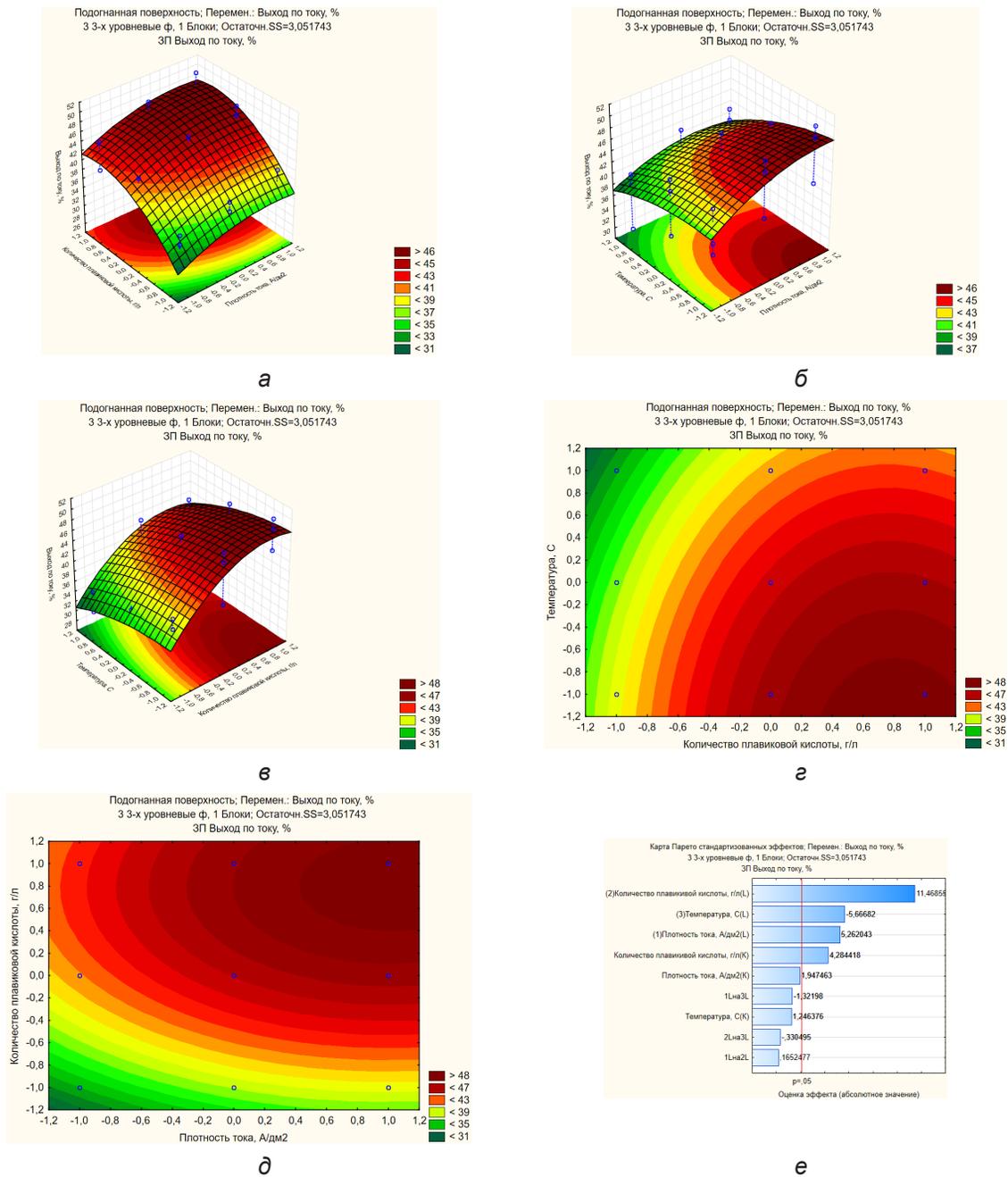


Рисунок 4 – Результаты математических зависимостей:
 а – влияние количества плавиковой кислоты x_2 и плотности тока x_1 на отклик выход по току Y при фиксированном уровне температуры $x_3=0$; б – влияние температуры x_3 и плотности тока x_1 на отклик выход по току Y при фиксированном количестве плавиковой кислоты $x_2=0$;
 в – влияние температуры x_3 и количества плавиковой кислоты x_2 на отклик выход по току Y при фиксированной плотности тока $x_1=0$; г – влияние температуры x_3 и количества плавиковой кислоты x_2 на отклик выход по току Y при фиксированной плотности тока $x_1=1$; д – влияние количества плавиковой кислоты x_2 и плотности по току x_1 на отклик выход по току Y при фиксированной температуре $x_3=-1$; е – диаграмма Парето для влияния независимых факторов на выход по току

Figure 4 – Results of mathematical relationships and the influence of the quantity of hydrofluoric acid x_2 and a current density of x_1 on the response of the current output Y at a fixed temperature level $X_3=0$; б – Influence of temperature X_3 and a current density of x_1 on the response of the current output Y given a fixed amount of hydrofluoric acid $x_2=0$; в – Influence of temperature X_3 and the quantity of hydrofluoric acid x_2 on the response of the current output Y at a fixed current density of $x_1=0$; г – Influence of temperature X_3 and the quantity of hydrofluoric acid x_2 on the response of the current output Y at a fixed current density of $x_1=1$; д-the Effect of the amount of hydrofluoric acid x_2 and the current density x_1 on the response of the current output Y at a fixed temperature $X_3=-1$; e-Pareto Diagram for the influence of independent factors on the current output

Значения коэффициентов уравнения регрессии можно получить при помощи встроенного модуля «Дисперсионный анализ» ПМ Statistica 13.0, где красным цветом программа помечает статистически значимые факторы (таблица 2).

Таблица 2
Полученные коэффициенты уравнения регрессии
в натуральных и кодированных значениях

Table 2
Obtained coefficients of the regression equation in natural and encoded values

Фактор	Оценки эффектов; R-кв.=,92732;Скор.,88885 (Таблица исходных данных 2 3 3-х уровневые ф, 1 Блоки; Остаточн.SS=3,051743 ЗП Выход по току, %						Коеф.
	Эффект	Ст.Ош.	t(17)	p	-95, % Дов.Пред	+95, % Дов.Пред	
Сред/Св.член	41,07407	0,336196	122,1731	0,000000	40,36476	41,78338	41,07407
(1)Плотность тока, А/дм ² (L)	4,33333	0,823508	5,2620	0,000064	2,59588	6,07078	2,16667
Плотность тока, А/дм ² (К)	1,38889	0,713179	1,9475	0,068190	-0,11579	2,89356	0,69444
(2)Количество плавиковой кислоты, г/л(L)	9,44444	0,823508	11,4686	0,000000	7,70699	11,18189	4,72222
Количество плавиковой кислоты, г/л(К)	3,05556	0,713179	4,2844	0,000502	1,55088	4,56023	1,52778
(3)Температура, С(L)	-4,66667	0,823508	-5,6668	0,000028	-6,40412	-2,92922	-2,33333
Температура, С(К)	0,88889	0,713179	1,2464	0,229528	-0,61579	2,39356	0,44444
1L на 2L	0,16667	1,008587	0,1652	0,870698	-1,96127	2,29460	0,08333
1L на 3L	-1,33333	1,008587	-1,3220	0,203688	-3,46127	0,79460	-0,66667
2L на 3L	-0,33333	1,008587	-0,3305	0,745064	-2,46127	1,79460	-0,16667

Искомое уравнение регрессии по формуле (9) принимает вид

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{1,2} X_1 X_2 + \beta_{1,3} X_1 X_3 + \beta_{2,3} X_2 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 = 41,074 + 2,167 X_1 + 4,72 X_2 - 2,33 X_3 + 0,083 X_1 X_2 - 0,667 X_1 X_3 - 0,167 X_2 X_3 + 0,694 X_1^2 + 1,523 X_2^2 + 0,444 X_3^2$$

Поиск экстремальных значений методом крутого восхождения

Желательность увеличивается за пределами факторного пространства по температуре в меньшую сторону и достигает своего максимума при значении в кодированных единицах -2. При этом интервал предсказания моделью сильно увеличивается и границы выхода по току расширяются: от 40 до 55. Плотность тока за границей факторного пространства выше 1,0 начинает снижать желательность и дает диапазон выхода по току от 42 до 55. Такое сочетание факторов, которое показано на рисунке 3 красной границей, независимых факторов позволяет назначить коэффициенты

значимости для уравнения (9), предсказываемые данной моделью для перехода к новой системе координат со смещенным центром и границами факторов. Модель предсказывает в интервале от 47,16 до 51,91 среднее значение выхода по току 49,5%.

Если задать новые интервалы варьирования, представленные в таблице 3, а в качестве отклика задать значения, предсказанные уравнением регрессии модели, полученным выше, то можно будет вывести новые уравнения, описывающие факторное пространство вблизи предсказанного моделью максимума выхода по току. Тогда новое уравнение регрессии примет вид

$$Y = 44,63 + 2,167 X_1 + 3,846 X_2 + 2,33 X_3 + 0,667 X_1 X_3 + 0,136 X_2 X_3 - 1,389 X_1^2 - 2,027 X_2^2 - 0,889 X_3^2$$

Таблица 3
Новые уровни варьирования факторов после оптимизации

Table 3
New levels of factor variation after optimization

Факторы		Нижний уровень: кодированное/натуральное	Верхний уровень: кодированное/натуральное
Плотность тока, А/дм ²	X ₁	0,4/155	1,2/215
Количество плавиково- вой кислоты, г/л	X ₂	0,4/0,7	1,2/1,1
Рабочая температу- ра электролита, °С	X ₃	-1,2/16,3	-0,8/19,7

В результате статистического анализа новой математической модели установили:

1. Среди незначимых коэффициентов модели оказались по критерию Стьюдента все парные взаимодействия и квадратичные коэффициенты, то есть степень искривления поверхности отклика вблизи оптимума минимальна и превращается в плоскость.

2. Проверка условия (11) для полученной модели выполнена, поскольку условие соблюдается при условии сохранения дисперсии воспроизводимости. Расчетное значение F-критерия $F_p = \frac{S_{ад}^2}{S^2\{y\}} = \frac{0,007}{4,385} = 0,002$, что меньше критического значения критерия Фишера

$F_{РАСПОБР(0,05;27;22)} = 2,004$, поэтому модель адекватна.

3. Все коэффициенты уравнения регрессии для дальнейшего приближения к оптимуму оказываются малозначимыми и позволяют получить значение отклика Y до 55%. Дальнейшее движение по факторному пространству ближе к оптимуму без проведения повторных опытов нецелесообразно и в то же время требует более жестких интервалов варьирования независимых параметров. Характер кривизны факторного пространства вблизи предсказанного оптимума можно увидеть на рисунке 5, а степень влияния каждого фактора по диаграмме Парето на рисунке 6.

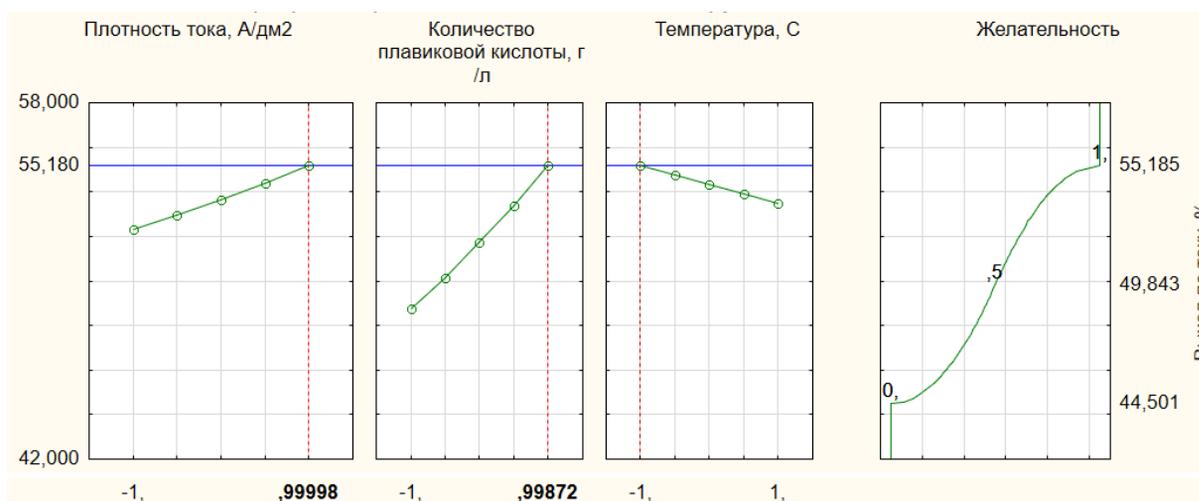


Рисунок 5 – Степень искривления факторного пространства вблизи прогнозного максимума

Figure 5 – The degree of curvature of the factor space near the maximum after the forecast

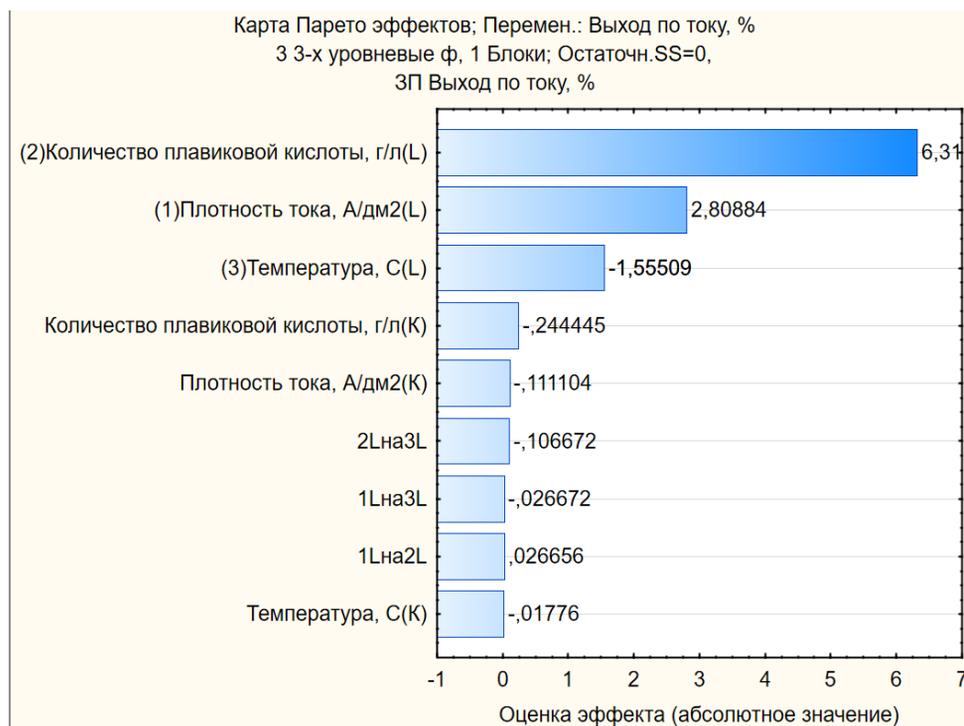


Рисунок 6 – Диаграмма Парето для новой зависимости прогноза вблизи максимума

Figure 6 – Pareto Diagram for the new forecast dependence near the maximum

ВЫВОДЫ

Таким образом, можно сделать следующие главные выводы:

1. Вблизи спрогнозированного моделью оптимума факторное пространство максимально вытягивается и превращается в плоскость, где парные и квадратичные зависимости не влияют на значения получаемого отклика. При этом сохраняется максимальное влияние количества плавиковой кислоты X_2 , плотности тока X_1 и температуры X_3 (см. рисунок 6). Остальные факторы модель считает «шумом» и отбрасывает как малозначимые. Это объясняется необходимостью повторных опытов вблизи факторного пространства, поскольку новая математическая модель получена из прогнозной, неспособна спрогнозировать значение отклика при оптимальных сочетаниях независимых факторов.

2. Назначенные в таблице 3 новые сочетания факторов со смещенными центрами, полученные из анализа рисунка 4,з и 4,д по максимизации выхода по току более 48% позволили получить новое уравнение регрессии, описывающее поведение функции вблизи экстремума. Анализ нового уравнения по-

казывает, что максимизации выхода по току способствуют все линейные коэффициенты в порядке их значимости: x_2, x_1, x_3 , а также парное воздействие x_1, x_3 . Остальные факторы либо уменьшают выход по току, либо малозначимы. Отрицательные коэффициенты перед квадратичными членами уравнения регрессии свидетельствуют о наличии экстремума функции в виде максимизации выхода по току. Но для этого нужны новые опыты со смещенными центрами и границами варьирования.

3. Наилучшим образом описывает поведение функции на всем факторном пространстве первое уравнение регрессии, где наибольший вклад в увеличение выхода по току приносят x_2, x_3, x_1 в порядке их убывания. После чего значимым признано количество плавиковой кислоты – квадратичный член x_2 с положительным коэффициентом, который свидетельствует о наличии минимального/оптимального ее количества, поскольку положительный.

4. Благодаря математическому моделированию эксперимента получили границы для новых экспериментов, а полученное уравнение может прогнозировать выход по току до 48%. Для получения выхода по току свыше

50 до 55 процентов следует максимизировать плотность тока и количество плавиковой кислоты при одновременном снижении температуры электролита до 16,3...19,5 °С. Однако это усложняет технологический процесс необходимостью применения специальных охлаждающих экзотермическую реакцию устройств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Котомчин А.Н., Синельников А.Ф., Корнейчук Н.И. К вопросу выбора способа восстановления деталей машин // Вестник СибАДИ. 2020. № 17(1). С. 84-97.
2. Фомичев В.Т., Садовникова В.В., Москвичева Е.В. Легирование электролитического хрома молибденом в электролите, содержащем органические добавки // Гальванотехника и обработка поверхности. 1992. Т. 1. №3. С. 44-46.
3. Ткаченко И.Д. [и др]. Усовершенствование технологии хромирования с применением неорганических и органических композиций // Разработка и применение твердых металлических покрытий. Днепропетровск. 1981. С. 223-224.
4. Котомчин А.Н., Синельников А.Ф., Корнейчук Н.И. Сравнительная характеристика электролитов хромирования для восстановления и упрочнения деталей машин. ВИНТИ, «Транспорт: наука, техника», Научно-информационный сборник, управление». 2020. № 7. С. 50-55.
5. Newby Kenneth, R. Functional chromium plating // Metal Finish. 2004. Vol. 102. №4А. Pp. 188-198.
6. Котомчин А.Н., Синельников А.Ф. Усовершенствование холодного саморегулирующегося электролита хромирования при упрочнении и восстановлении деталей машин // Мир транспорта и технологических машин. 2019. №4 (67). С. 17-24.
7. Котомчин А.Н., Синельников А.Ф., Корнейчук Н.И. Интенсификация процесса электролитического хромирования при восстановлении и упрочнении деталей машин // Мир транспорта и технологических машин. 2020. №3 (70). С. 22-32.
8. Елинек Т.В. Успехи гальванотехники. Обзор мировой специальной литературы за 2017–2018 годы // Гальванотехника и обработка поверхности. 2019. Т. 27. №3. С. 4-14.
9. Едигарян А.А., Полукаров Ю.М. Электроосаждение хрома и его сплавов из сульфатных растворов Сг (III) // Гальванотехника и обработка поверхности. 2001. Т. 9. №3. С. 17-18.
10. Максименко С.А., Балакина О.А. Электроосаждение хромовых покрытий из электролитов на основе хрома (3) и муравьиной кислоты // Гальванотехника и обработка поверхности. 1992. Т. 1. №3–4. С. 47-50.
11. Петров Ю.Н., Корнейчук Н.И. [и др.] Прогрессивные способы восстановления деталей машин и повышения их прочности // Межвузовский сборник научных трудов. Кишинёв: Кишиневский сельскохозяйственный институт им. М.В. Фрунзе, 1979. С. 48-51.
12. Кудрявцев В.Н., Винокуров Е.Г., Кузнецов В.В. Толстослойное хромирование из электролитов на основе сернистого хрома // Гальванотехника и обработка поверхности. 1998. Т. 6. №1. С. 24-30.
13. Солодкова Л.Н., Ващенко С.В., Кудрявцев В.Н. Высокопроизводительный электролит износостойкого хромирования // Гальванотехника и обработка поверхности. 2003. Т. 11. № 3. С. 31-33.
14. Baraldi P., Soragni E. On the kinetics of chromium electrodeposition on copper electrodes // J. Alloys and Compounds. 2001. №317-318. Pp. 612-618.
15. Зорин, В.А., Штефан Ю.В., Тимченко М.И. Планирование экспериментов при создании деталей из композиционных материалов // Механизация строительства. 2018. Т. 79. № 4. С. 5-13.
16. Котомчин А.Н., Синельников А.Ф. Установка для поддержания рабочей температуры электролитов при восстановлении деталей машин гальваническими покрытиями. Вестник СибАДИ. 2020;17(4). С. 500-511.
17. Петроченкова И.В., Помогаев В.М., Волкович А.В. Особенности влияния температуры на рассеивающую способность электролитов // Успехи в химии и химической технологии. Новомосковск, НИ РХТУ. 2004. С. 44-51.
18. Chromabscheidung aus wässrigen Lösungen. Aufbau des Kathodenfilms Galvanotechnik. 2006. №12. Т. 11. Pp. 2888-2896.
19. Bolch T., Linde R. U.A. Innovative Oberflächenstrukturen durch elektrochemische Beschichtungsverfahren // Galvanotechnik. 2005. №103. Pp. 2095-2100.
20. Chromabscheidung aus wässrigen Lösungen. Chromsaurelösungen Galvanotechnik. 2005. №9. Т. 1. pp. 2063-2071.
21. Корнейчук Н.И., Ковбасюк А.В. [и др.]. Влияние концентрации трехвалентных соединений хрома на некоторые параметры холодного хромирования // Труды Кишиневского СХИ. 1975. №144. С. 17-23.
22. Аджиев, Б.У., Ващенко С.В., Соловьева З.А. Влияние структуры и физико-механических свойств хрома на износостойкость хромовых покрытий // Гальванотехника и обработка поверхности. 1992. Т. 1. №1. С. 28-31.
23. Солодкова Л.Н., Соловьева З.А. Исследование пленки на катоде при электровосстановлении хромовой кислоты // Электрохимия. 1994. Т. 30. №10. С. 1254-1256.
24. Шлугер М.А., Ток Л.Д. Новые электролиты для покрытий хромом и его сплавами // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. 1988. Т. 32. №3. С. 297-305.
25. Галдина В.Д., Черногородова М.С. Подбор составов активированных минеральных порошков с использованием метода планирования эксперимента // Вестник СибАДИ. 2017. 2(54). С. 90-98.
26. Витязь П.А., Жилинский О.В., Лактошина Т.В. Компьютерная методология выбора технически оптимального варианта в многокритериальных задачах проектирования материалов // Физическая мезомеханика. Томск. 2004. Т. 7. Ч. 1. С. 3-11.

27. Горбунов И.П., Горбунов Д.И. Математическое моделирование процесса диффузионного хромирования стали. Теория и практика производства листового проката // Сборник научных трудов. Ч. 2. Липецк, ЛГТУ, 2008. С. 68-72.

REFERENCES

1. Kotomchin A.N., Sinel'nikov A.F., Kornejchuk N.I. K voprosu vybora sposoba vosstanovlenija detalej mashin [To the question of choosing a method for restoring machine parts]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(1): 84-97. (in Russian)
2. Fomichev V.T., Sadovnikova V.V., Moskvicheva E.V. Legirovanie jelektroliticheskogo hroma molibdenom v jelektrolite, soderzhashhem organicheskie dobavki [Alloying of electrolytic chromium with molybdenum in an electrolyte containing organic additives]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 1992; 1 (3): 44-46. (in Russian)
3. Tkachenko I.D. i dr. Uovershenstvovanie tehnologii hromirovanija s primeneniem neorganicheskikh i organicheskikh kompozicij [Improvement of chrome plating technology with the use of inorganic and organic compositions]. *Razrabotka i primeneniye tverdykh metallicheskih pokrytij*. 1981. 223-224. (in Russian)
4. Kotomchin A.N., Sinel'nikov A.F., Kornejchuk N.I. Sravnitel'naja harakteristika jelektrolitov hromirovanija dlja vosstanovlenija i uprochnenija detalej mashin [Comparative characteristics of chrome plating electrolytes for the restoration and hardening of machine parts]. *VINITI «Transport: nauka, tehnika*. 2020; 7: 50-55. (in Russian)
5. Newby Kenneth, R. Functional chromium plating. *Metal Finish*. 2004; 102 (4A): 188-198.
6. Kotomchin A.N., Sinel'nikov A.F. Uovershenstvovanie holodnogo samoregulirujushhegosja jelektrolita hromirovanija pri uprochnenii i vosstanovlenii detalej mashin [Improvement of cold self-regulating electrolyte of chromium plating for hardening and restoration of machine parts]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. 2019; 4 (67): 17-24. (in Russian)
7. Kotomchin A.N., Sinel'nikov A.F., Kornejchuk N.I. Intensifikacija processa jelektroliticheskogo hromirovanija pri vosstanovlenii i uprochnenii detalej mashin [Intensification of the process of electrolytic chrome plating during restoration and hardening of machine parts]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. 2020; 3 (70): 22-32. (in Russian)
8. Elinek T.V. Uspehi gal'vanotekhniki. Obzor mirovoj special'noj literatury za 2017–2018 gody [Advances in electroplating. World literature review for 2017-2018]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 2019; 27 (3): 4-14. (in Russian)
9. Edigarjan A.A., Polukarov Ju.M. Jelektroosazhdenie hroma i ego splavov iz sul'fatnyh rastvorov Sg (III) [Electrodeposition of chromium and its alloys from SG (III) sulphate solutions]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 2001; 9 (3): 17-18. (in Russian)
10. Maksimenko S.A., Balakina O.A. Jelektroosazhdenie hromovyh pokrytij iz jelektrolitov na osnove hroma (3) i murav'inoj kisloty [Electrodeposition of chromium coatings from electrolytes based on chromium (3) and formic acid]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 1992; 1(3-4): 47-50. (in Russian)
11. Petrov Ju.N., Kornejchuk N.I. i dr. Progressivnye sposoby vosstanovlenija detalej mashin i povshenija ih prochnosti [Progressive ways to restore machine parts and increase their strength]. *Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov. Kishinjov, Kishinevskij sel'skohozjajstvennyj institut im. M.V. Frunze*. 1979. 48-51. (in Russian)
12. Kudrjavcev V.N., Vinokurov E.G., Kuznecov V.V. Tolstoslojnoe hromirovanie iz jelektrolitov na osnove sernokisllogo hroma [Thick-layer chrome plating of electrolytes based on chromium sulphate]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 1998; 6 (1). 24-30. (in Russian)
13. Solodkova L.N., Vashhenko S.V., Kudrjavcev V.N. Vysokoproizvoditel'nyj jelektrolit iznosostojkogo hromirovanija [High-performance wear-resistant chrome-plated electrolyte]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 2003; 11 (3): 31-33. (in Russian)
14. Baraldi P., Soragni E. On the kinetics of chromium electrodeposition on copper electrodes. *J. Alloys and Compounds*. 2001; 317-318: 612-618.
15. Zorin, V.A., Shtefan Ju.V., Timchenko M.I. Planirovanie jeksperimentov pri sozdanii detalej iz kompozicionnyh materialov [Planning experiments when creating parts from composite materials]. *Mehanzacija stroitel'stva*. 2018; 79(4): 5-13. (in Russian)
16. Kotomchin A.N., Sinel'nikov A.F. Ustanovka dlja podderzhanija rabochej temperatury jelektrolitov pri vosstanovlenii detalej mashin gal'vanicheskimi pokrytijami [Anlage zur Aufrechterhaltung der Betriebstemperatur der Elektrolyte bei der Reparatur von Maschinenteilen mit galvanischen Beschichtungen]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(4): 500-511. (in Russian)
17. Petrochenkova I.V., Pomogaev V.M., Volkovich A.V. Osobennosti vlijanija temperatury na rasseivajushhuju sposobnost' jelektrolitov [Features of temperature influence on the scattering capacity of electrolytes]. *Sb. nauchnyh trudov: Uspehi v himii i himicheskoi tehnologii*. Novomoskovsk, NI RHTU, 2004. 44-51. (in Russian)
18. Chromabscheidung aus wassrigen Losungen. Aufbau des Kathodenfilms Galvanotechnik. 2006; 12 (11): 2888-2896.
19. Bolch T., Linde R. u.a. Innovative Oberflächenstrukturen durch elektrochemische Beschichtungsverfahren. *Galvanotechnik*. 2005; 103: 2095-2100.
20. Chromabscheidung aus wassrigen Losungen. Chromsaurelosungen Galvanotechnik. 2005; 9 (1): 2063-2071.
21. Kornejchuk N.I., Kovbasjuk A.V. i dr. Vlijanie koncentracii trehvalentnyh soedinenij hroma na nekotorye parametry holodnogo hromirovanija [Influence of concentration of trivalent chromium compounds on some parameters of cold chrome plating]. *Trudy Kishinevskogo SHI*. 1975; 144:17-23. (in Russian)
22. Adzhiev, B.U., Vashhenko S.V., Solov'eva Z.A. Vlijanie struktury i fiziko-mehaničeskikh svojstv

hroma na iznosostojkost' hromovyh pokrytij [Influence of the structure and physical and mechanical properties of chromium on the wear and resistance of chrome coatings]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 1992; 1(1): 28-31. (in Russian)

23. Solodkova L.N., Solov'eva Z.A. Issledovanie plenki na katode pri jelektrovozstanovlenii hromovoj kisloty [Investigation of the film on the cathode during the electric recovery of chromic acid]. *Jelektrohimiya*. 1994; 30 (10): 1254-1256. (in Russian)

24. Shluger M.A., Tok L.D. Novye jelektrolity dlja pokrytij hromom i ego splavami [New electrolytes for chromium and its alloys coatings]. *Zhurnal Vsesojuznogo himicheskogo obshhestva im. D.I. Mendeleeva*. 1988; 32 (3): 297-305. (in Russian)

25. Galdina V.D., Chernogorodova M.S. Podbor sostavov aktivirovannyh mineral'nyh poroshkov s ispol'zovaniem metoda planirovaniya jeksperimenta [Selection of activated mineral powder compositions using the experiment planning method]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017. 2(54). 90-98. (in Russian)

26. Vitjaz' P.A., Zhilinskij O.V., Laktjushina T.V. Komp'yuternaja metodologija vybora tehnikeski optimal'nogo varianta v mnogokriterial'nyh zadachah proektirovaniya materialov [Computer methodology for selecting the technically optimal option in multi-criteria problems of material design] // *Fizicheskaja mezhzvezd'nyj zhurnal*. 2004; 7 (1): 3-11.27. (in Russian)

27. Gorbunov I.P., Gorbunov D.I. Matematicheskoe modelirovanie processa diffuzionnogo hromirovaniya stali [Mathematical modeling of the process of diffusion chrome plating of steel] // *Teorija i praktika proizvodstva listovogo prokata. Sbornik nauchnyh trudov*. Lipeck, LGTU, 2008; 2: 68-72. (in Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Котомчин Алексей Николаевич. Основная работа по исследованию и сбору информации для составления статьи.

Штефан Юрий Витальевич. Математическая обработка и анализ полученных результатов.

Зорин Владимир Александрович. Методическое и научное сопровождение при подготовке статьи, получение достоверных результатов исследований и их подтверждение.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Alexei N. Kotomchin. The main work on research and collection of information for the preparation of the article.

Yurii V. Shtefan . Mathematical processing and analysis of the results.

Vladimir A. Zorin. Methodological and scientific support in the preparation of the article, obtaining reliable research results and their confirmation.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Котомчин Алексей Николаевич – аспирант кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин» МАДИ (125329, Россия, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Ленинградский проспект, 64, Москва), старший научный сотрудник лаборатории «Реновация машин и оборудования» Приднестровского государственного университета. Т. Г. Шевченко (3300, Молдова, Приднестровье, Тирасполь, ул. 25 Октября, 128), e-mail: aleshka81@list.ru, ORCID 0000-0002-4750-5255.

Штефан Юрий Витальевич – кандидат технических наук, доцент кафедры Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин, МАДИ, e-mail: shtefan@madi.ru, ResearcherID T-2184-2017, ORCID: 0000-0002-7882-4873.

Зорин Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин, МАДИ, e-mail: madi-dm@list.ru, ResearcherID Q-6455-2016.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksei N. Kotomchin – Postgraduate student of the Production and Repair of Cars and Road Vehicles Department, Moscow State Automobile and Highway Technical University (MADI) (125329, Russia, Moscow, 64, Leningradsky Ave.), Senior Researcher of the Renovation of Machinery and Equipment Laboratory, T.G. Shevchenko Pridnestrovian State University named (3300, Moldova, Tiraspol, 128, 25-go Oktiabria St., e-mail: aleshka81@list.ru, ORCID 0000-0002-4750-5255.

Yurii V. Shtefan – Cand. of Sci., Associate Professor of the Production and Repair of Cars and Road Vehicles Department, MADI, e-mail: shtefan@madi.ru, ResearcherID T-2184-2017, ORCID: 0000-0002-7882-4873

Vladimir A. Zorin – Dr. of Sci., Professor, Production and Repair of Cars and Road Vehicles Department, MADI, e-mail: madi-dm@list.ru, ResearcherID Q-6455-2016.

**РАЗДЕЛ III.
СТРОИТЕЛЬСТВО
И АРХИТЕКТУРА**



**PART III.
CONSTRUCTION
AND ARCHITECTURE**

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИРПИЧНОГО ЗДАНИЯ ПОВЫШЕННОЙ ЭТАЖНОСТИ НА СВАЙНОМ ФУНДАМЕНТЕ

И.И. Подшивалов, А.В. Журавлев

Томский государственный архитектурно-строительный университет
(ТГАСУ),
г. Томск, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Настоящая работа посвящена моделированию напряженно-деформированного состояния кирпичного здания повышенной этажности на свайном фундаменте в сложных инженерно-геологических условиях с использованием проектно-вычислительного комплекса MicroFe, который позволяет создать расчетную схему в системе «основание–фундамент–здание» с использованием свай в виде стержневых конечных элементов в грунтовом массиве.

Цель. Анализ напряженно-деформированного состояния системы «основание – фундамент – здание», получение расчетных значений усилий и армирования в ростверке.

Материалы и методы. Расчет проводился как в линейной постановке, так и в конструктивно нелинейной постановке с односторонними нелинейными связями между объемными элементами грунта и стержневыми элементами свай.

Результаты. В нелинейной постановке решения задачи при ограничении допускаемой расчетной нагрузки на сваи получено перераспределение усилий между сваями через ростверк.

Выводы. Линейный расчет проводится в случае, когда наибольшие усилия в сваях не превышают заданную расчетную нагрузку. Если это условие не выполняется, то в расчетной модели вводится ограничение по величине предельной нагрузки на сваи, равной расчетному значению, и расчет выполняется с учетом конструктивной нелинейности односторонних связей между стержневыми элементами свай и объемными элементами грунта.

Решение задачи в нелинейной постановке позволяет учесть перераспределение усилий между сваями через ростверк, в результате чего за счет изменения расположения свай можно получить оптимальное конструктивное решение как свайного фундамента, так и надземной части здания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: здание, свайный фундамент, напряженно-деформированное состояние, расчетная модель, линейный и нелинейный расчеты, перераспределение усилий между сваями.

Поступила 17.11.20, принята к публикации 25.12.2020.

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 И.И. Подшивалов, А.В. Журавлев. Моделирование кирпичного здания повышенной этажности на свайном фундаменте. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-754-763>

© Подшивалов И.И., Журавлев А.В.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-754-763>

MODELING OF A BRICK BUILDING OF HIGH STOREYS ON A PILE FOUNDATION

Ivan I. Podshivalov, Alexey V. Zhuravlev

Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering
(TSUACE),
Tomsk, Russia

ABSTRACT

Relevance. This work is devoted to modeling the stress-strain state of a high-rise brick building on a pile foundation in engineering and geological conditions using the MicroFe design and computing complex, which allows you to create a design scheme in the “base – foundation – building” system using piles in the form of rod end. elements in the soil mass.

Goal. Analyzed-deformed state of the system “base – foundation – building”, obtaining the calculated values of tension and reinforcement in the grillage.

Materials and methods. The calculation was carried out both in a linear formulation and in a constructively nonlinear formulation with one-sided nonlinear connections between bulk soil elements and pile bar elements.

Results. In a nonlinear formulation of the solution to the problem, with a limitation of the permissible design load on the piles, a redistribution of efforts between the piles through the grillage is obtained.

Conclusions. Linear calculation is carried out in the case when the greatest forces in the piles do not exceed the specified design load. If this condition is not met, then in the design model, a limitation is introduced on the value of the ultimate load on the piles, equal to the design value, and the calculation is performed considering the constructive nonlinearity of one-sided connections between the pile bar elements and bulk soil elements.

Solving the problem in a non-linear formulation allows us to consider the redistribution of efforts between the piles through the grillage, because of which, by changing the location of the piles, it is possible to obtain an optimal design solution for both the pile foundation and the overhead part of the building.

KEYWORDS: building; pile foundation; stress-strain state; calculation model; linear and nonlinear calculations; redistribution of efforts between piles.

Submitted 17.11.20, revised 25.12.2020.

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: Ivan I. Podshivalov, Alexey V. Zhuravlev. Modeling of a brick building of high storeys on a pile foundation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-754-763>

© Podshivalov I.I., Zhuravlev A.V.



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

ВВЕДЕНИЕ

Обоснованное использование запасов прочности надземных конструкций и фундаментов позволяет увеличивать этажность зданий на свайном фундаменте. Стены кирпичных зданий повышенной этажности по конструктивной схеме относятся к жестким системам, в которых учет податливости свайного основания зданий имеет большое значение [1, 2, 3, 4]. Выбор расчетной схемы, которая наиболее полно может смоделировать конструктивную схему здания, является одним из важнейших факторов при определении напряженно-деформированного состояния строительных конструкций и фундаментов [5, 4, 6, 7, 8, 9]. Моделирование взаимодействия свайных фундаментов с грунтовым основанием и анализ распределения нагрузки между сваями в настоящее время является достаточно актуальным [10, 11, 12, 13, 14, 15]. Оптимальное расположение свай в составе свайных фундаментов позволяет снизить затраты на возведение фундаментов при сохранении требуемой несущей способности.

По методике, принятой в нормативных документах, если продольное усилие хотя бы в одной свае превысило расчетную нагрузку на сваю, то считается, что предельное состояние наступило во всем свайном фундаменте. При этом предельное состояние при расчете по деформациям еще не было достигнуто. В этом случае, допуская возможность перераспределения усилий между сваями без превышения расчетной нагрузки, можно получить более полное использование запасов несущей способности свайных фундаментов за счет уменьшения количества или длины свай.

В расчете свайного поля основным является не несущая способность одиночной сваи, а деформации грунта межсвайного пространства и ниже конца свай. В связи с этим расчет свайного фундамента рекомендуется выполнять численным методом в объемной постановке, моделирующим поведение каждой сваи. При расчете необходимо учитывать взаимодействие свай между собой в свайном поле и с грунтом, перегруженность крайних свай относительно центральных, зависимость результатов расчета от прочностных характеристик грунта. По данным [6, 7], в соответствие с результатами мониторинга высотных зданий и выполненного численного моделирования, было установлено, что угловые сваи перегружены в 2,4–4 раза по сравнению с центральными, а контурные – 1,5–2 раза. Распределение усилий между сваями в свайном

фундаменте рекомендуется определять на основании расчетов в объемной постановке в системе «основание–фундамент–здание» [16, 17, 18, 19]. При расчете свайных фундаментов следует учитывать влияние свай друг на друга, перегруженность угловых и контурных свай относительно центральных, при проектировании с помощью конструктивных мероприятий выравнять усилия в сваях.

Верифицированный ПВК MicroFe позволяет достаточно адекватно реализовать конечно-элементное моделирование расчетной схемы системы «основание–фундамент–здание» [20, 21, 22, 23, 24, 25].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ниже приведен пример использования ПВК MicroFe при анализе проектных решений строящегося 16-этажного кирпичного здания в г. Томске. Кирпичное здание запроектировано из трех продольно расположенных на разных отметках блок-секциях, разделенных между собой осадочными швами (рисунок 1). Размеры в плане по габаритным осям каждой блок-секции составляют 25,32x16,35 м, высота этажа – 2,8 м, общая высота здания с учетом подвала и технического этажа с лифтовой надстройкой – 56,34 м. Наружные и внутренние стены толщиной, соответственно, 770 и 510 мм запроектированы из керамического кирпича марки М125 на цементно-песчаном растворе марки М100. Несущими элементами перекрытий и покрытия являются сборные железобетонные многослойные плиты толщиной 220 мм различной длины и ширины. Стены подвала запроектированы из сборных бетонных стеновых блоков толщиной 500 и 800 мм. Монолитный железобетонный ленточный ростверк толщиной 750 мм имеет ширину от 1,4 до 2 м. Сваи сечением 300x300 мм выполнены длиной 12 м в первых двух блок-секциях и длиной 16 м (составные) в третьей блок-секции. Инженерно-геологический разрез площадки строительства с привязкой свай и ростверка, основные физико-механические характеристики грунтов приведены на рисунке 1 и в таблице. При разработке котлована насыпной грунт ИГЭ 714 и торф ИГЭ 136 были заменены на привозной грунт, по характеристикам, близким к ИГЭ 306 – суглинок аллювиальный легкий текучей консистенции.

В качестве расчетной схемы использовалась пространственная оболочечно-стержневая конечно-элементная модель. В расчетной модели кирпичные стены, диски железобетонных перекрытий и ростверк моделировались конечным элементом типа «плоский прямоу-

гольный элемент оболочки», сваи моделировались конечным элементом типа «стержень». Грунтовое основание под ростверком принималось в виде четырехслойного основания из объемных конечных элементов с послойным заданием модуля деформаций и коэффициента Пуассона $\nu = 0,33$. Свайное основание моделировалось с фактическими размерами свай с возможностью ограничения предельной нагрузки на сваи, что вполне коррелируется с работой свайного куста, в котором грунтово-свайный массив, в условиях обжатого грун-

та между сваями, передает нагрузку на свое основание. Сопряжение свай с ростверком принято жестким. По результатам статического зондирования свай, расчетная нагрузка на сваи составила 600 кН. Кирпичная кладка рассматривалась как ортотропный материал, в железобетонных конструкциях материал принимался как изотропный. Сопряжение кирпичной кладки стен первого этажа с бетонными блоками подвала и последних с монолитным ростверком, а также плит перекрытий со стенами – шарнирно неподвижное.

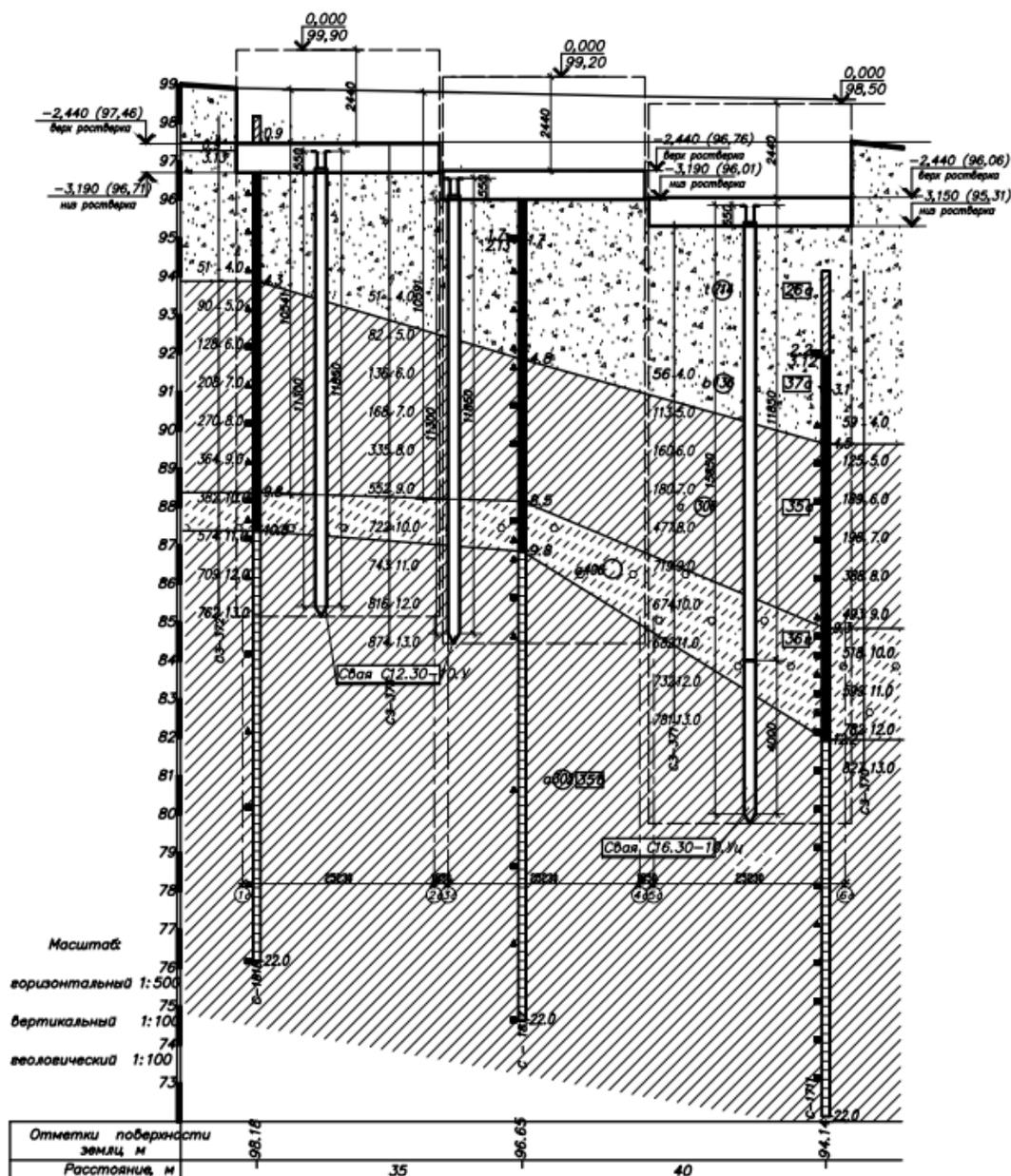


Рисунок 1 – Инженерно-геологический разрез с посадкой трех блок-секций на разных отметках

Figure 1 – Engineering-geological section with landing of three block-sections at different elevations

Таблица
Основные нормативные и расчетные значения показателей свойств грунтов

Table
Basic normative and calculated values of soil properties indicators

№ ИГЭ слоя	Описание грунтов	Плотность природного грунта, ρ , т/м ³	Число пластичности, I_p	Расчетный угол внутреннего трения по, град.		Расчетное удельное сцепление по, МПа		Модуль деформаций, E МПа,
				деформациям, φ_1	несущей способ- ности, φ_2	деформа- циям, C_{II}	несу- щей способ- ности, C_1	
306	Суглинок аллювиальный легкий текучей консистенции	1,95	10	20	17	21	14	11
406	Супесь гравелистая текучей консистенции	2,02	4	31	27	8	5	45
302	Суглинок элювиальный легкий пылеватый полутвердой консистенции	2,00	10	23	22	31	31	31

Пулсационная составляющая ветровой нагрузки определялась при абсолютно жестком закреплении свайного основания, которая затем транслировалась в расчетную модель блок-секции на свайном основании в качестве дополнительной нагрузки. Конструктивная и расчетная конечно-элементная модели блок-секций даны на рисунок 2.

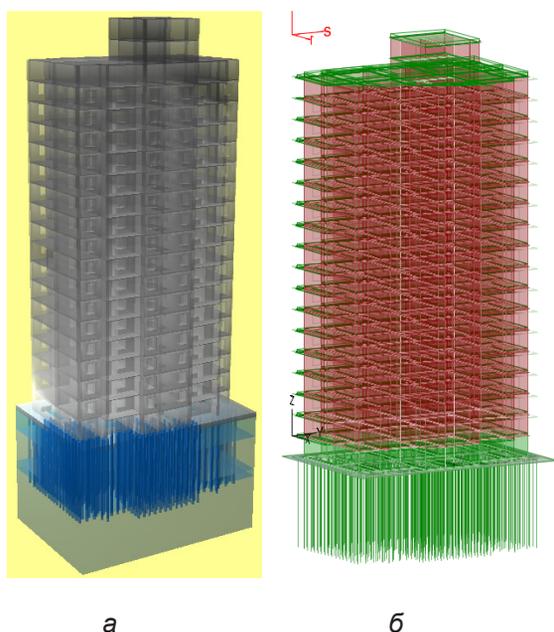


Рисунок 2 – Конструктивная (а) и расчетная (б) конечно-элементная модель блок-секции

Figure 2 – Constructive (a) and calculated (b) finite element model of the block section

РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчет проводился в следующей последовательности:

1. На первом этапе в линейной постановке выполнялся расчет каждой блок-секции в своих грунтовых условиях, определялись усилия в сваях, которые сравнивались с заданной расчетной нагрузкой, равной 600 кН. Из полученных результатов было установлено, что во всех трех блок-секциях максимальные усилия в сваях оказались разными, а в контурных сваях превысили расчетную нагрузку, причем во второй блок-секции – это превышение было наибольшим и составило 251,69 кН (рисунок 3). Следует отметить, что превышения расчетного значения усилий в сваях не может произойти, так как в этом случае скорость осадки сваи увеличивается, свая становится более податливой и не способна воспринять нагрузку, превышающую расчетную величину в системе «сваи–ростверк». Таким образом, в многоэтажных зданиях, где наибольшие усилия в сваях превышают расчетную нагрузку, линейный статический расчет приводит к некорректному результату.

2. На втором этапе в расчетную схему вводилось ограничение по величине предельной нагрузки на сваи, равной расчетному значению 600 кН. В этом случае расчет проводился с учетом конструктивной нелинейности с односторонними связями с изменяющейся жесткостью между стержневыми элементами сваи и объемными элементами грунта. Односторонние связи по контакту свай с грунтом

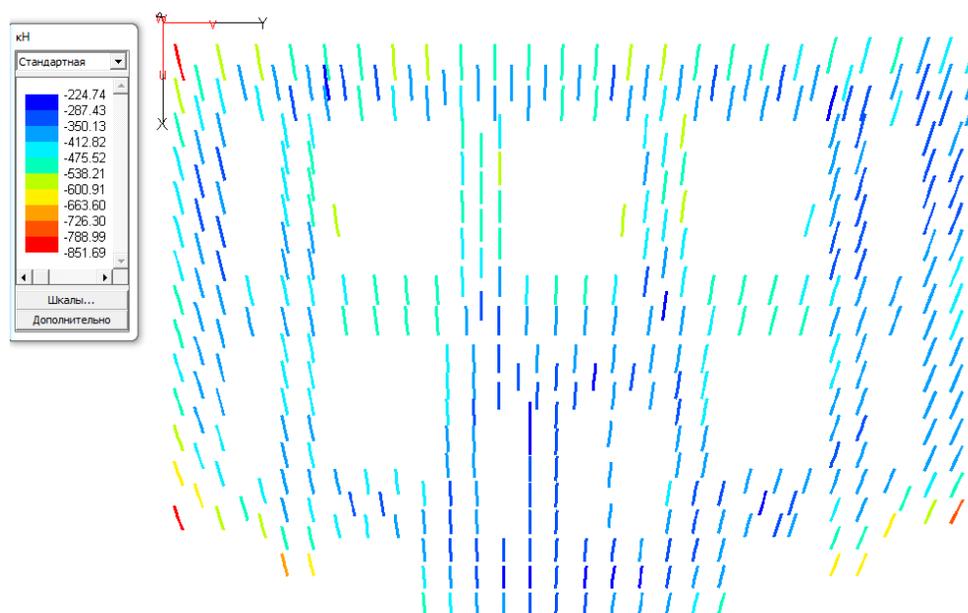


Рисунок 3 – Расчетные усилия в сваях во второй блок-секции при линейном расчете

Figure 3 – Calculated forces in piles in the second block section during linear calculation

допускают вертикальные перемещения свай только вниз. При превышении ограничения величины предельной нагрузки на сваи меняется жесткость этих односторонних связей, после чего расчет проводится для новой схемы. По протоколу статического анализа было выпол-

нено пять нелинейных итераций при точности 0,001. Данный подход позволяет получить более равномерные и правдоподобные усилия в сваях (рисунок 4), а также приближенные к реальным вертикальные перемещения свай (рисунок 5).

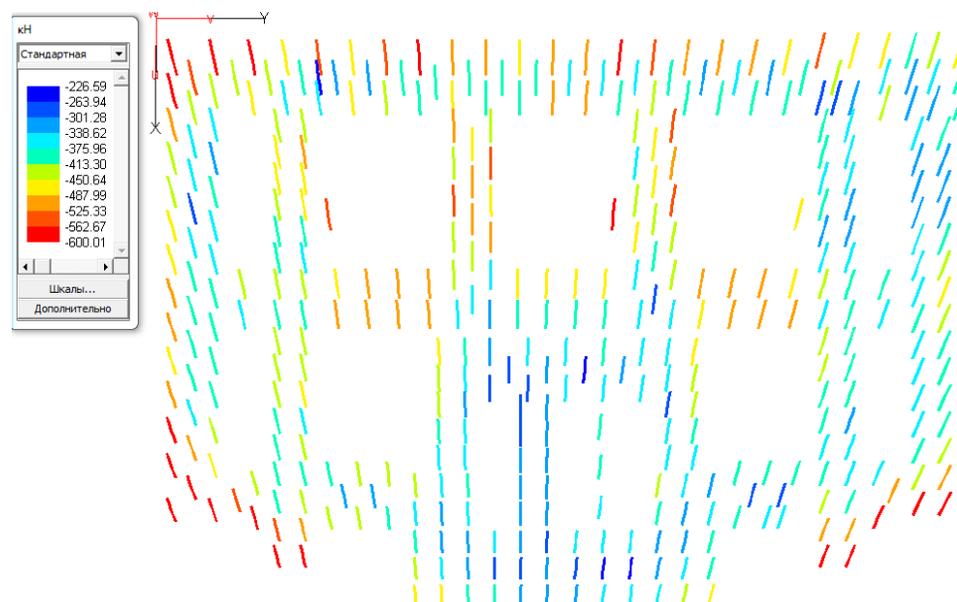


Рисунок 4 – Расчетные усилия в сваях во второй блок-секции при конструктивной нелинейности связей между объемными элементами грунта и стержневыми элементами свай

Figure 4 – Calculated forces in piles in the second block section with constructive nonlinearity of connections between bulk elements of soil and core elements of piles

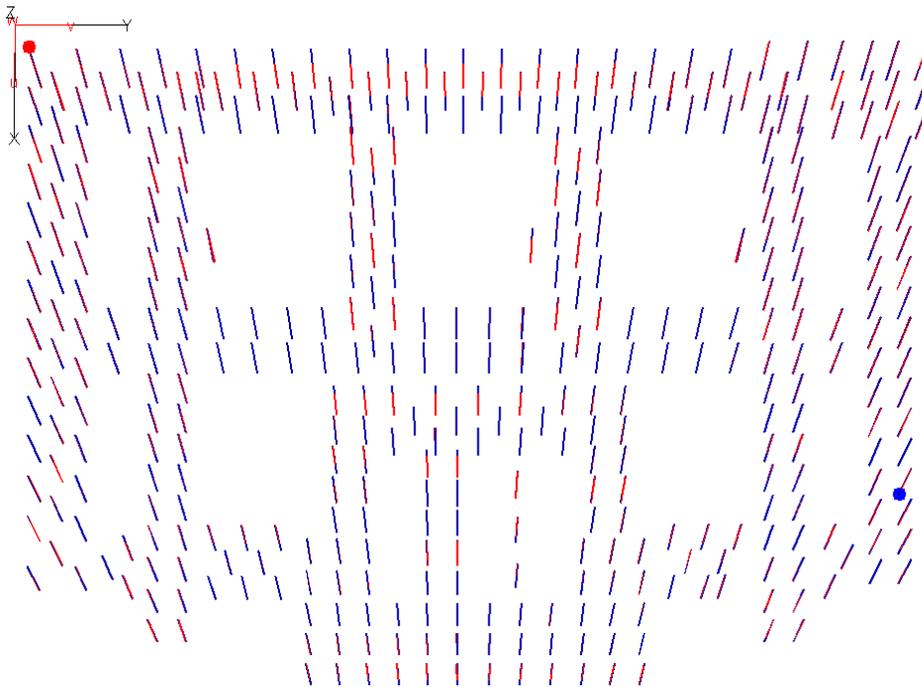


Рисунок 5 – Вертикальные перемещения свай во второй блок-секции

Figure 5 – The vertical movement of the piles in the second block section

При оптимизации свайного поля, увеличивая расстояние между «синими» и «голубыми» сваями, которые нагружены, соответственно, на $\frac{1}{2}$ и $\frac{1}{3}$ от расчетной нагрузки, можно полу-

чить свайное поле из «красных» и «оранжевых» свай, в которых усилия будут равны или близки по значению к заданной расчетной нагрузке на сваи.

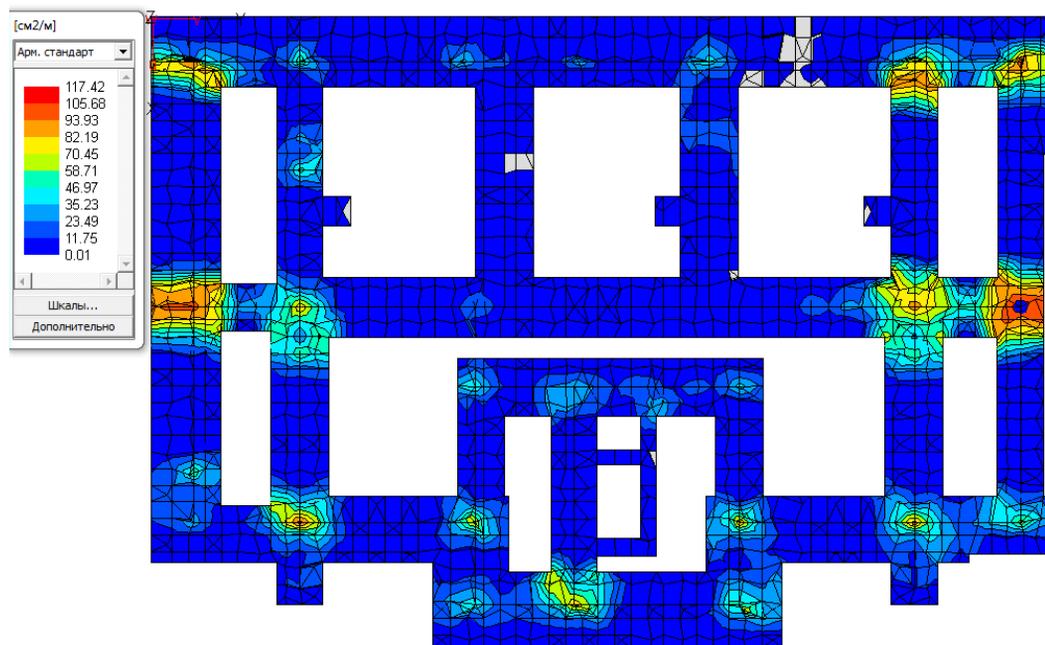


Рисунок 6 – Необходимое нижнее продольное армирование в поперечных лентах ростверка второй блок-секции

Figure 6 – Necessary lower longitudinal reinforcement in the cross belts of the grillage of the second block section

Следует отметить, что при нелинейном расчете, вводя ограничение по предельной нагрузке на сваи и учитывая перераспределение усилий между сваями, превышения предельного состояния по первой группе в свайном фундаменте не происходит. По сравнению с линейным расчетом в нелинейном расчете увеличиваются вертикальные перемещения свай, которые не должны превышать нормативных значений по предельному состоянию второй группы.

Максимальные вертикальные перемещения свайного основания второй блок-секции составили 112,3 мм, что не превышает предельно допускаемые значения 180 мм. Относительная разница вертикальных перемещений свай равна 0,00078, что меньше предельно допускаемого значения 0,0024.

В качестве примера из результатов расчета на рисунке 6 приведено необходимое нижнее продольное армирование в поперечных лентах ростверка второй блок-секции при учете конструктивной нелинейности связей между объемными элементами грунта и стержневыми элементами свай. Анализируя результаты расчета ростверков, можно отметить, что необходимое продольное и поперечное армирование находится в «синей» и «голубой» зонах со значением расчетного армирования в пределах 11,75 см²/м. Зоны другого цвета получились в результате «издержек» в генерации сетки, проведенной самой программой, в которой появились треугольные и четырехугольные конечные элементы «неправильной формы». Для устранения этих зон разработчики программы рекомендуют выполнить сгущение сетки в ростверке с использованием функции соединения несогласованных сеток ростверка с вышерасположенными стенами подвала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Использование расчетной модели системы «основание–фундамент–здание» в ПВК MicroFe позволяет достаточно адекватно отобразить конструктивную схему здания повышенной этажности в реальных инженерно-геологических условиях.

2. Линейный расчет проводится в случае, когда наибольшие усилия в сваях не превышают заданную расчетную нагрузку. Если это условие не выполняется, то в расчетной модели вводится ограничение по величине предельной нагрузки на сваи, равной расчетному значению, и расчет выполняется с учетом конструктивной нелинейности односторонних связей между стержневыми элементами свай и объемными элементами грунта.

3. Решение задачи в нелинейной постановке позволяет учесть перераспределение усилий между сваями через ростверк, в результате чего за счет изменения расположения свай можно получить оптимальное конструктивное решение как свайного фундамента, так и надземной части здания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шашкин В.А. Эффекты взаимодействия оснований и сооружений // Развитие городов и геотехническое строительство. 2012. № 14. С. 141-167.
2. Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. Взаимодействие здания и основания: методика расчета и практическое применение при проектировании. Санкт-Петербург, Стройиздат, 2002. 48 с.
3. Ильичев В.А., Мангушев Р.А. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. Москва, АСВ, 2014. 728 с.
4. Шашкин А.Г., Улицкий В.М. Основы мониторинга механической безопасности сооружений при строительстве и эксплуатации // Промышленное и гражданское строительство. 2017. №12. С. 6-14.
5. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Кузнецов Е.Н. О современных проблемах расчета высотных зданий из монолитного железобетона // II Всероссийская (Международная) конференция. Бетон и железобетон – пути развития. 2005. Т. 1. 149-166 с.
6. Шулятьев О.А. Основания и фундаменты высотных зданий. Москва, 2016. 392 с.
7. Шулятьев О.А. Фундаменты высотных зданий // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2014. №4. С. 202-244.
8. Шулятьев О.А. Геотехнические особенности проектирования высотных зданий в Москве // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 10. С. 17-25.
9. Харичкин А.И., Безволев С.Г., Шулятьев О.А. Практическое исследование краевой сваи // Сборник научных трудов 75 лет НИИОСП им. Н.М. Герсеванова. 2006. С. 224-230.
10. Колчунов В.И., Потапов В.В., Дмитриева К.О. Расчетный анализ длительного деформирования системы «здание-основание» хранилища ядерных отходов АЭС // Строительство и реконструкция. 2017. №3 (71). С. 27-33.
11. Сапожников А.И., Григорьев С.М. Учет последовательности возведения зданий методом конечных элементов с поэтажным формированием расчетной модели // Строительная механика и расчет сооружений. 2010. № 1. С. 19-26.
12. Кабанцев О.В., Тамразян А.Г. Учет изменений расчетной схемы при анализе работы конструкции // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 5. С. 15-26.
13. Алмазов В.О., Климов А.Н. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния конструкций высотного здания // Вестник МГСУ. 2013. № 10. С. 102-109.
14. Нуждин Л.В., Михайлов В.С. Численное моделирование свайных фундаментов в расчетно-аналитическом комплексе SCAD Office // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2018. № 1. С. 5-18.

15. Нуждин М.Л., Пономарев А.Б. Расчетное обоснование усиления грунтового основания многоэтажного жилого дома в г. Новосибирске пакетным высоконапорным инъецированием // Проблемы строительного производства и управления недвижимостью. 2020. С. 261-266.

16. Михайлов В.С., Теплых А.В. Учет характерных особенностей различных моделей основания при расчете взаимного влияния зданий на больших фундаментах плит с использованием расчетно-аналитической системы SCAD Office // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений. 2016. С.133-134.

17. Королев К.В., Полянкин А.Г., Кузнецов А.А. Несущая способность свай на горизонтальную и моментную нагрузку и оптимальное проектирование свайных фундаментов // Транспортное строительство. № 3, 2013. С. 13-15.

18. Малышкин А.П., Есипов А.В., Бараняк А.И. Современный подход к проектированию высотных зданий в условиях плотной городской застройки // Вестник Московского государственного строительного университета. 2008. №2. С. 158-162.

19. Платонова С.В., Александрова Е.А. Моделирование системы «здание–основание» в расчетном программном комплексе ЛИРА–САПР с применением системы грунта // Проблемы строительного производства и управления недвижимостью. 2020. С. 267-274.

20. Ющубе С.В., Подшивалов И.И., Самарин Д.Г., Филиппович А.А., Шалгинов Р.В. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния фрагментов кладки наружных стен из керамического камня // Вестник ТГАСУ. 2017. № 1. С. 174-180.

21. Ющубе С.В., Подшивалов И.И., Филиппович А.А., Тряпицин А.Е. Моделирование напряженно-деформированного состояния кирпичного здания повышенной этажности на свайном фундаменте // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 4 (69). С. 72-77.

22. Ющубе С.В., Подшивалов И.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния свайного фундамента с плитным ростверком высотного здания с учетом недопогружения свай // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. №2. С. 145-161.

23. Кравченко В.С., Криксунов Э.З., Перельмутер М.А., Скорук Л.Н. SCAD Structure. Расчет оснований и фундаментов. Москва, 2006. 33 с.

24. Ковальчук О.А., Колесников А.В., Русанова Е.М. и др. Введение в программный комплекс ЛИРА 10.4. Москва: НИУ МГСУ, 2015. URL: <http://lira-soft.com/wiki/manuals> (дата обращения: 24.12.2020).

25. Brinkgreve R.B.J., Broere W., Abingdon E.A. PLAXIS 3D Foundation. Balkema, 2004. Vol. 1.

REFERENCES

1. Shashkin, V.A. Effekty vzaimodejstviya osnovanij i sooruzhenij [Effects of interaction between bases and structures]. *Urban Development and Geotechnical Construction*. 2012. No. 14. Pp. 141-167. (in Russian)

2. Shashkin A.G., Shashkin K.G. Vzaimodejstvie zdaniya i osnovaniya: metodika rascheta i prakticheskoe primeneniye pri proektirovanii [Interaction of building and

foundation: calculation method and practical application in design]. Saint-Petersburg, Stroyizdat. 2002. 48 p. (in Russian)

3. Ilyichev V.A., Mangushev R.A. Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenty i podzemnyye sooruzheniya [Reference book of geotechnics. Foundations, foundations and underground structures] Moscow, Publishing house ASV. 2014. 728 p. (in Russian)

4. Shashkin A.G., Ulitskiy V.M. Osnovy monitoringa mekhanicheskoy bezopasnosti sooruzhenij pri stroitel'stve i ekpluatacii [Fundamentals of monitoring the mechanical safety of structures during construction and operation], *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2017. No. 12. S. 6-14.5. Shulyat'ev O.A. Osnovaniya i fundamenty vysotnyh zdaniy [Foundations and foundations of high-rise buildings]. M., 2016. 392 p. (in Russian)

5. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Kuznetsov E.N., O sovremennyh problemah rascheta vysotnyh zdaniy iz monolitnogo zhelezobetona [On modern problems of calculating high-rise buildings from monolithic reinforced concrete]. *Vserossiyskaya (Mezhdunarodnaya) konferenciya. Beton i zhelezobeton – puti razvitiya. Nauchnye trudy konferencii v pyati knigah*. 2005; 1: 149-166 (in Russian)

6. Shulyat'ev O.A. Osnovaniya i fundamenty vysotnyh zdaniy [Foundations and foundations of high-rise buildings]. Moscow, 2016. 392 p. (in Russian)

7. Shulyat'ev O.A. Fundamenty vysotnyh zdaniy [Foundations of high-rise buildings] *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arhitektura*. 2014; 4: 202-244. (in Russian)

8. Shulyat'ev O.A. Geotekhnicheskie osobennosti proektirovaniya vysotnyh zdaniy v Moskve [Geotechnical features of the design of high-rise buildings in Moscow]. *Industrial and civil construction*. 2016; 10: 17-25. (in Russian)

9. Harichkin A.I., Bezvolev S.G., Shulyan'ev O.A. Shulyan'ev O.A. Prakticheskoe issledovanie kraevoy svai [Practical research of the edge pile]. *Coll. scientific works 75 years of NIIOSP them. N.M. Gersevanov*. 2006. 224-230. (in Russian)

10. Kolchunov V.I., Potapov V.V., Dmitrieva K.O. Raschetnyj analiz dlitel'nogo deformirovaniya sistemy «zdanie-osnovanie» hranilishcha yadernyh otdobov AES [Computational analysis of long-term deformation of the "building-foundation" system of the nuclear waste storage facility for nuclear power plants]. *Construction and reconstruction*. 2017; 3 (71): 27-33. (in Russian)

11. Sapozhnikov A.I., Grigor'shev S.M. Uchet posledovatel'nosti vozvedeniya zdaniy metodom konechnykh elementov s poetazhnym formirovaniem raschetnoj modeli [Accounting for the sequence of erection of buildings by the finite element method with floor-by-floor formation of the computational model]. *Structural mechanics and calculation of structures*. 2010; 1: 19-26. (in Russian)

12. Kabantsev O.V., Tamrazyan A.G. Uchet izmenenij raschetnoj skhemy pri analize raboty konstrukcii [Considering changes in the design scheme when analyzing the work of the structure]. *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*. 2014; 5: 15-26. (in Russian)

13. Almazov V.O., Klimov A.N. Eksperimental'noe issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstrukcij vysotnogo zdaniya [Experimental study of the stress-strain state of high-rise building structures]. *Vestnik MGSU*. 2013; 10: 102-109. (in Russian)

14. L.V. Nuzhdin, V.S. Mikhailov Chislennoe modelirovaniye svaynykh fundamentov v raschetno-analiticheskom komplekse SCAD Office [Numerical modeling of pile foundations in the computational and analytical complex SCAD Office]. *Vestnik PNIPU. Stroitelstvo i arhitektura*. 2018; 1: 5-18. (in Russian)

15. Nuzhdin M.L., Ponomarev A.B. Raschetnoe obosnovaniye usileniya gruntovogo osnovaniya mnogoetazhnogo zhilogo doma v g. Novosibirsk paketyim vysokonapornym inecirovaniem. Problemy stroitel'nogo proizvodstva i upravleniya nedvizhimostyu [Calculation substantiation of strengthening the soil base of a multi-storey residential building in Novosibirsk by high-pressure batch injection]. *Problems of construction production and real estate management*. 2020. 261-266. (in Russian)

16. Mikhailov V.S., Teplykh A.V. Uchet harakternykh osobennostey razlichnykh modelej osnovaniya pri raschete vzaimnogo vliyaniya zdaniy na bolshih fundamentnykh plitah s ispolzovaniem raschetno-analiticheskoy sistemy SCAD Office. VI Mezhdunarodnyy simpozium [Considering the characteristic features of various foundation models when calculating the mutual influence of buildings on large foundation slabs using the SCAD Office analytical system]. *Aktualnye problemy kompyuternogo modelirovaniya konstrukcij i sooruzhenij*. 2016. 133-134. (in Russian)

17. Korolev K.V., Polyankin A.G., Kuznetsov A.A. Nesushchaya sposobnost svay na gorizontalnuyu i momentnuyu nagruzku i optimalnoye proektirovaniye svaynykh fundamentov [Bearing capacity of piles for horizontal and moment loads and optimal design of pile foundations]. *Transport construction*. 2013; 3: 13-15. (in Russian)

18. Malyshev A.P., Esipov A.V., Baranyak A.I. Sovremennyy podhod k proektirovaniyu vysotnykh zdaniy v usloviyakh plotnoy gorodskoy zastroyki [A modern approach to the design of high-rise buildings in a dense urban development]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*. 2008; 2: 158-162. (in Russian)

19. Platonova S.V., Alexandrova E.A. Modelirovaniye sistemy «zдание-osnovaniye» v raschetnom programnom komplekse LIRA-SAPR s primeneniem sistemy grunt. Problemy stroitel'nogo proizvodstva i upravleniya nedvizhimostyu [Modeling of the "building-base" system in the LIRA-SAPR computational software package using the soil system]. *Problems of construction production and real estate management*. 2020. 267-274. (in Russian)

20. Yushchube S.V., Podshivalov I.I., Samarin D.G., Filippovich A.A., Shalginov R.V. Eksperimentalnoye issledovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya fragmentov kladki naruzhnykh sten iz keramicheskogo kamnya [Experimental study of the stress-strain state of fragments of the masonry of external walls made of ceramic stone]. *Vestnik TSUAB*. 2017; 1: 174-180. (in Russian)

21. Yushchube S.V., Podshivalov I.I., Filippovich A.A., Tryapitsin A.E. Modelirovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kirpichnogo zdaniya povyshennoj etazhnosti na svajnom fundamente [Modeling the stress-strain state of a brick building of increased number of storeys on a pile foundation]. *Bulletin of Civil Engineers*. 2018; 4 (69): 72-77. (in Russian)

22. Yushchube S.V., Podshivalov I.I. Modelirovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya svajnogo

fundamenta s plitnym rostverkom vysotnogo zdaniya s uchetoм nedopogruzheniya svaj [Modeling the stress-strain state of a pile foundation with a slab grillage of a high-rise building, considering the undershooting of piles]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2020; 22 (2): 145-161. (in Russian)

23. Kravchenko V.S., Kriksunov E.Z., Perelmuter M.A., Skoruk L.N. SCAD Structure. Raschet osnovaniy i fundamentov. Rukovodstvo polzovatelya [SCAD Structure. Calculation of bases and foundations]. Moscow. 2006. 33 p. (in Russian)

24. Kovalchuk O.A., Kolesnikov A.V., Rusanova E.M. and others. Vvedeniye v programmnyy kompleks LIRA 10.4. [Introduction to the LIRA software package 10.4.]. Moscow, NRU MGSU, 2015. (in Russian)

25. Brinkgreve R.B.J., Broere W., Abingdon E.A. PLAXIS 3D Foundation. Balkema, 2004; 1.1.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Podshivalov Ivan Ivanovich. Выбор направления и темы исследования. Руководство процессом разработки темы. Выбор метода исследований.

Журавлев Алексей Владимирович. Анализ состояния вопроса. Выполнение расчетов, чертежа, рисунков. Оформление статьи.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Podshivalov Ivan Ivanovich. Choice of direction and research topic. Leading the theme development process. Choice of research method;

Zhuravlev Alexey Vladimirovich. Analysis of the state of the issue. Performing calculations, drawing, drawings. Article design.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Podshivalov Ivan Ivanovich – канд. техн. наук, доц. кафедры оснований, фундаментов и испытания сооружений. Томский государственный архитектурно-строительный университет, ORCID 0000-0001-7103-322X (634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, e-mail: ivanpodchivalov@list.ru).

Журавлев Алексей Владимирович – специалист, соискатель кафедры оснований, фундаментов и испытания сооружений. Томский государственный архитектурно-строительный университет, ORCID 0000-0001-5689-7476 (634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, e-mail: zhuravlev.a400@yandex.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Podshivalov Ivan Ivanovich – cand. tech. Sciences, Associate Professor of the Department of Foundations, Foundations and Testing of Structures. Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, ORCID 0000-0001-7103-322X (Russia, 634003, Tomsk, Solyanaya sq., 2, e-mail: ivanpodchivalov@list.ru).

Zhuravlev Alexey Vladimirovich – specialist, applicant for the department of foundations, foundations and testing of structures Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, ORCID 0000-0001-5689-7476 (Russia, 634003, Tomsk, Solyanaya sq., 2, e-mail: zhuravlev.a400@yandex.ru).

УДК 69.001.5

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-764-776>

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕЛИТОВОГО ШЛАМА ДЛЯ УСТРОЙСТВА МОНОЛИТНЫХ СЛОЕВ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО РЕСАЙКЛИНГА

А.А. Лыткин¹, Г.Б. Старков², Е.Я. Вагнер²

¹ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
г. Омск, Россия;

²ООО «Стройсервис»
г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Приведены физико-механические свойства белитового (нефелинового) шлама – многотоннажного отхода глиноземного производства. Показана область его применения при строительстве, реконструкции и ремонте дорог и аэродромов.

Материалы и методы. Приведены данные теоретических и лабораторных исследований по использованию молотого нефелинового шлама в качестве вяжущего для укрепления асфальтового гранулята, в том числе при отрицательных температурах, без противоморозных добавок. Определены оптимальные дозировки тонкомолотого шлама для укрепления асфальтового гранулята 10–15%.

Результаты. Результаты экспериментальных исследований подтверждены в ходе производственной проверки при строительстве опытного участка основания из шламогранулобетона. Определено направление дальнейших исследований.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: асфальтовый гранулят, белитовый шлам, шламогранулобетон, медленнотвердеющее вяжущее, монолитное основание, зимняя технология.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 16.12.20, принята к публикации 25.12.2020.

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: А.А. Лыткин, Г.Б. Старков, Е.Я. Вагнер. Исследование эффективности использования белитового шлама для устройства монолитных слоев дорожных одежд методом холодного ресайклинга. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-764-776>

© Лыткин А.А., Старков Г.Б., Вагнер Е.Я.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-764-776>

RESEARCH OF THE EFFICIENCY OF THE USE OF BELITE SLUDGE FOR THE DEVICE OF MONOLITHIC LAYERS OF ROAD CLOTHES BY THE METHOD OF COLD RECYCLING

Alexander A. Lytkin¹, Gleb B. Starkov², Evgeniy Ya. Wagner²

¹Siberian State Automobile and Highway University,
Automobile and Highway University (SibADI),
Russia, Omsk;

²ООО «Stroyservice»
Omsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. The physical and mechanical properties of belite (nepheline) sludge, a large-tonnage waste of alumina production, are given. The scope of its application is shown in the construction, reconstruction and repair of roads and airfields.

Materials and methods. The data of theoretical and laboratory studies on the use of ground nepheline sludge as a binder for strengthening asphalt granulate, including at low temperatures, without antifreeze additives. The optimal dosages of finely ground sludge for strengthening asphalt granulate 10–15% have been determined.

Results. The results of the experimental studies were confirmed during the production check during the construction of the pilot section of the foundation made of sludge granulometric concrete. The direction of further research is determined.

KEYWORDS: asphalt granulate, belite sludge, slurry granuloconcrete, slow-hardening binder, monolithic base, winter technology.

Submitted 16.12.20, revised 25.12.2020.

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: Alexander A. Lytkin, Gleb B. Starkov, Evgeniy Ya. Wagner. Research of the efficiency of the use of belite sludge for the device of monolithic layers of road clothes by the method of cold recycling. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-764-776>

© Lytkin A.A., Starkov G.B., Wagner E.Y.



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

ВВЕДЕНИЕ

Основу дорожной сети России образуют автомобильные дороги с жесткими дорожными одеждами, имеющими асфальтобетонные покрытия. Постоянно возрастающая интенсивность движения на автомобильных дорогах общего пользования, а также значительное повышение нагрузок на ось требует увеличения несущей способности дорожных одежд. Следует отметить, что в настоящее время несколько завышена роль пакета слоев из асфальтобетона в обеспечении несущей способности и долговечности конструктивов автомобильных дорог. В виду стереотипности мышления заказчиков и проектировщиков при составлении проектов предпочтение, как правило, отдается традиционным технологиям ремонта, включающим в себя предварительное фрезерование старого покрытия с последующим устройством слоев из асфальтобетонных смесей. Однако наиболее ответственным конструктивным слоем является в большей мере несущее основание. При этом основания из материалов, укрепленных вяжущими, не только прочны и долговечны, но и экономичны, поскольку открывают возможность использовать взамен дорогостоящих привозных каменных материалов местные грунты, некондиционные каменные материалы и промышленные отходы.

Важнейшей задачей, стоящей перед дорожной отраслью России, является повышение сроков службы жестких дорожных одежд до 24 лет. Для решения этой задачи необходимо повышать качество строительства и содержания автомобильных дорог, а также шире применять новые, более эффективные конструкции, материалы и технологии.

В настоящее время в дорожной отрасли все шире применяются технологии, основанные на последних достижениях науки и техники и отвечающие последним требованиям в обеспечении заданной долговечности автомобильных дорог в условиях возрастания интенсивности и грузонапряженности дорожного движения. Эффективной технологией восстановления слоев оснований и усиления жестких дорожных одежд в сравнении с традиционными методами является «Метод холодной регенерации» (ресайклинг) [1, 2, 3, 4]. Данная технология предусматривает выполнение регенерации старых слоев покрытия или основания с максимальным использованием материала старого асфальтобетона как основного компонента нового. В этом случае

специальные машины – ресайклеры – с помощью холодных фрез измельчают материал существующего покрытия, превращая его в асфальтобетонный гранулят, с последующим перемешиванием его с вяжущим и послойным распределением. При этом различают холодный ресайклинг (ХР) без стабилизации гранулята вяжущими и со стабилизацией цементом, битумом, битумной эмульсией и др.

При ХР достигается значительная экономия кондиционных дорожно-строительных материалов и исключаются затраты на утилизацию материала старого покрытия. Кроме того, разрушение старого покрытия позволяет ликвидировать источник возникновения отраженных трещин на новом покрытии. Укрепление асфальтового гранулята с добавлением или без добавления щебеночной составляющей обеспечивает усиление дорожной одежды за счет получения дополнительного однородного, монолитного слоя основания из асфальтогранулобетона. При сохранении той же толщины основания общий модуль упругости дорожной одежды повышается в 1,5–2 раза, что обеспечивает значительное увеличение ресурса дорожной одежды по критерию упругого прогиба (в виде суммарного числа приложений расчетной нагрузки до наступления состояния отказа) и пропорционально увеличивает срок службы дороги между капитальными ремонтами. С учетом того, что срок службы жестких дорожных одежд с монолитными основаниями также в 1,5–2,0 раза больше, чем с основаниями из дискретных материалов, при высокой интенсивности движения предпочтение следует отдавать ресайклингу со стабилизацией асфальтового гранулята [5, 6].

Перечисленные преимущества делают ХР наиболее привлекательной технологией для восстановления жестких дорожных одежд по критерию «стоимость/эффективность». По некоторым приблизительным оценкам, экономия может составить 20–30%, причем чем выше интенсивность движения по ремонтируемой дороге, тем выше экономический эффект данного метода [3].

Но следует отметить, что, например, метод укрепления гранулята цементом не лишен недостатков. Во-первых, цемент представляет собой дорогой материал. Во-вторых, вследствие того, что цемент является высокоактивным быстросхватывающимся и быстротвердеющим вяжущим, технологические операции по устройству конструктивных слоев с его применением должны быть выполнены в очень сжатые сроки (не более двух часов

между приготовлением смеси и окончанием её уплотнения). В-третьих, асфальтогранулобетон на основе цемента имеет излишне высокую жесткость, в результате чего в процессе эксплуатации в основании могут образовываться температурные трещины, которые неизбежно отражаются в вышележащих асфальтобетонных слоях. Кроме того, устройство монолитных оснований и покрытий из асфальтогранулобетона с применением вяжущих допускается при температурах воздуха не ниже 10°C [4]. Сезонный характер устройства таких оснований существенно сдерживает темпы ремонта дорог.

Вопрос продления строительного сезона по устройству монолитных конструктивных слоев с использованием технологии холодного ресайклинга является весьма актуальным. Имеется определенный опыт ХР при низких положительных и отрицательных температурах воздуха с применением противоморозных добавок [7]. Но введение добавок сопряжено с дополнительным удорожанием и не гарантирует качественное выполнение работ из-за непредсказуемости изменения температуры воздуха.

В настоящее время детально исследованы и опробованы на практике методы устройства слоев дорожных одежд при отрицательных температурах воздуха из цементобетонных смесей и грунтов, укрепленных цементом [8, 9, 10]. Принцип реализации этих методов заключается в создании благоприятных тепловлажностных условий для набора материалом критической прочности, после достижения которой он может быть заморожен. Это осуществляется путем применения специальных мер: введением в смеси противоморозных добавок, утеплением уложенных слоев теплоизоляционными материалами, электропрогревом и т. д. Указанные методы не нашли достаточно широкого внедрения в дорожной отрасли, так как они энергоемки, низкопроизводительны, значительно удорожают и усложняют работы [10].

В 60-х годах прошлого столетия была предложена технология устройства цементобетонных оснований способом раннего замораживания [11]. Принципиальное отличие этого способа от традиционных заключается в том, что не создаются условия для набора бетоном критической прочности, а смесь укладывается на мерзлый подстилающий слой и замораживается до начала схватывания цемента, то есть до образования в материале жестких кристаллических связей. Однако проверочные

исследования, проведенные НИИЖБ, показали, что в производственных условиях осуществить такую технологию без потерь прочности и морозостойкости бетона невозможно, так как материал не успевает замерзнуть до начала схватывания цемента [12]. Для предотвращения потери прочности бетона необходимо повторное вибрирование смеси после ее оттаивания [13]. Качественное вибрирование бетона выполнить очень сложно, так как оттаивание его происходит тоже медленно и после оттаивания он никогда не бывает по всему сечению слоя в пластическом состоянии. Кроме того, эти мероприятия сопряжены с дополнительными энергозатратами и существенно снижают темпы строительства.

Следовательно, для эффективного использования способа раннего замораживания необходимо значительно удлинить сроки схватывания и твердения материала, чтобы дать ему возможность полностью замерзнуть и оттаивать до потери пластических свойств, то есть до начала кристаллообразования. Осуществить это можно, заменив портландцемент медленнотвердеющими бесклинкерными вяжущими, не имеющими ярко выраженного срока схватывания: сланцевые золы уноса, активированные известью; тонкомолотые фосфорные шлаки, активированные известью или цементной пылью; белитовые шламы [14, 15]. Кроме того, у медленнотвердеющих вяжущих тиксотропная коагуляционная структура сохраняется в течение более длительного времени по сравнению с портландцементом. Это позволяет облегчить соблюдение требуемых технологических параметров при производстве работ в ранние сроки твердения материала. Свежеуложенный слой дорожной одежды из смеси на основе медленнотвердеющего вяжущего будет обладать повышенной ремонтпригодностью в процессе укладки и уплотнения.

Особый интерес для Сибири представляет натуральный белитовый шлам – многотоннажный отход глиноземного производства, который без дополнительной переработки за счет высокого содержания белита (C2S) обладает свойствами грубодисперсного, медленнотвердеющего вяжущего [16].

СВОЙСТВА БЕЛИТОВОГО ШЛАМА

Белитовый шлам образуется при производстве глинозема – оксида алюминия из нефелиновых и бокситовых руд способом спекания. В процессе высокотемпературного обжига руды с известняком на глиноземных предприятиях окись кальция и содержащийся в руде крем-

незем вступают в соединение и образуют в основном частично гидратированный β – двухкальциевый силикат (белит), представляющий собой один из основных компонентов портландцементного клинкера. Из продукта спекания путем гидротермального выщелачивания выделяют глинозем, а белит, практически полностью оставаясь в шламе, в виде пескообразного отхода поступает в отвал [17]. В зависимости от перерабатываемой руды белитовый шлак подразделяют на нефелиновый и бокситовый.

Невостребованные запасы этого отхода на шламоотвалах предприятий алюминиевой промышленности России составляют сотни миллионов тонн. На сегодняшний день только на Ачинском глиноземном комбинате (АО «РУСАЛ Ачинск») общий объем нефелинового шлака составляет 220 млн т при ежегодном поступлении 6–7 млн т в год. При этом использование нефелинового шлака в качестве вторичного материального ресурса не превышает 200–300 тыс. т в год.

На основании заключения ФГУ «ЦЭКА» по определению класса опасности отходов ОАО «РУСАЛ Ачинск» расчетным методом нефелиновый шлак отнесен к 5-му классу опасности (неопасные отходы). 5-й класс опасности

шлама подтвержден также аккредитованной лабораторией АНО «Экспертно-аналитический центр по проблемам окружающей среды «ЭКОТЕРРА». Проведенные исследования показали, что нефелиновый шлак нерадиоактивен, не содержит вредных токсичных соединений, удельная активность естественных радионуклидов, содержащихся в шламе, не превышает гигиенический норматив, установленный для отходов промышленного производства, и, соответственно, равна 66,9 Бк/кг при нормативе 370 Бк/кг [18].

По фазовому составу нефелиновый шлак представляет в основном смесь силикатов, гидросиликатов (20–30%) и гидроалюминатов кальция (3–5%), гидроферритов, карбонатов. Кроме того, в виде единичных зерен отмечаются нефелин, кварц, полевые шпаты, слюда и стекловидные частицы. Содержание белита в нефелиновом шламе составляет 70–85%. Следовательно, шлак является полимерным материалом, в котором четко фиксируется преобладающее наличие белита полиаморфной формы - β , сцементированного массой гидратов [19].

Физико-механические свойства шлама представлены в таблице 1.

Таблица 1
Физико-механические свойства нефелинового шлама текущего производства

Table 1
Physical and mechanical properties of nepheline sludge of current production

Наименование свойств	Показатели
Модуль крупности	1,2–1,7
Истинная плотность	2,91–3,04 г/см ³
Насыпная плотность во влажном состоянии, кг/м ³	900–1100
Удельная площадь поверхности	300–750 см ² /г
Микропористость	35–60% при размере пор от 10 до 1000 мкм.
Коэффициент теплопроводности при стандартной плотности, Вт/(м·К)	0,57–0,66
Оптимальная влажность, %	23–26
Средняя плотность в уплотненном состоянии при оптимальной влажности под нагрузкой 15 МПа, т/м ³	1,8–1,85
Предел прочности на сжатие, МПа: - сразу после уплотнения под нагрузкой 15 МПа; - через 90 сут; - через 1 г.	1,0–1,2 4,0–6,0 9,0–10,0
Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа: - через 90 сут; - через 1 г.	1,6–2,4 2,6–3,0

Приведенные данные свидетельствуют о том, что нефелиновый шлам в рядовом виде (без дополнительного измельчения), уплотненный при оптимальной влажности (22–26%) по показателям прочности, при нормативном сроке твердения для медленноотвердеющих вяжущих 90 сут, соответствует маркам от М40 до М60 [20, 21, 22]. При этом сохраняется тенденция к дальнейшему набору прочности за счет большого резерва негидратированного вяжущего [17, 22].

Исследования показали, что шлам текущего производства обладает рядом уникальных специфических свойств:

- имеет пониженную температуру начала замерзания (минус 2°C) и хорошую уплотняемость в интервале отрицательных температур (минус 3 – минус 7°C), так как в его составе содержится около 2% свободных щелочных соединений;

- сохраняет в конструктивном слое требуемую плотность, влажность и вяжущие свойства после замораживания на стадии формирования коагуляционной структуры;

- длительное время не утрачивает вяжущие свойства при хранении в штабелях на открытом воздухе за счет высокого содержания белила;

- затвердевший шлам способен восстанавливать разрушенную структуру после повторного уплотнения, то есть обладает тиксотропными свойствами;

- длительное время сохраняет удобоукладываемость, без противоморозных добавок, в технологическом процессе по устройству конструктивных слоев при отрицательных температурах воздуха;

- обладает способностью без введения противоморозных добавок в уплотненном состоянии твердеть при отрицательных температурах¹ [21, 23, 24].

На основании многолетних научных исследований и производственного внедрения были разработаны методические рекомендации по строительству конструктивных слоев дорожных и аэродромных одежд из рядового (натурального) белитового шлама и шламоминеральных материалов, в том числе при отрицательных, до минус 20°C температурах воз-

духа^{1,2} [27]. По разработанным рекомендациям с применением белитового шлама построены сотни километров дорог общего пользования I–IV категорий и нефтепромысловых дорог в I, II, III и IV дорожно-климатических зонах, на всех типах местности по условиям увлажнения.

Однако следует отметить, что исследования по использованию рядового и молотого шлама для укрепления асфальтового гранулята при ремонте и строительстве дорог, в том числе при отрицательных температурах, не выполнялись. Исследование возможности использования нефелинового шлама АО «РУСАЛ Ачинск» в качестве вяжущего при укреплении асфальтового гранулята в Восточной и Западной Сибири является актуальной научной и практической задачей.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Цель исследований: изучение эффективности использования нефелинового шлама для укрепления асфальтового гранулята, в том числе при отрицательных температурах воздуха.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие научные и практические задачи:

1. На основе анализа результатов многолетних исследований по использованию нефелинового шлама АГК дать теоретическое обоснование применения этого материала в качестве вяжущего для укрепления асфальтового гранулята, в том числе в зимний период.

2. Изучить кинетику твердения асфальтового гранулята, укрепленного шламом (шламогранулобетона) при различных температурных режимах, и его физико-механические свойства.

3. Проверить разработанные технические решения в опытном строительстве.

Теоретическими предпосылками к положительному эффекту применения шлама при реализации данной технологии являются: пониженная температура его смерзания; способность не утрачивать гидравлическую активность и твердеть при отрицательных температурах; отсутствие сроков начала и конца схватывания. Кроме того, следует ожи-

¹ Методические рекомендации по укреплению грунтов и других материалов медленноотвердеющими вяжущими при пониженных положительных и отрицательных температурах // Минтрансстрой СССР, 1985. 33 с.

² Методические рекомендации по устройству дорожных оснований и переходных покрытий с применением белитового шлама в нефтегазоносных районах Западной Сибири // Минтрансстрой СССР. 1986. 28 с.

дать повышения вяжущих свойств шлама из-за увеличения его удельной поверхности и углубления процессов гидратации в результате дополнительного разрушения зерен шлама и обновления их активных поверхностей при перемешивании смеси в барабане ресайклера. В пользу положительного эффекта свидетельствует также многолетний положительный опыт внедрения зимней технологии устройства шламоминеральных слоев дорожных одежд^{1,2} [21, 22, 25, 26].

Белитовый шлам отличается от традиционных дорожно-строительных материалов повышенной эффективностью, так как в нем благоприятно сочетаются конструктивные, физико-механические и технологические свойства, что обеспечивает материалу высокую конкурентоспособность при принятии проектных решений.

С учетом специфических, уникальных свойств белитовых шламов в 2018 году в г. Омске на базе дорожно-строительной организации ООО «Стройсервис», совместно с ФГБОУ ВО «СибАДИ» были выполнены исследования по применению нефелинового АО «РУСАЛ Ачинск» в качестве минерального вяжущего при укреплении асфальтового гранулята по технологии холодного ресайклинга. Нефелиновый шлам в количестве 60 т доставлялся из г. Ачинска в г. Омск железнодорожным транспортом.

МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью повышения активности шлама было принято решение произвести его помол. Шлам предварительно распределили на площадке с твердым покрытием слоем толщиной 30 см и высушили до воздушно-сухого состояния с помощью разогревателя горячего ремиксера Heizmasine HM 4500. Помол осуществ-

ляли на валковой мельнице по производству минерального порошка М 138.

Перед подготовкой асфальтогранулята для изготовления лабораторных образцов из него предварительно отсеивали крупные частицы через сито с отверстиями круглой конфигурации диаметром 40 мм.

Для изучения кинетики твердения шламогранулобетона из асфальтового гранулята, укрепленного молотым шламом, изготавливались цилиндрические образцы диаметром 71,4 мм прессованием под давлением 7 МПа, по стандартной методике в соответствии с методическими рекомендациями Росавтодора [4]. Зерновой состав молотого шлама представлен в таблице 2.

Серии образцов отличались дозировкой молотого шлама 10% и 15% и условиями их хранения.

Образцы хранили при следующих температурных режимах: в нормальных условиях в климатической камере при температуре $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ и в естественных условиях (на открытом воздухе) в ящике с песком, для моделирования температурного режима твердения шламогранулобетона в основании дорожной одежды. Образцы, предназначенные для твердения в естественных условиях, выносили на открытый воздух (сразу после изготовления) в середине октября 2018 г.

Испытания образцов осуществляли в возрасте 7, 28, 90, 180 и 360 сут. Перед испытанием образцы высушивали до постоянного веса. Испытывали по 3 образца каждой серии для определения предела прочности на сжатие при температурах 20°C и 50°C .

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты лабораторных исследований представлены на рисунках 1 и 2.

Таблица 2
Зерновой состав молотого шлама

Table 2
Grain composition of ground sludge

Наименование материала	Размер зерен, мм, мельче					
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071
Молотый шлам	97,2	93,3	76,8	48,2	15,7	7,7

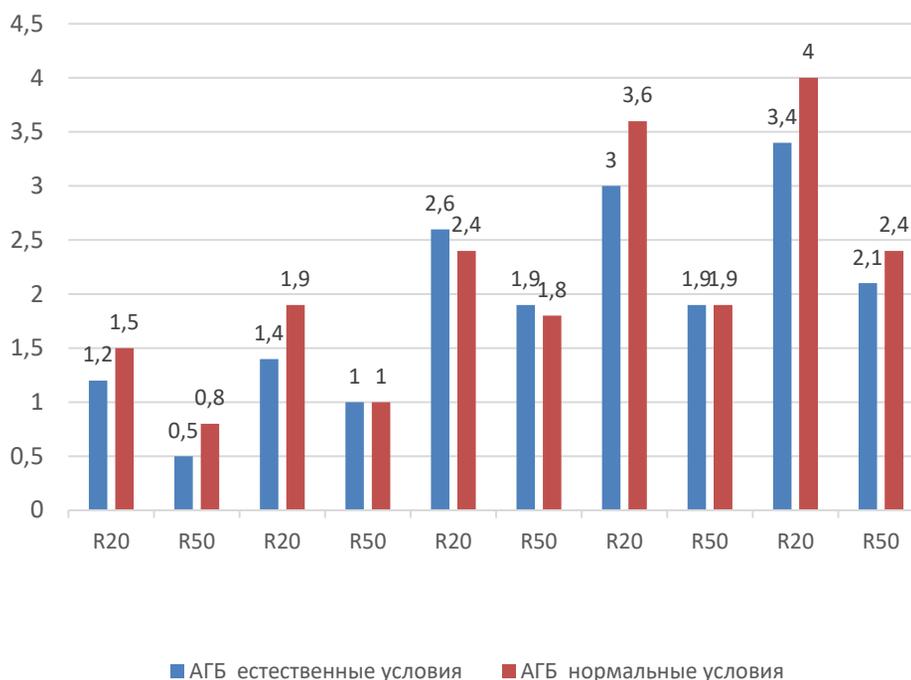


Рисунок 1 – Изменение прочности шламогранулобетона с 10% молотого шлама при температурах 20 °C (R20) и 50 °C (R50) во времени
 Figure 1 – Change in the strength of slurry granulocrete with 10% ground sludge at temperatures of 20 °C (R20) and 50 °C (R50) over time

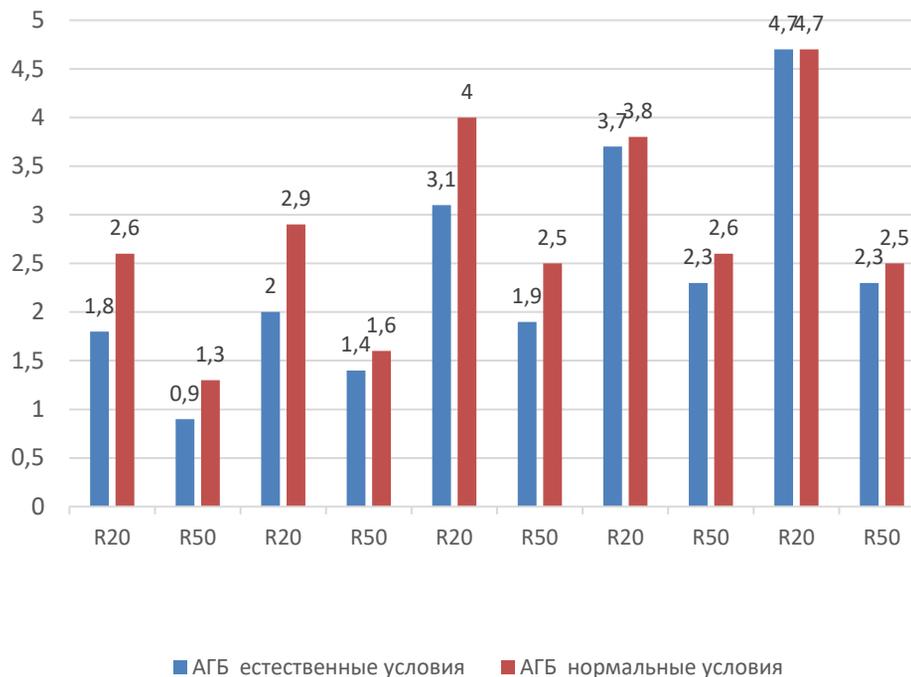


Рисунок 2 – Изменение прочности шламогранулобетона с 15% молотого шлама при температурах 20 °C (R20) и 50 °C (R50) во времени (сутки)
 Figure 2 – Change in the strength of slurry granulocrete with 15% ground sludge at temperatures of 20 °C (R20) and 50 °C (R50) over time (day)

Результаты испытания образцов на сжатие при температуре 20 °С показали, что даже в возрасте 7 сут при хранении как в нормальных, так и в естественных условиях, при дозировке шлама 15%, шламогранулобетон набрал прочность, соответствующую нормативным требованиям $R_{20} = 2,6$ МПа (норматив – не менее 2,0 МПа) [4].

После 28 сут твердения и при 10% дозировки вяжущего материал достиг нормативного минимума, а при 15% показатели значительно выше – 2,9 МПа. В нормативном для материалов, укрепленных медленнотвердеющими вяжущими в возрасте 90 сут, R_{20} составила 2,4 МПа и 4,0 МПа при дозировках шлама 10% и 15% соответственно. При хранении образцов как в нормальных, так и естественных условиях в течение 180 и 360 сут также наблюдается устойчивый рост прочностных показателей (см. рисунки 1, 2).

Показатели R_{50} в возрасте 7 сут 0,76–1,26 МПа также соответствуют нормативным требованиям (0,8 МПа для дорог I–II и 0,7 МПа для III категорий) и продолжают увеличиваться в процессе времени [4].

Анализ кинетики твердения шламогранулобетона в естественных условиях, в том числе при отрицательных температурах (с октября по апрель), свидетельствует о том, что процессы структурообразования в материале продолжаются и в зимний период. Так, если после 7 сут хранения в естественных условиях (октябрь) R_{20} соответствовало 2,0 МПа, через 90 сут (январь) $R_{20} = 3,0$ МПа, а в апреле через 180 сут твердения $R_{20} = 3,7$ МПа. У контрольных $R_{20} = 4,44$ МПа. За летний период (с апреля по октябрь) процессы структурообразования в материалах образцов, хранящихся в естественных условиях, интенсифицировались и при испытании образцов в октябре в возрасте 360 сут R_{20} составили 4,7 МПа, что соответствовало прочности контрольных образцов $R_{20} = 4,7$ МПа.

Результаты проведенных исследований хорошо согласуются с ранее выполненными работами по изучению процессов структурообразования в шламах и шламоминеральных материалах при отрицательных температурах воздуха [22, 24]. Выполненные в этих работах термографические и электронномикроскопические исследования свидетельствуют, что в зимний период процессы гидратации в шламе не прекращаются, а происходит накопление гелевидных новообразований. Морфология затвердевшей массы в образцах из нефелинового шлама характеризуется наличием иголь-

чатых и тонкопластинчатых гидросиликатов типа тобермарита и других C-S-H. Отмечено, что при твердении в естественных условиях гелевидной фазы значительно больше, чем в образцах, твердевших в нормальных условиях. Кроме того, эти новообразования характеризуются более высокой удельной поверхностью и степенью переплетения. О накоплении гелевидных новообразований свидетельствовали также результаты термографических исследований. Этот факт объясняет интенсивный набор прочности шламогранулобетона с наступлением положительных температур и способность шлама сохранять вяжущие свойства после морозного воздействия.

Следовательно, работы по устройству монолитных оснований (покрытий) из асфальтового гранулята, укрепленного тонкомолотым нефелиновым шламом, можно выполнять без противоморозных добавок, при пониженных температурах воздуха, что способствует значительному продлению строительного сезона. Как отмечалось, устройство монолитных оснований и покрытий из асфальтогранулобетона с применением традиционных вяжущих допускается при температурах воздуха не ниже 10 °С [4].

Следует отметить, что для снижения дозировки шлама при укреплении асфальтового гранулята и повышения эффективности использования шлама, при значительном удалении объектов от шламоотвала (г. Ачинск), целесообразно активировать шлам цементом, известью, минеральным порошком, цементной пылью, гипсом, золой сухого отбора и т.п. [27]. Кроме этого, необходимо повысить тонкость помола шлама с целью повышения его активности за счет увеличения удельной поверхности.

ОПЫТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Строительство опытного участка выполняли в III дорожно-климатической зоне на территории г. Омска (пр. Губкина) силами дорожно-строительной организации ООО «Стройсервис» в сентябре 2018 г.

Опытный участок состоял из двух секций, каждая площадью 300 м². Секции отличались дозировкой шлама в шламогранулобетоне: 10% и 15% (аналогично дозировкам в лабораторных исследованиях). Для выполнения холодного ресайклинга использовался ресайклер WR 4200 в комплексе с суспензатом WM 1000 и ёмкостью для воды 30 м³. Толщина регенерированного слоя составляла 20 см.

После прохода ресайклера смесь уплотняли отрядом катков – грунтовый HAMM 3516 массой 14 т за 8 проходов по одному следу, из них 4 с вибрацией, и пневмоколесный HAMM GRW 280-10 массой 10 т за 6 проходов в статическом режиме. После уплотнения по основанию осуществлялся проезд транспорта с ограничением его скорости до 30 км/час.

Через 3 сут основание из шламогранулобетона перекрыли двумя слоями асфальтобетона общей толщиной 9 см.

В процессе опытного строительства выполнялся входной, операционный и приемочный контроль качества в соответствии с нормативными требованиями [4].

Никаких технологических сложностей, связанных с заменой цемента на тонкомолотый шлам, во время опытного строительства выявлено не было.

В сентябре 2019 г. и октябре 2020 г. опытный участок был детально обследован. Обследование выполняли по стандартной методике [27]. Визуальная и инструментальная оценка состояния асфальтобетонного покрытия показала, что покрытие по показателям ровности отвечает нормативным требованиям.

Ежегодно из каждой секции опытного участка отбирались по 3 керна дорожной одежды. Установлен факт хорошего сцепления между слоем основания и покрытия. Материал сформировался в монолит. Керны из регенерированного слоя испытали в испытательной лаборатории ООО «Стройсервис» по стандартной методике для асфальтогранулобетона в соответствии с требованиями ГОСТ 12801.

Результаты испытания кернов шламогранулобетона из опытного участка представлены в таблице 3.

Анализ данных, представленных в таблице 3, свидетельствует о повышении прочности

шламогранулобетона во времени, что подтверждает правильность выводов по результатам теоретических и лабораторных исследований.

С учетом того, что шлам относится к медленнотвердеющим вяжущим за счет высокого содержания белита (70–85%), следует ожидать дальнейшего набора прочности основания из шламогранулобетона на протяжении многих лет. Это является характерной особенностью медленнотвердеющих вяжущих.

Многолетний опыт использования белитовых шламов в дорожном и аэродромном строительстве показал, что предел прочности на сжатие даже рядового шлама и шламо-минеральных материалов, отобранных с участков эксплуатируемых дорог, составляет 7,5–14,5 МПа. При этом с годами отмечается тенденция к постоянному медленному набору прочности. Например, модуль упругости основания из рядового белитового шлама, построенного в Омской области в зимний период на автомобильной дороге «Подъезд к заводу костной муки», через 33 года эксплуатации увеличился в 2,9 раза [22].

Следовательно, с повышением интенсивности движения с годами будет также расти прочность шламогранулобетона в основании, что при условии качественного состояния покрытия обеспечит долговечность дорожной конструкции в целом.

С целью рационального конструирования дорожных одежд Омским Союздорнии под руководством канд. техн. наук Б. В. Белоусова разработаны «Методические рекомендации по применению в слоях дорожных одежд натуральных белитовых шламов» ОДМ 218.3.043–2015, в которых впервые введено понятие «коэффициент самоупрочнения» [25].

Таблица 3
Физико-механические свойства образцов-кернов шламогранулобетона, отобранных с опытного участка

Table 3
Physico-mechanical properties of samples of cores shlamohranilishcha, selected pilot area

Время отбора и испытания образцов	Прочность образцов-кернов, МПа, при содержании молотого шлама, %	
	10	15
05.09.2019 г.	2,1	2,3
03.10.2020 г.	2,7	3,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлена принципиальная возможность и целесообразность использования тонкомолотого нефелинового шлама АО «РУСАЛ Ачинск» в качестве вяжущего для укрепления асфальтового гранулята по технологии холодный ресайклинг, в том числе при низких, до 0°C, температурах воздуха без введения специальных противоморозных добавок.

Подтверждена способность тонкомолотого нефелинового шлама сохранять активность после замораживания на стадии формирования коагуляционной структуры и установлена способность шламогранулобетона к твердению при отрицательных температурах.

Установлена оптимальная дозировка молотого нефелинового шлама для укрепления асфальтового гранулята 10–15%.

Время на выполнение технологических операций по уплотнению основания и устройству слоя покрытия не регламентируется. После уплотнения по основанию допускается проезд транспортных средств с регулированием движения по всей ширине слоя и ограничением скорости до 30 км/ч, что способствует повышению темпов строительства.

Правильность разработанных технических решений подтверждена путем строительства и обследования опытного участка.

Широкое применение белитового шлама позволит значительно продлить дорожно-строительный сезон, сократить дефицит каменных материалов и традиционных вяжущих, снизить материалоемкость дорожных одежд, повысить их несущую способность и долговечность, а также решить ряд экологических проблем.

Направление дальнейших исследований:

- разработка рациональной схемы поставки нефелинового шлама, в том числе в Омскую область;

- разработка составов безобжиговых медленнотвердеющих вяжущих (двух-трех-компонентных), на основе отходов промышленности и организация их производства;

- разработка технологии холодного ресайклинга асфальтобетонных покрытий с заменой традиционных вяжущих на рядовой белитовый шлак и специально приготовленные медленнотвердеющие шламоминеральные вяжущие, в том числе при отрицательных температурах воздуха;

- разработка технологии строительства оснований из грунтов, укрепленных шламом и шламоминеральными вяжущими, в том числе в зимний период;

- разработка нормативного документа, регламентирующего применение рядового шлама и медленнотвердеющих шламоминеральных вяжущих при восстановлении слоев оснований методом холодной регенерации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ARRA. Guidelines for the disposal of waste in a cold state // Association for the processing and disposal of asphalt. 2001. 176 p.

2. Milton L.J., Earland M. Design Guide and Specification for Structural Maintenance of Pavements by Cold Processing In Place // Transport Research Laboratory. 1999. 79 p.

3. Бахрах Г.С. Перспектива развития ремонта дорожных одежд нежесткого типа методом холодной регенерации // 70 лет отраслевой дорожной науке. 1996. С. 77-86.

4. Восстановление асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог способами холодной регенерации. Москва, Росавтодор, 2002. 25 с.

5. Бируля А.К. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд автомобильных дорог. Москва, Транспорт. 1964. 168 с.

6. Безрук В.М. Укрепление грунтов в дорожном и аэродромном строительстве. Москва, Транспорт, 1971. 247 с.

7. Руднев Д.Г., Лыткин А.А. Исследование технологии устройства монолитных оснований при низких положительных и отрицательных температурах воздуха методом холодного ресайклинга // Молодой ученый. 2016. №12. С. 370-372. URL: <https://moluch.ru/archive/116/31793/> (дата обращения: 25.03.2020).

8. Миронов С.А. Теория и методы зимнего бетонирования. Москва, Стройиздат. 1975. 700 с.

9. Могилевич В.М., Щербакова Р.П., Тюменцева О.В. Дорожные одежды из цементогрунта. Москва, Транспорт. 1973. 213 с.

10. Доклады от СССР XIY Международному конгрессу. Москва, Транспорт. 1973. 180 с.

11. Хигерович М.И., Муштаева Н.Е., Карасев М.С. Устройство бетонного покрытия способом раннего замораживания // Автомобильные дороги. 1969. № 9. С. 4-5.

12. Крылов Б.А., Иванова О.С., Сергеев К.И. [и др.]. Свойства бетона, замороженного в раннем возрасте // Автомобильные дороги. 1972. № 11. С. 14-16.

13. Миронов С.А., Глазырина Е.Г. Влияние раннего замораживания на прочностные и деформативные характеристики бетона // Зимнее бетонирование и тепловая обработка бетона. 1975. 125 с.

14. Белоусов Б.В., Асматулаев Б.А. Твердение шлаковых вяжущих на морозе // Строительство и эксплуатация дорог в условиях Сибири. 1978. С. 102-109.

15. Пополов А.С. Опыт применения гранулированных шлаков в дорожном строительстве Франции // Экспресс-информация. Автомобильные дороги. Зарубежный опыт // ЦНТИ Минавтодора РСФСР. 1984. № 10. С. 1-13.

16. Боженев П.И., Березина С.Т. Промышленное использование шлама глиноземного производства // Труды У Всесоюзного совещания по химии и технологии цемента. 1982.

17. Логинова И.В., Кырчиков А.В. Аппаратурно-технологические схемы в производстве глинозема. Екатеринбург, Урфу, 2011. 233 с.

18. Шепелев И.И., Стыглиц И.С., Еськова Е.Н., Жижаев А.М. Исследование химических и токсичных свойств нефелиновых шламов для использования в сельском хозяйстве // Вестник КрасГАУ. 2016. № 2. С. 13-18.

19. Шморгуненко Н.С., Корнеев В.И. Комплексная переработка и использование отвальных шламов глиноземного производства. Москва, Металлургия, 1982. 128 с.

20. Проектирование нежестких дорожных одежд: ОДН 218. 046-01. Москва, Государственная служба дорожного хозяйства Министерства транспорта РФ, 2001. 145 с.

21. Лыткин А.А. Применение белитового шлама для устройства слоев дорожных одежд при отрицательных температурах. Москва, 1990. 18 с.

22. Белоусов Б.В, Гаврилов А.Н, Афонин А.С. Предложения по конструированию дорожных одежд с повышенным сроком службы // Мир дорог. 2016. 2 с.

23. 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 DOI: org/10.26518/2071-7296-2017-3(55)-125-132.

24. Lytkin, A.A. Study of the Transport Loads Influence on the Nature of Belite Sludge Hardening in Pavement // Materials Science Forum 992. 2020. 79-85.

25. Изыскания, проектирование и строительство автомобильных дорог в районах распространения вечной мерзлоты. Москва, Минтрансстрой, 1990. 271 с.

26. Бескровный В.М., Дежина Н.С., Лыткин А.А. Устройство щебеночного основания с обработкой нефелиновым шламом // Вопросы производства и применения местных каменных материалов из естественных горных пород и отходов промышленности при строительстве дорожных одежд. 1981. С. 62-68.

27. Бескровный В.М. Применение нефелинового шлама для строительства автомобильных дорог в условиях Сибири. Москва, 1984. 22 с.

REFERENCES

1. ARRA. Guidelines for the disposal of waste in a cold state. *Association for the processing and disposal of asphalt*. 2001. 176 p.

2. Milton L.J., Earland M. Design guide and specification for structural maintenance of road pavements by cold processing in place. *TRL report 386, Transport Research Laboratory*. 1999. 79 p.

3. Bakhrakh G.S. Perspektiva razvitija remonta dorozhnyh odezhd nezhestkogo tipa metodom holodnoj regeneracii [The future development of repair of

road pavement of non-rigid type by a method of cold regeneration]. *70 years of industrial road science: collection of scientific works*. 1996. 77-86. (in Russian)

4. Vosstanovleniju asfal'tobennyh pokrytij i osnovanij avtomobil'nyh dorog sposobami holodnoj regeneracii [The restoration of asfaltobetonyh coatings and bases of highways by way of cold regeneration]. Moscow, Rosavtodor, 2002. 25 p. (01.01 2019). (in Russian)

5. Birulya A. K. Konstruirovanie i raschet nezhestkih dorozhnyh odezhd avtomobil'nyh dorog [Design and calculation of non-rigid road surfaces of highways]. Moscow, Transport, 1964. 168 p. (in Russian)

6. Bezruk V.M. Ukreplenie gruntov v dorozhnom i ajerodromnom stroitel'stve [Strengthening of soils in road and airfield construction]. Moscow, Transport, 1971. 247 p. (in Russian)

7. Rudnev D.G., Lytkin A.A. Issledovanie tehnologij ustrojstva monolitnyh osnovanij pri nizkih polozhitel'nyh i otricatel'nyh temperaturah vozduha metodom holodnogo resajklinga [Investigation of the technology of the device of monolithic bases at low positive and negative air temperatures by the method of cold recycling]. 2016; 12: 370-372. URL: <https://moluch.ru/archive/116/31793> (date of reference: 25.03.2020) (in Russian)

8. Mironov S.A. Teorija i metody zimnego betonirovanija [Theory and methods of winter concreting]. Moscow, Stroyizdat. 1975. 700 p. (in Russian)

9. Mogilevich V.M., Shcherbakova R.P., Tyumentseva O.V. Dorozhnye odezhdy iz cementogrunta [Road clothes made of cement ground]. Moscow, Transport, 1973. 213 p. (in Russian)

10. Doklady ot SSSR HIY Mezhdunarodnomu kongressu [Reports from the USSR to the XIU International Congress]. Moscow, Transport. 1973. 180 p. (in Russian)

11. Higerovich M.I., Mushtayeva N.E., Karasev M.S. Ustrojstvo betonogo pokrytija sposobom rannego zamorazhivaniya [Device of concrete coating by the method of early freezing]. *Avtomobil'nye dorogi*. 1969; 9: 4-5. (in Russian)

12. Krylov B.A., Ivanova O.S., Sergeev K.I. [et al]. Svoystva betona, zamorozhennogo v rannem vozraste [Properties of concrete frozen at an early age]. *Automobile roads*. 1972; 11: 14-16. (in Russian)

13. Mironov S.A., Glazyrina E.G. Vlijanie rannego zamorazhivaniya na prochnostnye i deformativnye harakteristiki betona [Influence of early freezing on strength and deformative characteristics of concrete]. *Winter concreting and heat treatment of concrete*. 1975. 125 p. (in Russian)

14. Belousov B.V., Asmatulaev B.A. Tverdenie shlakovyh vjzhashhih na moroze [Hardening of slag binders in the cold]. *Construction and operation of roads in Siberia: Interdepartmental collection*. 1978. 102-109. (in Russian)

15. Popolov A.S. Opyt primenenija granulirovannyh shlakov v dorozhnom stroitel'stve Francii [Experience of application of granulated slags in road construction in France]. *CSTI of Minavtodor RSFSR*. 1984; 10: 1-13. (in Russian)

16. Bozhenov P.I., Berezina S.T. Promyshlennoe ispol'zovanie shlama glinozemnogo proizvodstva [Industrial use of slime of alumina production]. *Proceedings of the Yall-Union meeting on chemistry and technology of cement*. 1982. (in Russian)

17. Loginova I.V., Kyrchikov A.V. Apparaturno-technologicheskie shemy v proizvodstve glinozema [Hardware and technological schemes in the production of alumina]. Yekaterinburg, Urfu, 2011. 233 p. (in Russian)

18. Shepelev I.I., Stiglitz I.S., Eskova E.N., Sigaev A.M. Issledovanie himicheskikh i toksichnykh svoystv nefelinovykh shlamov dlja ispol'zovanija v sel'skom hozjajstve [Study of the chemical and toxic properties of nepheline sludge for use in agriculture]. *Vestnik KrasGAU*. 2016; 2: 13-18. (in Russian)

19. Shmorgunenkov N.S., Korneev V.I. Kompleksnaja pererabotka i ispol'zovanie otval'nykh shlamov glinozemnogo proizvodstva [Complex processing and use of dump slurries of alumina production]. Moscow, Metallurgiya, 1982. 128 p. (in Russian)

20. Design of non-rigid road surfaces: ODN 218. 046-01. Moscow, State road management service of the Ministry of transport of the Russian Federation, 2001. 145 p. (in Russian)

21. Lytkin A.A. Primenenie belitovogo shlama dlja ustrojstva sloev dorozhnykh odezhd pri otricatel'nykh temperaturah [Application of Belite sludge for the device of layers of road clothes at negative temperatures]. Moscow, 1990. 18 p. (in Russian)

22. Belousov B.V., Gavrilov A.N., Afonin A.S. Predlozhenija po konstruirovaniju dorozhnykh odezhd s povyshennym srokom sluzhby [Proposals for designing road coverings with an increased service life]. *Mir dorog*. 2016. 2 p. (in Russian)

23. Lytkin A.A. Vlijanie povtornogo uplotnenija i transportnykh nagruzok na karakter tverdenija belitovogo shlama v slojah dorozhnykh odezhd [Influence of repeated compaction and transport loads on the character of hardening of Belite sludge in layers of road clothes]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017; (3(55)):125-132. DOI: org/10.26518/2071-7296-2017-3(55)-125-132. (in Russian)

24. Lytkin, A.A. Study of the Transport Loads Influence on the Nature of Belite Sludge Hardening in Pavement. *Materials Science Forum* 992. 2020. 79-85.

25. Izyskanija, proektirovanie i stroitel'stvo avtomobil'nykh dorog v rajonah rasprostraneniya vechnoj merozloty. [Surveys, design and construction of highways in

areas of permafrost distribution]. Moscow, Ministry Of Construction, 1990. 271 p. (in Russian)

26. Beskrovny VM., Dezhina N.S., Lytkin A.A. Ustrojstvo shhebenochnogo osnovanija s obrabotkoj nefelinovym shlamom [Device of crushed stone base with treatment with nepheline sludge]. *Questions of production and application of local stone materials from natural rocks and industrial waste in the construction of road clothes*. 1981. 62-68. (in Russian)

27. Beskrovny V.M. Primenenie nefelinovogo shlama dlja stroitel'stva avtomobil'nykh dorog v uslovijah Sibiri [The use of nepheline sludge for the construction of highways in Siberia]. Moscow, 1984. 22 p. (in Russian)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лыткин Александр Александрович (г. Омск, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» ФГБОУ ВО СибАДИ, ORCID 0000-0002-5257-0502, Scopus Author ID 57217279492 (644080, г. Омск, ул. Мира, 5, e-mail: kaf_sed@sibadi.org).

Старков Глеб Борисович (г. Омск, Россия) – кандидат технических наук, заместитель генерального директора ООО «Стройсервис» (644073 г. Омск, ул. 2-я Солнечная, дом 43, e-mail: info@stroy servis.omsk.su).

Вагнер Евгений Яковлевич (г. Омск, Россия) – заместитель генерального директора ООО «Стройсервис» (644073 г. Омск, ул. 2-я Солнечная, дом 43, e-mail: info@stroy servis.omsk.su).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lytkin Alexander A. (Omsk, Russia) – candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor of the Department "Construction and Operation of Roads" of SibADI, ORCID 0000-0002-5257-0502, Scopus Author ID 57217279492 (644080, Omsk, st. Mira 5, e-mail: kaf_sed@sibadi.org).

Starkov Gleb B. (Omsk, Russia) – candidate of Technical Sciences, Deputy General Director of ООО "Stroy service" (6644073 Omsk, st. 2nd Solnechnaya, 43, e-mail: info@stroy servis.omsk.su).

Wagner Evgeniy Ya. (Omsk, Russia) – deputy general director of "Stroy service" (644073 Omsk, st. 2nd Solnechnaya, 43, e-mail: info@stroy servis.omsk.su).

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ, ПРЕДСТАВЛЯЕМОЙ В РЕДАКЦИЮ ЖУРНАЛА

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 представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

Обсуждение и заключение. Раздел содержит интерпретацию полученных результатов исследования, предположения о полученных фактах, сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Более подробно содержание раздела представлено на сайте журнала vestnik.sibadi.org.

9. 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 А4, шрифт Arial (10 пт), отступ первой строки 0,6 см, межстрочный интервал одинарный.

Поля: верхнее – 3,5 см, остальные – по 2,5.

Все сокращения при первом 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 подрисовочной подписью, и отдельными файлами с расширением (JPEG, GIF, BMP). Должны быть пронумерованы (Таблица 1 – Заголовок, Рисунок 1 – Наименование), озаглавлены (таблицы должны иметь заглавие, выравнивание по левому краю, а иллюстрации – подрисовочные подписи, выравнивание по центру). В основном тексте должны содержаться ссылки на них (на рисунке 1.....).

Рисунки и фотографии должны быть ясными и четкими, с хорошо проработанными деталями с учетом последующего уменьшения. При представлении цветных рисунков автор должен предварительно проверить их качество при использовании черно-белой печати. Отсканированные версии рисунков, схем, таблиц и формул не допускаются.

Таблицы предоставляются в редакторе Word.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

Общий порядок опубликования

Рукописи статей, подготовленные в соответствии с правилами оформления научно-исследовательской публикации и принятыми редакцией журнала международными стандартами, в электронном (через официальный сайт журнала) и бумажном виде предоставляются в редакцию журнала в комплекте:

- с экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати;

- 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. Корректурка 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.